



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y RENDIMIENTO DE TRIGO EN
RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN DIFERENTES
ETAPAS FENOLÓGICAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

TANIA LILIBETH VILLAFAÑA ARROYO

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, Enero 2013.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y RENDIMIENTO DE TRIGO EN
RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN DIFERENTES
ETAPAS FENOLÓGICAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

TANIA LILIBETH VILLAFAÑA ARROYO

COMITÉ DE TUTORES

Dr. Edgar Jesús Morales Rosales. Tutor Académico.

Dr. Gaspar Estrada Campuzano. Tutor adjunto.

Dr. Carlos Gustavo Martínez Rueda. Tutor adjunto.

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, Enero 2013.

**La presente tesis forma parte del proyecto de investigación cuyo título es:
ATRIBUTOS ECOFISIOLÓGICOS DETERMINANTES DEL RENDIMIENTO EN
TRIGO Y CEBADA EN REPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA con
clave 2925/2010, con financiamiento de la Universidad Autónoma del Estado
de México.**

DEDICATORIAS

A Dios por ser el guía de mi vida.

A mis padres Roberto e Irma por su amor y apoyo.

A mis hermanos Roberto y Nadlleli por su compañía.

AGRADECIMIENTOS

A Juan Carlos Ángeles Hernández, por su empeño, dedicación y cariño.

Al Dr. Edgar Jesús Morales Rosales, por brindarme la oportunidad de trabajar bajo su tutoría, por su apoyo y confianza.

Al Dr. Gaspar Estrada Campuzano, por compartir conmigo sus conocimientos, por su apoyo y paciencia.

Al Dr. Carlos Gustavo Martínez Rueda, por sus valiosas observaciones y aportes.

Al M. en C. Thomas Norman Mondragón, por su apoyo en el trabajo de campo.

A la Universidad Autónoma del Estado de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

ÍNDICE

<u>CONTENIDO</u>	<u>PÁGINA</u>
DEDICATORIAS	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE CUADROS	xi
RESÚMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Trigo: origen y evolución.....	3
2.2. Importancia mundial del trigo.....	5
2.3. Importancia de la producción de trigo en México.....	8
2.4. El N en el desarrollo y crecimiento.....	10
2.5. Fenología del trigo.....	13
2.6. Variables de crecimiento en el cultivo de trigo.....	14
2.6.1. Producción de biomasa.....	14
2.6.2. Radiación solar incidente.....	16
2.6.3. Intercepción de la radiación.....	17
2.6.4. Eficiencia en el uso de la radiación (EUR).....	18
2.6.5. Índice de área foliar (IAF).....	21
2.6.6. Índice de cosecha (IC).....	23

2.7. Generación del rendimiento.....	24
2.8. Componentes del rendimiento.....	26
2.8.1. Número de granos por unidad de superficie.....	27
2.8.1.1. Número de granos por espiga.....	28
2.8.1.2. Número de espigas por unidad de superficie.....	29
2.8.2. Peso del grano.....	29
III. JUSTIFICACIÓN.....	31
IV. HIPÓTESIS.....	32
V. OBJETIVOS.....	33
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
6.1. Sitio experimental.....	34
6.2. Descripción general del experimento.....	34
6.3 Factores de estudio.....	35
6.4. Variables de estudio.....	36
6.4.1. Fenología del cultivo.....	36
6.4.2. Determinación de la biomasa aérea.....	38
6.4.3. Radiación interceptada.....	39
6.4.4. Eficiencia en el uso de la radiación.....	40
6.4.5. Determinación del número de flores fértiles.....	40
6.4.6. Rendimiento de grano y sus componentes.....	41
6.4.7. Análisis estadístico.....	41
VII. RESULTADOS.....	42

7.1. DETERMINANTES ECOFISIOLÓGICOS DEL RENDIMIENTO EN TRES CULTIVARES DE TRIGO EN FUNCIÓN A LA DOSIS Y FRACCIONAMIENTO DE NITRÓGENO.....	42
7.1.1. Introducción.....	46
7.1.2. Materiales y métodos.....	47
7.1.3. Resultados y discusión.....	51
7.1.5. Conclusiones.....	60
7.1.6. Literatura citada.....	61
7.2.CAMBIOS EN EL RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES EN TRIGO EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA FRACCIONADA.....	69
7.2.1. Introducción.....	72
7.2.2. Materiales y métodos.....	74
7.2.3. Resultados y discusión.....	77
7.2.5. Conclusiones.....	94
7.2.6. Literatura citada.....	96
VIII. DISCUSIÓN GENERAL.....	104
IX. CONCLUSIÓN GENERAL.....	110
X. BIBLIOGRAFÍA.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>	<u>PÁGINA</u>
Distribución geográfica de la producción mundial de trigo.....	5
Principales países productores de trigo a nivel mundial.....	6
Países con mayores rendimientos de trigo.....	7
Principales cultivos en México.....	8
Principales estados productores de trigo en México.....	9
Fases de desarrollo en trigo.....	14
Diagrama de los principales componentes dentro del cual el rendimiento de grano puede ser numéricamente dividido	27
Estadío de espiguilla terminal en trigo observado a través del uso de microscopía.....	37
Relaciones entre el rendimiento de grano y el cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación, y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.	52
Relaciones entre la biomasa a madurez fisiológica y el cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación, y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.	55

Relaciones entre el índice de cosecha y el cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación, y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	56
Relaciones entre la radiación interceptada acumulada (RIA) a madurez fisiológica y el cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación, y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	57
Relaciones entre la biomasa a madurez fisiológica y la radiación interceptada acumulada (RIA) a madurez fisiológica, y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a madurez fisiológica, para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	58
Relaciones entre la biomasa a antesis y la radiación interceptada acumulada (RIA) a antesis y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a antesis para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	59
Relaciones entre el rendimiento de grano y la dosis de nitrógeno aplicado, para tres genotipos de trigo en Toluca, México.....	79
Relaciones entre el rendimiento de grano y el número de granos por unidad de superficie, y el peso individual de grano para tres genotipos de trigo y 3 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	80

Relaciones entre el número de granos por unidad de superficie y el cultivar y dosis de nitrógeno, y relaciones entre el peso individual de grano y el cultivar y dosis de nitrógeno para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	81
Relaciones entre el número de granos por unidad de superficie y el cultivar y estrategia de aplicación, y relaciones entre el peso individual de grano y el cultivar y estrategia de aplicación para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	84
Relaciones entre el número de granos por unidad de superficie y la dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, y relaciones entre el peso individual de grano y la dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.	85
Relaciones entre el número de espigas por metro cuadrado (NEPm ²) y el cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación, y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	87
Relaciones entre el número de granos por espiga (NGPE) y el cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	89
Relaciones entre el número de espiguillas por espiga (NEPE) y el	

cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación, y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	90
Relaciones entre el número de granos por espiguilla (NGPEspiguilla) y el cultivar y dosis de nitrógeno, y el cultivar y estrategia de aplicación, y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	91
Relaciones entre el peso seco de la espiga (PSE) y el número de flores fértiles a antesis (NFFAnt), y el número de granos por espiga (NGPE) para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.....	92

ÍNDICE DE CUADROS

<u>CUADRO</u>	<u>PÁGINA</u>
Descripción de la estrategia, etapa de aplicación y fertilizante total para tres genotipos de trigo.....	36
Descripción de la estrategia, etapa de aplicación y fertilizante total para tres genotipos de trigo.....	48
Significancia estadística de los valores de F del rendimiento y sus componentes en tres cultivares de trigo evaluados bajo distintas dosis de nitrógeno y estrategias de aplicación en Toluca, México.....	78

RESÚMEN

En trigo (*Triticum spp.*), la interceptación y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a nivel del cultivo son dos procesos fundamentales que influyen en la producción de biomasa y en el rendimiento de grano. El suministro de fertilizantes nitrogenados al cultivo, contribuye al incremento del rendimiento y a mejorar la calidad de grano en trigo; sin embargo, debido a factores ambientales y económicos, se propone el uso eficiente de insumos, el cual consiste en maximizar la producción con la mínima cantidad de nitrógeno (N). El objetivo del presente estudio fue evaluar la EUR, biomasa y rendimiento de grano en tres cultivares de trigo en función de dos niveles de nitrógeno y tres estrategias de aplicación. El experimento se realizó bajo condiciones de temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 2011 en Toluca, México. Se evaluaron tres genotipos de trigo: Salamanca S-75 (liberación antigua), Romoga F-96 (liberación intermedia) y Tollocan F-2005 (reciente liberación), con tres estrategias de aplicación: 1 (50% de N en la siembra y 50% en amacollamiento); 2 (50% de N en la siembra y 50% en espiguilla terminal); 3 (50% de N en la siembra y 50% en hoja bandera). Cuando las pruebas de F fueron significativas se realizó la diferencia significativa honesta (DSH). Entre los cultivares, Tollocan F-2005 mostró mayor biomasa, rendimiento, índice de cosecha (IC), número de granos por m² (NG), número de granos por espiga (NGPE) y número de espiguillas por espiga (NEPE); los valores de biomasa, rendimiento, NG, NGPE, NEPE, número de espigas por m² (NEPm²), peso seco de la espiga (PSE) y EUR se incrementaron con la dosis 200 kg N ha⁻¹. Se observó una respuesta positiva en las estrategias 2 y 3; sin embargo, el efecto de cada estrategia de aplicación está en función del cultivar y de la dosis de nitrógeno.

Palabras clave: *Triticum spp.*, nitrógeno, biomasa, rendimiento, número de granos, número de espigas, número de espiguillas.

ABSTRACT

In wheat (*Triticum spp.*), the interception and the radiation use efficiency (RUE) are two fundamental processes that influence biomass production and grain yield. The supply of nitrogen fertilizers to crop, contributes to increase grain yield and to improve the quality of grain in wheat; however, due to environmental and economic factors, the efficient use of inputs, which is to maximize production with the minimum amount of nitrogen (N) is proposed. The aim of the present study was to evaluate the RUE, biomass and grain yield in three cultivars of wheat according to two levels of nitrogen and three implementation strategies. The experiment was conducted under rainfed conditions during the spring-summer 2011 in Toluca, Mexico. Three wheat genotypes were evaluated: Salamanca S-75 (old release), Romoga F-96 (intermediate release) and Tollocan F-2005 (recent release), with three implementation strategies: 1 (50% of N in the sowing and 50% in tillering); 2 (50% of N in the sowing and 50% in terminal spikelet); 3 (50% of N in the sowing and 50% in flag leaf). When the *F* tests were significant honestly significant difference (DSH) was performed. Among cultivars, Tollocan F-2005 showed increased biomass, yield, harvest index (HI), number of grains per m² (NG), number of grains per spike (NGPE) and number of spikelets per spike (NEPE); the values of biomass, yield, NG, NGPE, NEPE, number of spikes per m² (NEPm2), dry weight of ear (DWE) and RUE increased with dose 200 kg N ha⁻¹. It was observed a positive response in the strategies 2 and 3; however, the effect of each implementation strategy is depending on the cultivar and the dose of nitrogen.

Key words: *Triticum spp.*, nitrogen, biomass, yield, grain number, number of spikes, number of spikelets.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL.

El trigo (*Triticum spp.*) es el cultivo más extensamente sembrado en el mundo (Briggle y Curtis, 1987; Kent y Evers, 1994; Slafer, Sattorre y Andrade, 1994), ocupando aproximadamente una sexta parte del área total de terreno destinada a la agricultura (Slafer y Sattorre, 1999). Durante el siglo XX, la producción de trigo se incrementó de 90 a 600 millones de toneladas; esto, debido al incremento de la superficie cosechada y del rendimiento de grano (Slafer *et al.*, 1994).

Sin duda los cambios que se han producido en la agricultura en los últimos años han llevado a la necesidad de incrementar el conocimiento del cultivo de trigo con el objetivo de lograr mayores rendimientos, favoreciendo así la rentabilidad de esta actividad agrícola.

El uso eficiente de los insumos para la producción agrícola, es un aspecto de gran relevancia debido al incremento en los costos de los fertilizantes y la continua preocupación por el impacto ambiental asociada con el uso inapropiado de nutrimentos. Por lo que es necesario desarrollar estrategias que permitan obtener rendimientos más altos, pero que al mismo tiempo integren la conciencia ambiental y la rentabilidad del cultivo.

La respuesta a la aplicación de elementos minerales en todos los cultivos es específica del sitio donde se cultiva. El trigo (*Triticum spp.*) no es la excepción, y por tal razón, una recomendación de fertilización precisa necesita información sobre la respuesta particular de éste a la nutrición mineral en cada sitio (Prabowo *et al.*, 2002).

El trigo al ser una gramínea, es altamente demandante en nitrógeno, por lo que desempeña un papel protagónico en cualquier plan de fertilización, lo que no implica descuidar al resto de componentes minerales. Así mismo, se ha mencionado que uno de los nutrimentos más importantes en la producción de trigo es el N, pero las estrategias de manejo de este mineral han cambiado poco a través de los años y se presume que su eficiencia de uso es muy baja.

De manera general las recomendaciones de N en trigo no toman en cuenta los rendimientos obtenibles en diferentes condiciones ambientales, ni la contribución de los nutrimentos nativos del suelo, además de ser frecuentes las recomendaciones de cantidades fijas para áreas muy extensas de producción (Prabowo *et al.*, 2002).

Los efectos agronómicos que causa el nitrógeno en el vegetal son: mayor expansión foliar e incremento en el grosor de las hojas. En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la eficiencia en el uso de la radiación, biomasa y rendimiento de grano en tres cultivares de trigo en función de dos niveles de nitrógeno en cuatro etapas fenológicas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Trigo: origen y evolución

Evidencias de excavaciones arqueológicas revelaron que la domesticación del trigo tuvo lugar durante un largo periodo de tiempo, desde el 12000 a.C. al 6500 a.C. El cultivo de trigo es reportado desde 6000 años atrás en Mesopotamia, y desde ahí, aparentemente se dispersó hacia Medio Oriente, Norte de África, Asia y Europa (Harlan, 1981). El trigo se distribuyó hacia América y África del Sur alrededor del 1500 d.C. y se introdujo en Australia en 1790; hoy en día, el trigo es cultivado ampliamente alrededor del mundo.

El desarrollo de cultivares modernos de trigo comenzó cuando se sembraron y domesticaron semillas de trigo silvestre (Peng *et al.*, 2011). El trigo es el cereal universal de la agricultura del viejo mundo y es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial (Feldman *et al.*, 1995; Zohary y Hopf, 2000; Gustafson *et al.*, 2009). Un crecimiento significativo en el rendimiento se ha registrado en los últimos años por China, India, Reino Unido, Alemania, Francia, Egipto, Argentina y Pakistan (Peng *et al.*, 2011).

En la actualidad el 95% de la producción mundial de trigo es para la elaboración de pan, el otro 5% es trigo duro para la elaboración de pastas. Los cultivares modernos de trigo usualmente se refieren a dos especies: *Triticum aestivum* y *T. turgidum durum*. Una mejora en la producción de trigo ha sido registrada en la década de los 70`s, debido a:

- I. La introducción y propagación de cultivares semienanos desarrollados por Nobel Laureate Norman E. Borlaug durante los años 60s, responsables del incremento en el rendimiento, debido a una alta productividad por unidad de superficie.
- II. Mejoras en las técnicas de riego y manejo (Peng *et al.*, 2011).

El mejoramiento genético del trigo ha permitido incrementar el rendimiento potencial del cultivo, principalmente por un incremento en la distribución de biomasa hacia los órganos reproductivos (Slafer *et al.*, 1994), así como otras variaciones en el comportamiento de determinantes del rendimiento como son:

- I. La tasa fotosintética e incremento de biomasa (Rivas, *et al.*, 1996).
- II. La eficiencia en el uso de la radiación y la tasa de crecimiento del cultivo (Calderini *et al.*, 1996).

La introducción de nuevos cultivares que pueden presentar comportamientos diferentes de productividad y componentes de rendimiento, podrían mostrar nuevos aspectos de manejo y modificaciones en la exploración de los recursos de determinados ambientes. Esta situación no sólo modificará su expresión de rendimiento, sino que también modificará la disponibilidad de estos recursos (agua, nutrientes, rastrojo) en una secuencia de cultivos, por lo cual un mayor conocimiento del comportamiento de los mismos permitiría realizar una mejor selección de cultivares según el ambiente y ajustar las tecnologías de manejo.

2.2. Importancia mundial del trigo

El trigo, arroz y maíz son los principales cereales en la dieta básica de la mayoría de la población mundial. Los cereales poseen un excepcional valor nutritivo, ya que proporcionan azúcares de absorción lenta, proteínas, fibras, vitaminas y numerosas sales minerales (Peng *et al.*, 2011).

Los cereales se cultivan por su fruto, el grano seco y harinoso, del cual se obtienen diversas harinas para la alimentación humana, útiles en la elaboración de pan, pastas y sémolas.

Durante el siglo XX, la producción mundial de trigo aumentó casi siete veces, pasando de 90 a 600 millones de toneladas. Incrementos en el área cosechada explicaron la mayor producción en la primera mitad del siglo, mientras que en la segunda mitad la producción se incrementó vía aumentos en los rendimientos por unidad de área (Slafer *et al.*, 1994).



Figura 1. Distribución geográfica de la producción mundial de trigo (FAO, 2010).

Durante el año 2010, el maíz registró una producción de 840.31 millones de toneladas, seguido del arroz con 696.32 y el trigo con 653.65 (FAO, 2012). En este sentido, el trigo ocupa el tercer lugar a nivel mundial en relación a la producción de cereales; sin embargo, para consumo humano es el grano que tiene mayor relevancia. Los principales países productores de trigo a nivel mundial son China, India, EUA, Rusia y Francia (Figura 2).

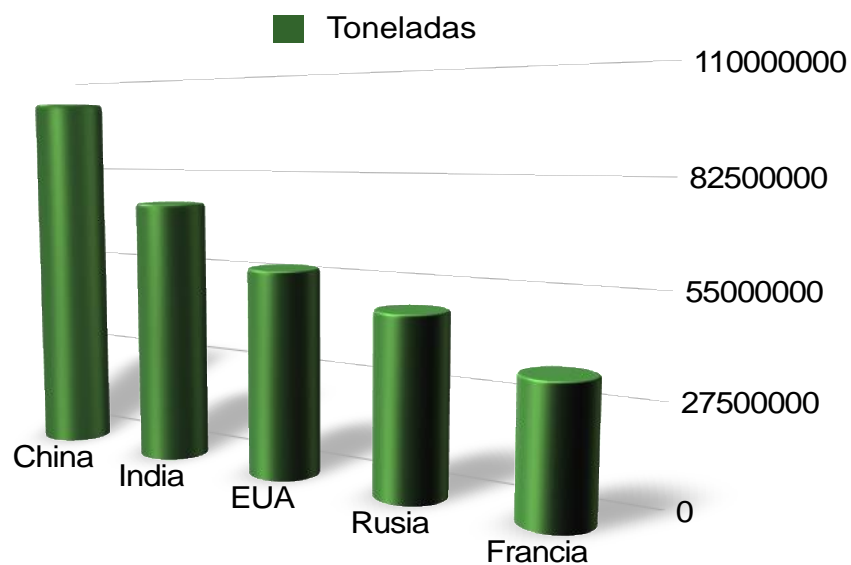


Figura 2. Principales países productores de trigo a nivel mundial (FAO, 2010).

El rendimiento promedio a nivel mundial de trigo es de menos de 2 t ha^{-1} . Dentro de los países que presentan mayores rendimientos se encuentran Irlanda, Bélgica y los Países Bajos (Figura 3). Se ha sugerido que bajo condiciones ideales de crecimiento, el rendimiento de grano de trigo puede llegar a 20 t ha^{-1} (Hanson *et al.*, 1982); sin embargo, el mayor rendimiento reportado es de 14 t ha^{-1} (Cook y Veseth, 1992).



Figura 3. Países con mayores rendimientos de trigo (FAO, 2010).

De acuerdo con la información sobre consumo, alrededor del 75% se consume de manera directa, esto es, a través de productos finales como pan, harina y pastas alimenticias; el 15% de forma indirecta a través de productos animales y el resto se emplea como semilla (Galarza *et al.*, 2005).

El trigo es la base de la alimentación de alrededor del 35 % de la población mundial, además de proporcionar más calorías y proteínas en la dieta mundial al compararse con otros granos. Una característica particular del trigo es su contenido de gluten con proteína que permite producir una amplia variedad de productos finales (Galarza *et al.*, 2005).

2.3. Importancia de la producción de trigo en México

En México los principales cultivos, en cuanto a niveles de producción, son la caña de azúcar, el maíz y el sorgo (Figura 4). Nuestro país, comparado con los países europeos, no es considerado como una nación importante en la producción y comercialización del trigo; sin embargo, ocupa un lugar substancial en la dieta de los mexicanos, ya que es la base para la elaboración de productos finales como pan, galletas, pasteles y pastas, entre otros.

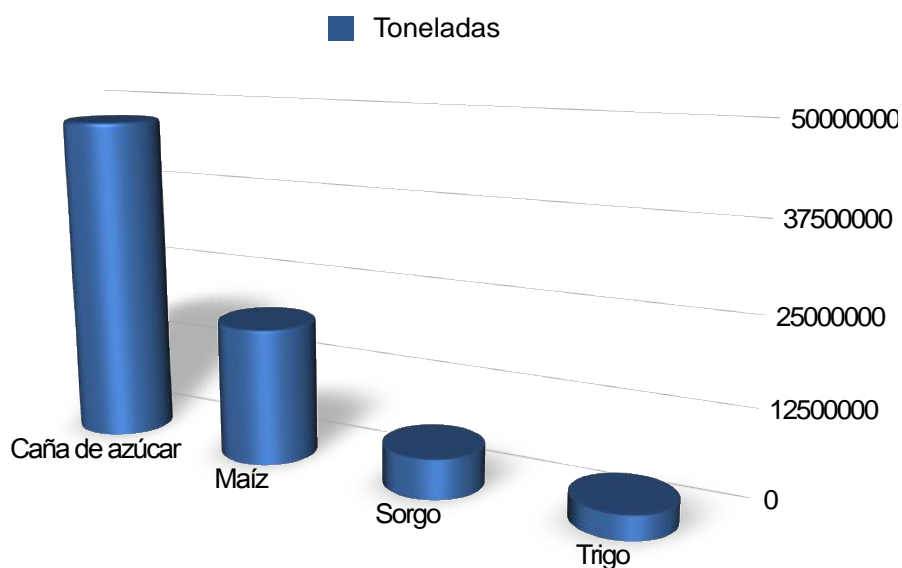


Figura 4. Principales cultivos en México (FAO, 2010).

Los principales estados productores de trigo en México son Sonora, Sinaloa y Baja California, ubicados en la región noroeste, con una producción conjunta que alcanza el 57% de la producción anual nacional, mientras que Guanajuato, Michoacán y Jalisco pertenecientes a la región del Bajío producen el 27% de trigo (Figura 5) para el país por año (Navarro *et al.*, 2007).

Los rendimientos de trigo en México, que representan una importante medida del progreso del mejoramiento genético y las prácticas de manejo, se han incrementado un 25% durante las dos últimas décadas (Lobell *et al.*, 2005). Para el periodo 2000-2010 se sembraron en México un promedio de 657 mil hectáreas, con una producción de 3.3 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 4.8 t ha⁻¹ (FAO, 2010).

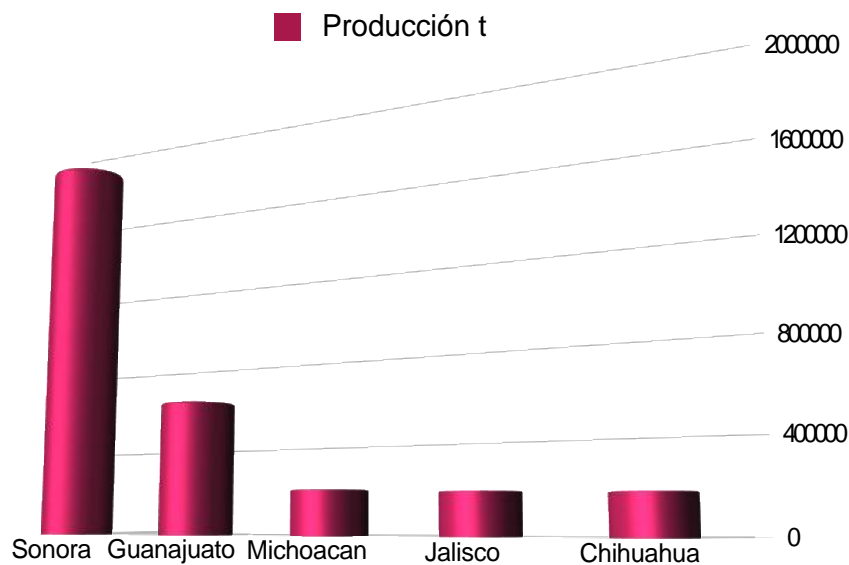


Figura 5. Principales estados productores de trigo en México (FAO, 2010).

México es la cuna de la revolución verde para el trigo y uno de los primeros países en adoptar nuevos cultivares y tecnologías desarrolladas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). En consecuencia, diversos estudios sobre el progreso del mejoramiento genético en trigo se han

llevado a cabo en nuestro país (Bell *et al.*, 1995; Sayre *et al.*, 1997; Rejesus *et al.*, 1999; Lobell *et al.*, 2005).

Estos estudios consideran rendimientos hasta 1990, concluyendo que la tasa del progreso en el rendimiento ha sido constante durante los últimos 30 años (Rejesus *et al.*, 1999). Asimismo, señalan algunos factores los que intervienen en el potencial de rendimiento como son: condiciones climáticas, utilización de cultivares mejorados, adecuación de prácticas de manejo del cultivo (e.g. incremento en el uso de fertilizantes y mejor uso del agua) (Naylor *et al.*, 2001).

2.4. El N en el desarrollo y crecimiento

El nitrógeno (N) es uno de los macronutrientes más limitantes para la producción agrícola. Este elemento condiciona entre otros aspectos, el establecimiento y el mantenimiento de la capacidad fotosintética del dosel vegetal y la determinación de la capacidad de los destinos reproductivos (Andrade *et al.*, 1996).

El N es indispensable para el desarrollo y crecimiento de las plantas; éste elemento es muy abundante en el suelo y depende del contenido en materia orgánica. Existe entre 0.02 – 0.4 % de N en suelo, del cual el 98% está en forma orgánica, por lo que, solo una pequeña fracción resulta asimilable por las plantas (García, 1996).

El N se suministra en forma de urea, nitratos, complejos de amonio o amoniaco puro, por medio de los fertilizantes (García, 1996). Este elemento en las plantas permite la formación de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila y constituye más del

20% del peso seco de la planta (García, 1996). En estas condiciones, el rendimiento está fuertemente limitado por la disponibilidad de N y responde aumentando casi linealmente al agregado del nutrimento.

Es frecuente observar que el N agregado a los cultivos es usado de forma eficiente en la formación de destinos reproductivos (flores fértiles-granos). El N presente en la espiga se diluye en el “pool” de carbohidratos que pueden ser acumulados en sitios de demanda (mayor número de granos) y se observa que incrementos en el rendimiento pueden ir acompañados de mermas en el porcentaje de proteína de los granos (Andrade *et al.*, 1996; González-Murua *et al.*, 2003; Satorre *et al.*, 2003).

El N es el elemento químico que influye directamente en la producción vegetal tanto en forma cuantitativa como cualitativa, favoreciendo el crecimiento vegetativo de los tejidos, el incremento del área foliar y la tasa fotosintética, así como la producción de un mayor número de macollos en los cereales de grano pequeño. Así mismo, el índice de área foliar, la senescencia de las hojas y la actividad fotosintética dependen, en gran medida, de la disponibilidad de N, por lo que deficiencias de este nutrimento disminuyen la interceptación de la radiación por parte del cultivo y la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa (Andrade *et al.*, 1996; González-Murua *et al.*, 2003; Satorre *et al.*, 2003).

La determinación del número de granos por unidad de superficie está en función del estado fisiológico del cultivo en floración, que está condicionado por la

disponibilidad de N (Andrade *et al.*, 1996). Por consiguiente, las deficiencias de N afectan el número de granos y el rendimiento, reduciendo la tasa de crecimiento del cultivo y la distribución de asimilados hacia la espiga durante el período crítico de fijación de estructuras reproductivas (Andrade *et al.*, 1996).

La disponibilidad de nutrientes determina de forma directa el rendimiento de grano en trigo, así como el suministro de agua y las medidas de protección fitosanitaria. Igualmente, existen técnicas de manejo que han sido elaboradas tomando en cuenta las eficiencias de uso de nutrientes y del agua de nuevos cultivares con el objetivo de obtener altos rendimientos.

A través de los años se ha observado un incremento en la utilización de fertilizantes nitrogenados con la finalidad de mantener o mejorar la producción de los cultivos. El uso de fertilizantes nitrogenados ha hecho una importante contribución para incrementar el rendimiento y calidad de los cultivos; sin embargo, debido a razones económicas y ambientales, se pretende maximizar la producción utilizando la menor cantidad posible de fertilizante nitrogenado (Bell *et al.*, 1995; Dreccer *et al.*, 2000).

Charles-Edwards (1982) señala variaciones en la producción de biomasa en respuesta a la disponibilidad de nitrógeno podrían atribuirse a diferencias en la cantidad de radiación interceptada acumulada (RIA: MJ m⁻²) por el dosel del cultivo, la eficiencia en el uso de la radiación (EUR: g MJ⁻¹) y la distribución a diferentes órganos.

La deficiencia en el aporte de N es la carencia nutricional más frecuente y difundida en los cereales de grano pequeño, debido a la falla en la producción de clorofila, lo que ocasiona que las plantas que sufren esa carencia se tornen pálidas en comparación con las plantas sanas (Snowball y Robson, 1991); Este fenómeno ocasiona una reducción en la producción de biomasa, al disminuir la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y la eficiencia con que éste convierte dicha radiación interceptada en biomasa (Andrade *et al.*, 1996). La disminución de la radiación interceptada se explica, principalmente, por reducciones en la expansión de las hojas (Muchow, 1988).

2.5. Fenología del trigo

Durante el desarrollo fenológico del cultivo de trigo (Figura 6), se producen cambios tanto en la morfología externa de las plantas como en la actividad del ápice meristemático encargado de la generación de primordios de órganos vegetativos y reproductivos (Slafer *et al.*, 2003).

La duración de las etapas de desarrollo en trigo dependen de factores medioambientales como: temperatura, fotoperiodo, vernalización (Fisher, 1984; Slafer, 1996).

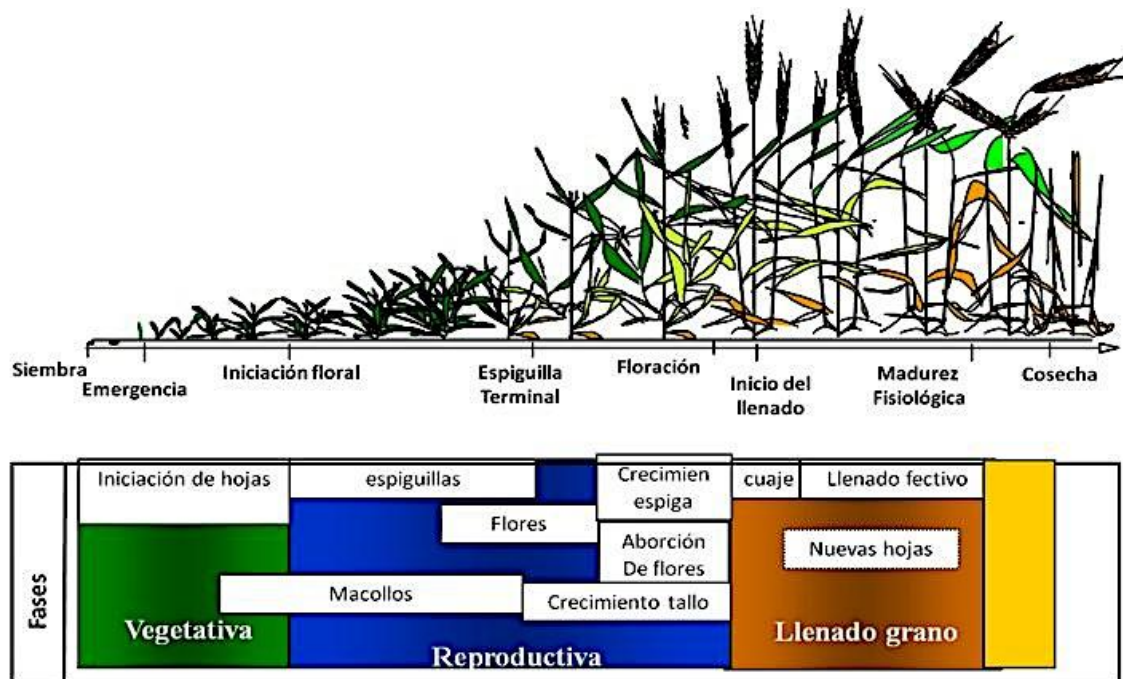


Figura 6. Fases de desarrollo en trigo (Adaptado de Slafer y Rawson, 1994; Miralles y Slafer, 1999).

2.6. Variables de crecimiento en el cultivo de trigo

2.6.1. Producción de biomasa

El análisis del crecimiento vegetal se basa en la medición de la biomasa producida durante el ciclo del cultivo en función de la capacidad de intercepción de la luz y de la actividad fotosintética (Gallagher, 1979; Monteith y Elston, 1981; García del Moral *et al.*, 1987).

El crecimiento de un cultivo depende de la radiación solar incidente, de la capacidad del dosel para interceptarla y de la eficiencia con que el cultivo transforma la radiación interceptada en materia seca (Andrade *et al.*, 1996).

El crecimiento de un cultivo es el producto de la división y el alargamiento celular de los órganos diferenciados. Estos procesos son el resultado de la producción,

transporte y acumulación de fotoasimilados y nutrimentos. Los fotoasimilados provienen de la fijación de dióxido de carbono (CO_2), producto de la fotosíntesis. Este es el proceso por el cual la energía solar es transformada en energía química, y tiene lugar principalmente en las láminas de las hojas; siendo éstos los órganos de las plantas con mayor concentración de clorofila (Cárcova *et al.*, 2003). Una lámina sometida a intensidades crecientes de luz presenta, en una primera etapa, un aumento lineal de la fijación de CO_2 . Posteriormente, en una segunda etapa, el incremento es menos que proporcional y, finalmente, hay una tercera etapa en la que se produce un efecto de saturación y no se registra respuesta al aumento de la intensidad lumínica. A partir de allí, la limitación para la producción de azúcares está dada por algún otro factor (Cárcova *et al.*, 2003).

Por lo tanto, la producción de materia seca está en función de la radiación solar fotosintéticamente activa incidente, de la eficiencia con la que el cultivo la intercepta (eficiencia de intercepción) y de la eficiencia con que las plantas utilizan la energía interceptada para fijar CO_2 (eficiencia de conversión) (Andrade *et al.*, 1996).

La materia seca total producida desde la emergencia hasta la madurez fisiológica de un cultivo, está directamente relacionada con la cantidad total de energía interceptada durante el transcurso del ciclo del cultivo (Andrade *et al.*, 1996).

La tasa de crecimiento de un cultivo (TC: biomasa acumulada por unidad de tiempo), al igual que la de una hoja, resulta del balance de dos procesos contrapuestos: la fotosíntesis (ganancia de CO_2) y la respiración (pérdida de CO_2).

Debido a que la fracción del carbono fijado que se destina a respiración es relativamente constante, aumentos en la radiación interceptada por el cultivo se traducen en aumentos proporcionales en la tasa de crecimiento (Cárcova *et al.*, 2003). Shearman *et al.* (2005) y White y Wilson (2006) señalan que en ausencia de factores limitantes, existe una relación estrecha entre la producción de biomasa total y el rendimiento de grano; de igual forma, Donmez *et al.* (2001) reportaron que incrementos en el rendimiento de grano en trigo estuvieron relacionados con incrementos en la producción de biomasa total.

Barbieri *et al.* (2008), mencionan que la acumulación de materia seca en la madurez fisiológica fue significativamente mayor debido a la aplicación de N (140 kg ha⁻¹).

2.6.2. Radiación solar incidente

La duración de la estación de crecimiento (días) impone a menudo una restricción al aprovechamiento del ambiente por parte de cada cultivo. Sin embargo, la radiación incidente varía con la ubicación geográfica (latitud) y con la época del año, y aun cuando su magnitud está fuera del manejo agronómico, ciertas prácticas culturales como la elección de la fecha de siembra y del genotipo permiten adecuar el ciclo del cultivo para maximizar su aprovechamiento (Cárcova *et al.*, 2003).

De la radiación total incidente, solo la fracción fotosintéticamente activa (RFA) del espectro visible (ubicada entre 400 y 700 nm) es realmente aprovechada por el cultivo (Cárcova *et al.*, 2003).

La tasa de crecimiento del cultivo es directamente proporcional a la radiación incidente. Este hecho obedece a dos factores independientes, por un lado están los mayores niveles de RFA_{inc} , los cuales se traducen en mayor cantidad de energía disponible, y por otro lado, se encuentra la capacidad del dosel vegetal de responder linealmente a esa mayor oferta de radiación, esta capacidad de respuesta está asociada a la disposición geográfica del follaje (Andrade *et al.*, 1996).

Del total de radiación incidente durante el periodo de crecimiento del cultivo, solo una fracción es utilizada, debido a que en los primeros estadios de desarrollo el cultivo carece de la superficie foliar suficiente como para interceptar la radiación incidente (Andrade *et al.*, 1996).

2.6.3. Intercepción de la radiación

La radiación interceptada por un cultivo es el resultado de la eficiencia con que la radiación incidente es interceptada por el dosel vegetal (eficiencia de intercepción), en este contexto, la producción de fotoasimilados de un cultivo puede ser expresada en términos de su eficiencia para convertir radiación solar interceptada en biomasa (Satorre *et al.*, 2003).

La cantidad de radiación interceptada por un cultivo está determinada por la expansión y senescencia del área foliar, la cual se define a través de sus componentes como son: número de hojas por planta, número de macollos o ramificaciones por planta y el área foliar por hoja (Dreccer *et al.*, 2003).

Las deficiencias de nitrógeno alteran la dinámica de expansión y senescencia el área foliar verde, por lo tanto, afectan la fracción de radiación interceptada por el cultivo (Dreccer *et al.*, 2003). La cantidad de radiación interceptada acumulada por un cultivo depende de la duración del ciclo y de la dinámica de intercepción de dicho cultivo, esta última está fuertemente ligada a la evolución del IAF (Cárcova *et al.*, 2003).

El número de hojas, su orientación y el IAF afectará la captura de la radiación (Passioura, 1977; Fischer, 1979; Tanner y Sinclair, 1983; Cooper *et al.*, 1987). Para lograr altos valores de intercepción de la radiación en un cultivo, es importante generar en forma temprana un IAF que permita interceptar rápidamente la mayor proporción de la radiación incidente (95%) y, que el valor de IAF se mantenga durante la mayor cantidad de tiempo posible (Satorre *et al.*, 2003).

2.6.4. Eficiencia en el uso de la radiación (EUR)

La EUR, se define como la cantidad de materia seca vegetal producida por unidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (Andrade *et al.*, 1996).

La radiación solar fotosintéticamente activa interceptada por los cultivos es transformada en biomasa. La pendiente de la relación entre ambas variables es denominada EUR y se expresa en gramos (g) de biomasa por megajoule (MJ) de la radiación interceptada (Satorre *et al.*, 2003). Por otra parte, severas limitaciones hídricas disminuyen la EUR en la medida en que afectan la fotosíntesis (Satorre *et al.*, 2003).

Existe una relación estrecha entre la cantidad de radiación recibida por un cultivo y su crecimiento. Monteith (1972) dilucidó por primera vez la función del cultivo en absorber energía, y de transformar la energía interceptada en biomasa. La eficiencia de esta transformación es caracterizada por la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), comúnmente definida como la relación entre la biomasa producida y la energía interceptada.

Monteith (1977), realizó una revisión sobre los resultados experimentales de la cantidad de materia seca acumulada por diversos cultivos y encontró que la tasa de acumulación de materia seca varió en proporción directa a la cantidad de radiación interceptada. Derivado de un análisis combinado de cultivos, encontró que alrededor de 1.4 g de materia seca del cultivo fue acumulada por cada MJ de radiación solar interceptada.

Sinclair and Muchow (1999) evaluaron y discutieron las causas de la variabilidad en la EUR, además de identificar las precauciones necesarias en la medición de biomasa y radiación así como la elección del método de cálculo de EUR. Por ejemplo, algunos autores mencionan la utilización del factor de corrección igual a

0.5 para la radiación solar incidente, la cual estaría en la longitud de onda entre 400 y 700 nm, otros como Sinclair y Muchow (1999) utilizan 0.85 para la radiación absorbida y Kiniry (1999) utiliza el factor de 1.19 para la radiación interceptada.

Los cálculos aproximados realizados por estos autores evitan las comparaciones de diferentes estimaciones de EUR en respuesta a cualquier tipo de dosel del cultivo (geometría, propiedades ópticas), o índice de área foliar (IAF) y su efecto sobre la intercepción y absorción de la luz (Bonhomme, 2000).

Las variaciones en la eficiencia de absorción de la radiación están en función del IAF, ya que en cultivos con IAF superiores, la energía transmitida desde el dosel hasta el suelo es cerca de cero, por lo que la radiación no absorbida es debida a la reflexión (Bonhomme, 1993).

En este sentido, se ha observado que bajos IAF del cultivo tuvieron un pequeño efecto sobre la EUR; por lo que a bajos IAF, la EUR se redujo debido a la alta proporción de área foliar del cultivo que se sometió a la radiación, aproximándose al punto de saturación de luz fotosintética; encontrándose que esas hojas son menos eficaces que las de la sombra. Por otro lado, también se ha observado que a mayores IAF la EUR se incrementa (Sinclair y Horie, 1989).

Resultados obtenidos por Monteith (1977) y Murata (1981), muestran que existe dependencia de la EUR sobre la tasa de asimilación de CO₂ en las hojas, observándose que valores superiores de tasa de asimilación de CO₂, genera valores mayores de EUR. Asimismo, existe una correlación entre el contenido de nitrógeno foliar y la tasa de asimilación de CO₂ (Sinclair y Horie 1989).

Existe una dependencia de la EUR sobre el contenido de nitrógeno en las hojas. Sinclair y Horie (1989) señalan un efecto del nitrógeno sobre la EUR en tres especies (maíz, soya y arroz), y se observó que el efecto está en función de la especie, ya que en maíz la EUR respondió mejor al incremento de nitrógeno, seguido del arroz y finalmente soya que tuvo la menor EUR.

Novoa y Loomis (1981), Radin (1983) y Lemcoff y Loomis (1986) mencionan que es importante que en etapas tempranas de crecimiento del cultivo, cuando la fuente de nitrógeno esté disponible, debe ser repartida entre el crecimiento del área foliar y el contenido de nitrógeno en las hojas; ya que es claro que si la disponibilidad de nitrógeno para el crecimiento de nuevas hojas está restringido, entonces la cantidad de área foliar producida estará restringida.

2.6.5. Índice de área foliar (IAF)

El IAF se define como la superficie foliar fotosintéticamente activa por unidad de superficie de suelo. El IAF se genera con la aparición y expansión de las hojas y es producto del número de hojas y del tamaño de las mismas. Las hojas aparecen a un ritmo relativamente constante de tiempo térmico denominado filocrono. Este valor varía entre especies, así como entre genotipos dentro de cada especie (Satorre *et al.*, 2003).

El tamaño de las hojas depende de la duración y de la tasa de expansión foliar de las mismas (Satorre *et al.*, 2003). El IAF es una variable estructural crítica para entender procesos biofísicos del dosel del cultivo y para cuantificar los procesos

de intercambio de energía entre la superficie de la tierra y la atmósfera (Berger *et al.*, 2009).

La temperatura modifica en forma substancial el IAF debido a sus efectos sobre la duración del período de diferenciación de hojas, la tasa de aparición y el tamaño de las hojas. La tasa de expansión foliar responde marcadamente a la disponibilidad de recursos: deficiencias de agua y/o nutrimentos reducen la tasa de expansión foliar, mientras que la duración no se ve afectada (Satorre *et al.*, 2003).

El IAF es un estimador adecuado para medir el grado de desarrollo. Niveles de IAF que posibilitan alcanzar el 95% de intercepción de la RFA_{inc} , permiten lograr la máxima tasa de crecimiento (Arguisain, 1990; Andrade *et al.*, 1996). El IAF que posibilita alcanzar las tasas de crecimiento máximas se denomina IAF crítico, y su valor varía para distintas condiciones ambientales y para diferentes cultivos (Andrade *et al.*, 1996).

Este índice, aumenta en forma exponencial porque generalmente las primeras hojas son de menor tamaño que las siguientes y debido a que después de aparecer un cierto número de hojas, muchos cultivos empiezan a ramificar o amacollar generando entonces nuevas unidades sobre las que aparecen nuevas hojas (Satorre *et al.*, 2003).

La competencia intraplanta y las modificaciones en el ambiente lumínico del cultivo, determinan que la expansión foliar y la ramificación/amacollamiento

disminuyan hasta cesar, produciéndose el comienzo de la senescencia de órganos vegetativos (Satorre *et al.*, 2003).

2.6.6. Índice de cosecha (IC)

El IC es una característica utilizada en los programas de mejoramiento genético de los cultivos y en la evaluación de la respuesta a diferentes tratamientos agronómicos (Donald y Hamblin, 1976), además, se presenta como una herramienta que permite la interpretación de la respuesta de los cultivos a diferentes ambientes y condiciones climáticas (Hai, 1995).

La mejora en el rendimiento potencial del trigo es en gran parte una consecuencia de la mejora en el IC (Sinha *et al.*, 1982) y su vez el mejoramiento del IC deriva del incremento en el número de granos y del peso individual del mismo (Hai, 1995).

Donald (1962) fue el primero en definir el IC como el rendimiento económico de un cultivo de trigo expresado como una décima fracción del rendimiento biológico total, pero él claramente se refiere a la producción de biomasa aérea total.

El IC refleja la distribución de fotoasimilados hacia los granos y en la actualidad se define como la proporción del peso seco total que se acumula en los granos cosechados (Cárcova *et al.*, 2003). Andrade *et al.* (1996), lo definen como el cociente entre el rendimiento de grano y el rendimiento biológico, o fracción de la biomasa total acumulada en los granos en madurez fisiológica.

White y Wilson (2006) reportaron que incrementos en los rendimientos de cultivares de trigo han sido atribuidos a incrementos en la distribución de biomasa hacia el grano, es decir, elevados índices de cosecha.

Van Dobben (1962) mencionan que el mejoramiento genético ha incrementado el índice de cosecha, al presentar elevada heredabilidad, lo que permite explorar respuestas de los cultivos a variaciones ambientales (fertilización, densidad de población, reguladores de crecimiento) en ausencia de factores estresantes (Hai, 1995).

2.7. Generación del rendimiento

Slafer *et al.* (1996) señalan indicios de que los rendimientos de trigo parecen haberse estabilizado, en consecuencia es necesario analizar los procesos fisiológicos que ayuden a identificar las oportunidades para futuros mejoramientos. Existen diversas características determinantes del rendimiento que pueden ser consideradas, una de ellas es la habilidad del cultivo para interceptar y utilizar de manera eficiente la radiación, la distribución de la biomasa hacia los órganos de interés, y la absorción y uso de agua y nutrimentos (Slafer *et al.*, 1996). Cook y Veseth (1992) describen el rendimiento en cuatro formas:

- i. Rendimiento absoluto: es donde el único factor limitante es el potencial genético de los cultivos.

- ii. Rendimiento alcanzable: es el posible rendimiento en un determinado entorno, ubicación y año; está limitado por factores que no pueden ser controlados.
- iii. Rendimiento real: es el rendimiento en cualquier campo dado y es el producto de la respuesta del cultivo a diversos estreses bióticos y abióticos.
- iv. Rendimiento factible: considera los costos económicos de los insumos en relación con los ingresos netos del productor.

El rendimiento de grano en trigo queda establecido y puede ser medido, inmediatamente después de que finaliza el ciclo del cultivo. Sin embargo, el mismo se genera a lo largo de toda la ontogenia como consecuencia del aporte de las distintas estructuras que lo componen (Satorre *et al.*, 2003). El análisis del rendimiento y sus componentes numéricos se explica en la Figura 7.

El rendimiento de grano en trigo es el producto del número de granos por unidad de superficie y el peso individual de los mismos (Abbate *et al.*, 1995). Sin embargo, diferentes autores señalan que el principal atributo que explica los cambios en el rendimiento de trigo a lo largo de los años es el número de granos por unidad de área (NG), debido a variaciones por efectos ambientales (Fischer, 1993; Magrin *et al.*, 1993) y mejoras genéticas en rendimiento (Calderini *et al.*, 1999).

Por lo tanto, un rasgo crítico a considerar para lograr incrementos del rendimiento potencial es el aumento del NG. Este componente del rendimiento, es generado

durante la estación de crecimiento del cultivo y se determina durante un periodo de 20-30 días inmediatamente antes de antesis (Slafer *et al.*, 1996; García, 2008).

La fase de elongación del tallo comprende el periodo entre la iniciación de espiguilla terminal y antesis. En esta fase se ubica un período de rápido crecimiento de la espiga (PRCE) y es crítica para el establecimiento del NG (Fischer, 1983, 1985; Kirby, 1988; Slafer *et al.*, 1994; Miralles y Slafer, 1999).

Existe una relación importante entre el número de flores fértiles (la mayoría formará un grano) y el peso seco de la espiga a antesis (Fischer, 1985; Siddique *et al.*, 1989; Slafer y Andrade, 1989; Calderini *et al.*, 1995; Miralles y Slafer, 1995; Flinthman *et al.*, 1997; Sayre *et al.*, 1997; Miralles *et al.*, 2000; Reynolds *et al.*, 2001, 2005; González *et al.*, 2003, 2005a, b; Serrago *et al.*, 2008).

2.8 Componentes del rendimiento

A lo largo del ciclo del cultivo de trigo, se llevan a cabo una gran cantidad de procesos que se observan a simple vista (cambios externos) y otros que sólo son visibles mediante la disección de la planta.

La etapa reproductiva es muy importante en términos de generación de componentes del rendimiento; durante esta etapa queda definido el número de espigas m^{-2} , el número de granos espiga $^{-1}$, siendo éstos los componentes centrales del número de granos m^{-2} (Slafer *et al.*, 2003; Miralles, 2004), que junto al peso promedio del grano, determinan el rendimiento del cultivo. El número de

granos m^{-2} se define cerca de antesis y el peso del grano durante el período de llenado (Abbate *et al.*, 1994).

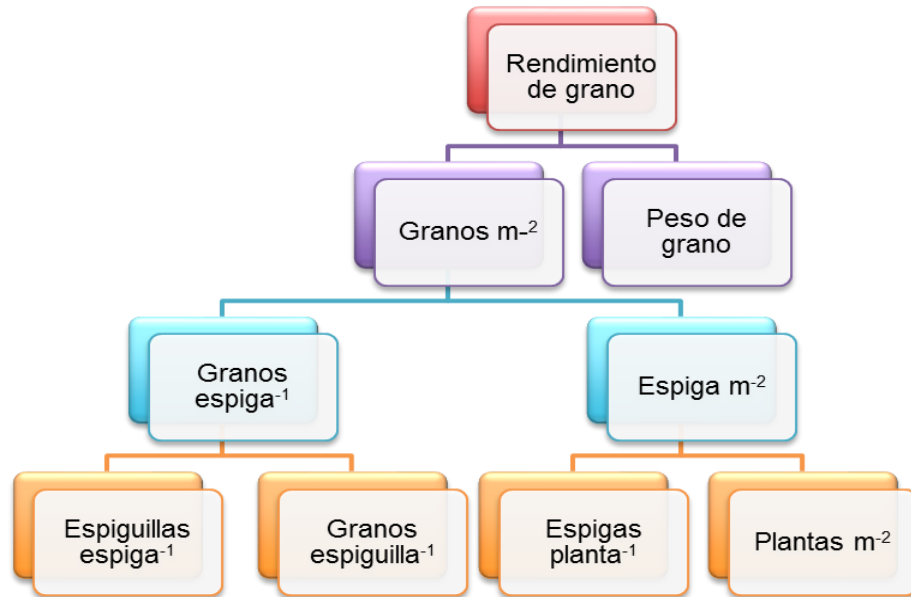


Figura 7. Diagrama de los principales componentes dentro del cual el rendimiento de grano puede ser numéricamente dividido (Slafer *et al.*, 1996).

2.8.1. Número de granos por unidad de superficie

El número de granos por unidad de superficie se establece en la fase reproductiva, que comprende el periodo entre las etapas de iniciación floral y antesis (Slafer *et al.*, 1996). El número de granos m^{-2} depende de la radiación interceptada y de la temperatura que controla la duración del período de crecimiento de las espigas.

2.8.1.1. Número de granos por espiga

El número de granos por espiga se conforma en función del número de espiguillas por espiga (definido entre el estado de doble lomo y la aparición de la espiguilla terminal) y del número de granos por espiguilla (que se define entre el estado de espiguilla terminal y el cuaje de los granos) (Kiniry y Ritchie, 1985; Schussler y Westgate, 1991).

El número de granos por espiga se determina en postfloración. El desarrollo inicial del grano depende del suministro de asimilados a la espiga durante dicha etapa (Kiniry y Ritchie, 1985; Schussler y Westgate, 1991). Por lo tanto, cuanto mejores sean las condiciones de crecimiento de la planta en postfloración, menor será el porcentaje de aborto y por lo tanto, mayor el número final de granos por espiga (Andrade *et al.*, 1996). Por consiguiente, el número de granos por espiga esta función de la supervivencia de espiguillas y de granos, más que del número total de espiguillas diferenciadas (Andrade *et al.*, 1996).

La falta de agua durante el período de crecimiento de la espiga, incrementa la mortalidad de flores (Fischer, 1973) y origina una menor eficiencia de conversión de la radiación interceptada en materia seca (Whitfield y Smith, 1989), lo cual contribuye a reducir el número de granos m^{-2} (Abbate *et al.*, 1994).

En este sentido, el cultivo debe estar sano, libre de malezas y bien provisto de agua y nutrimentos, y así favorecer, la interceptación de radiación, la eficiencia de conversión de radiación interceptada en biomasa y la partición de biomasa a estructuras reproductivas durante el periodo de floración (Andrade *et al.*, 1996).

2.8.1.2. Número de espigas por unidad de superficie

El número de espigas por m² resulta de la combinación del número de plantas por m² y del número de espigas por planta. El número de plantas por m² está determinado por la densidad de siembra (definido desde la siembra hasta la emergencia). Asimismo, influyen factores como la fertilización nitrogenada y la disponibilidad de agua (Hay y Walker, 1989).

El número de espigas por planta, que se determina durante el período de iniciación floral a antesis, está influenciado por el número de tallos producidos y la proporción de éstos que dan origen a una espiga; siendo ésta última, el resultado de la competencia por un suministro limitado de asimilados dentro de la planta y por la intercepción de la luz dentro del cultivo (De la Morena *et al.*, 1986).

2.8.2. Peso del grano

El peso de grano resulta del efecto combinado que ejercen la duración del período efectivo de llenado y la tasa de llenado (Andrade *et al.*, 1996). En las primeras dos semanas posteriores a la floración, el grano fecundado acumula poco peso; asimismo, condiciones desfavorables durante esta etapa reducen el número de células, disminuyendo el tamaño potencial del grano (Frey, 1981; Reddy y Daynard, 1983; Jones *et al.*, 1985).

La duración efectiva del período de llenado se define como el cociente entre el peso final del grano y la tasa de crecimiento de los granos durante la etapa lineal de acumulación de peso (Andrade *et al.*, 1996).

La duración del período de llenado está en función de la fuente fotosintética disponible y de la temperatura que determina la tasa con que dicha fuente es demandada (Cirilo y Andrade, 1996). Si la provisión de fotoasimilados durante el período de llenado de grano es baja, la cual puede ocurrir por baja radiación incidente, por baja interceptación debida a la disminución del área foliar, se reduce la duración del período de llenado (Andrade *et al.*, 1996).

Cuando la fuente de fotoasimilados no es limitante durante el llenado de grano, la duración del período efectivo de llenado es función de la temperatura. Este factor determina, a través de su efecto sobre la tasa de crecimiento del grano, el tiempo en que el peso máximo es alcanzado (Brown, 1976; Kiniry y Bonhomme, 1991).

Las altas temperaturas durante el período de llenado, reducen el peso potencial del grano (Fischer y Hilleris-Lambers, 1978) y la duración del período de llenado (Wiegand y Cuellar, 1981), pero incrementan la tasa diaria de llenado (aumento en peso por grano por día) (Sofield *et al.*, 1974), produciendo un efecto compensatorio bajo ciertas circunstancias.

III. JUSTIFICACIÓN

El consumo de los fertilizantes es uno de los indicadores claves de la intensificación de la agricultura y del desarrollo agrícola, donde el nutrimento más utilizado es el nitrógeno, ya que éste afecta directamente los rendimientos y la calidad de los productos.

La preocupación del efecto del nitrógeno sobre el equilibrio ambiental es un tema de vital importancia en los últimos tiempos; debido a que el proceso de lixiviación de este elemento puede causar la contaminación del agua subterránea, la cual se refleja en efectos dañinos a la salud del ser humano. Así mismo, al perderse el nitrógeno por volatilización en forma de gas amoníaco, contribuye en la emisión de gases de efecto invernadero.

Otro efecto del manejo inadecuado de la fertilización nitrogenada se manifiesta en el impacto agronómico, el cual se expresa en los bajos rendimientos obtenidos como consecuencia de la volatilización y lixiviación de los fertilizantes nitrogenados aplicados al cultivo. Asimismo, implica un impacto económico, elevando los costos de producción.

Sin embargo, existen estrategias de manejo para mejorar el uso del nitrógeno, las cuales pueden ser el uso de fertilizantes de lenta liberación (urea estabilizada), o bien dosificar el nitrógeno en distintas etapas fenológicas.

IV. HIPÓTESIS

- i. El momento de aplicación del nitrógeno afecta diferencialmente los componentes ecofisiológicos (radiación interceptada, eficiencia en el uso de la radiación, producción de biomasa) del rendimiento de grano en trigo.
- ii. Los cultivares de trigo difieren en los componentes ecofisiológicos que determinan el rendimiento de grano en trigo.
- iii. Los cultivares evaluados responderán de manera diferente al variar la dosis y la estrategia de aplicación del nitrógeno.

V. OBJETIVOS

GENERAL:

Evaluar la eficiencia en el uso de la radiación, biomasa y rendimiento de grano en tres cultivares de trigo en función de dos niveles de nitrógeno fraccionado en cuatro etapas fenológicas.

ESPECÍFICOS:

- i. Evaluar el efecto de la estrategia de aplicación de N sobre los atributos ecofisiológicos que determinan el rendimiento de grano en trigo.
- ii. Evaluar los cambios en los componentes ecofisiológicos determinantes del rendimiento de tres cultivares liberados en diferentes décadas.
- iii. Estudiar la interacción cultivares x estrategia de aplicación de N sobre los determinantes fisiológicos del rendimiento de grano de trigo.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 2011, en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México (19° 15' 33" N, 99° 39' 38" O y 2640 msnm). El tipo de suelo es vertisol pélico con una textura franco-arcillosa, con características de alta capacidad de retención de agua y lento drenaje (USDA, 2000).

El clima predominante en la región es C (w2)(w)b(i) que corresponde al templado subhúmedo con lluvias en verano y poca oscilación térmica, la temperatura media anual es de 12.8 °C y una precipitación media anual de 900 mm (García, 1988). Los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica (Weather Monitor II, Davis Instruments Corp., USA), ubicada aproximadamente a 300 m del experimento.

6.2. Descripción general del experimento

Cada unidad experimental consistió de 6 hileras de 3 m de largo y 0.20 m de separación (3.6 m²), con una densidad de 350 semillas por m². La parcela experimental útil estuvo constituida por los cuatro surcos centrales.

Para garantizar la densidad mencionada y buena uniformidad de las plantas, la siembra se realizó colocando una semilla a una distancia equidistante de 1.5 cm,

mediante la utilización de cintas de papel biodegradable de igual longitud a la de los surcos.

Las cintas fueron colocadas en cada surco y cubiertas con tierra, compactando ligeramente el suelo. Para la fertilización del suelo se manejó la dosis de P-K (30-60 Kg ha⁻¹) al momento de la siembra, utilizando superfosfato de calcio triple (46%, P₂O₅) y cloruro de potasio (60% de K₂O). Los experimentos se mantuvieron libres de malezas mediante control manual; asimismo, se realizaron dos aplicaciones del fungicida Tilt 25 EC (Propiconazole) para el control de la roya amarilla (*Puccinia* sp.) .

6.3. Factores de estudio

Se evaluaron los cultivares (cvs.) de trigo: Salamanca S-75 (liberación antigua), Romoga F-96 (liberación intermedia) y Tollocan F-2005 (reciente liberación), con dos niveles de nitrógeno (N): 100 y 200 Kg N ha⁻¹, utilizando como fuente urea (46%), y tres estrategias de aplicación: 1 (50% N en la siembra + 50% en amacollamiento), 2 (50% N en la siembra + 50% en espiguilla terminal), 3 (50% N en la siembra + 50% en hoja bandera) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de la estrategia, etapa de aplicación y fertilizante total para tres genotipos de trigo.

Estrategia	Etapa de aplicación				Fertilizante Total kg N ha ⁻¹	
	S*	Amac.	ET	HB	Dosis Alta	Dosis Baja
1	50%	50%			200	100
2	50%		50%		200	100
3	50%			50%	200	100

*S = siembra; Amac. = amacollamiento; ET = espiguilla terminal; HB = hoja bandera.

6.4. Variables de estudio

6.4.1. Fenología del cultivo

Durante la estación de crecimiento del cultivo se determinaron las siguientes etapas fenológicas: emergencia (Eme), hoja bandera (HB), antesis (Ant), grano lechoso masoso (GLM) y madurez fisiológica (MF), las cuales fueron determinadas visualmente cuando el 50% de las plantas en la parcela habían alcanzado la etapa indicada, utilizando la escala de Zadoks *et al.*, (1974).

Se identificó mediante microscopía (microscopio estereoscópico Leica MZ6, Leica Microsystems, Germany) la formación de doble lomo (DL) y espiguilla terminal (ET) (Figura 8) mediante observaciones de los ápices de las plantas cosechadas al azar dos veces por semana de cada unidad experimental (Kirby y Appleyard, 1984).



Figura 8. Estadío de espiguilla terminal en trigo observado a través del uso de microscopía.

La determinación de la madurez fisiológica (MF) se llevó a cabo marcando al momento de antesis 20 espigas de vástago principal por parcela, y dos veces por semana se registró el peso seco de cinco granos basales de cinco espiguillas centrales de la espiga, a partir de los siete días posteriores a la antesis. La MF fue estimada mediante una regresión bilineal entre el peso seco del grano y el tiempo térmico desde antesis (Miralles y Slafer, 1995) utilizando la siguiente ecuación:

$$Y = a + bx(x \leq c) + bc(x > c) \quad (1)$$

Donde: Y es el peso seco del grano, a es el intercepto, b es la tasa de llenado de grano, x es el tiempo térmico después de antesis ($^{\circ}\text{Cd}^{-1}$) y c es la duración total de llenado de grano o madurez fisiológica.

Las etapas de desarrollo consideradas fueran expresadas en tiempo térmico, usando como temperatura base 0°C (Gallagher, 1979, Baker y Gallagher, 1983), y

utilizando las temperaturas medias mensuales obtenidas de la estación meteorológica (Weather Monitor II, Davis Instruments Corp., USA).

6.4.2. Determinación de la biomasa aérea

La biomasa aérea fue determinada mediante muestreos destructivos de 30 cm de longitud de dos surcos centrales, en los estadios de doble lomo (DL), espiguilla terminal (ET), hoja bandera expandida (HB), antesis (Ant) y GLM, y de 1 m de longitud para MF. Las muestras fueron separadas en los estratos de vástagos principales y macollos. De cada muestra se tomaron 10 plantas al azar, a las cuales se les determinó el área foliar (considerando únicamente el área verde de las hojas) con un integrador de área foliar (LI-COR, modelo LI-3000A, USA), y se determinó el índice de área foliar (IAF).

El peso seco de hojas (verdes o muertas), tallos y espigas (cuando estuvieron presentes) de cada estrato fue registrado después de secar las muestras en una estufa de aire forzado a 70°C durante 72 horas hasta alcanzar peso constante.

6.4.3. Radiación interceptada

La radiación incidente (I_0) y transmitida (I_t) en cada una de las parcelas se registró periódicamente desde la emergencia del cultivo hasta madurez fisiológica, utilizando un Ceptómetro lineal (Cavadevices Inc, Argentina) en días despejados y al medio día solar ($\pm 1h$). Para registrar el porcentaje de radiación interceptada por el dosel del cultivo, el sensor se colocó diagonalmente entre los dos surcos centrales de cada parcela, midiéndose la radiación en tres diferentes posiciones (izquierda, centro y derecha) y siguiendo el perfil de las hojas senescidas, utilizando el valor promedio de dichas mediciones como el valor de la radiación transmitida por el dosel del cultivo (Slafer *et al.*, 1990).

La radiación incidente fue medida en cada parcela, colocando el sensor por arriba del dosel del cultivo (cuarta posición); la proporción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (%RFAI) por el cultivo fue calculada como $[(I_0 - I_t)/I_0] \times 100$. El %RFAI determinado en diferentes momentos fue relacionado con el número de días desde emergencia y los datos fueron ajustados mediante una función sigmoidea, descrita a continuación:

$$\%RFAI = \frac{a+b}{(1-\exp(-\frac{x-c}{d}))} \quad (2)$$

Donde: x es el número de días a emergencia del cultivo (para %RFAI pre-antesis) o el número de días posterior a la antesis (para %RFAI en post-antesis), y a , b , c y d son constantes del modelo.

6.4.4. Eficiencia en el uso de la radiación

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR; g MJ^{-1}) para los periodos de emergencia a madurez fisiológica ($\text{EUR}_{\text{ciclo}}$) y de emergencia a antesis ($\text{EUR}_{\text{pre-antesis}}$), se estimó mediante modelos de regresión lineal simple con intercepto forzado al origen [$Y=b(x)$]; mientras que para el periodo de antesis a madurez fisiológica la EUR se estimó como el cociente entre la biomasa acumulada desde antesis a madurez fisiológica y la radiación interceptada acumulada (RIA, MJ m^{-2}) post-antesis. Para ambos casos, la EUR estuvo representada como la pendiente (b) de la relación lineal entre la biomasa (Y) y la RFAI (X).

6.4.5. Determinación del número de flores fértiles

Se determinó el número de flores fértiles por espiga en el muestreo de biomasa a antesis, seleccionando en forma aleatoria cinco espigas de vástagos principales de igual número de espiguillas.

Las espiguillas se observaron utilizando un microscopio estereoscópico (Leica MZ6, Leica Microsystems, Germany) y se registró el número de flores que se encontraban según la escala de Waddington *et al.*, (1983) en un estadio mayor a 9.5, es decir, cuando éstas contaban con el ovario desarrollado, el estigma se observó bifido completo y las anteras verdes y turgentes. Posteriormente las espigas fueron secadas en una estufa de aire forzado a 70°C durante 72 h, hasta peso constante, y se registró el peso seco.

6.4.6. Rendimiento de grano y sus componentes

Cuando las plantas alcanzaron la madurez fisiológica se realizó la cosecha. En cada parcela, las plantas de dos surcos centrales de 100 cm de longitud fueron cosechadas manualmente y separadas en tallos y espigas de vástagos principales y macollos. Cada uno de los estratos fue secado en una estufa de aire forzado a 70°C durante 72 horas hasta peso constante.

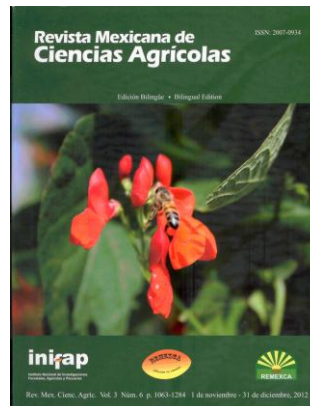
Se determinó el rendimiento de la muestra (el que se llevó a unidad de área), el número de granos por unidad de área, el peso promedio de los granos, el número de espigas por m², el número de granos por espiga, el número de espiguillas por espiga y el número de granos por espiguilla (vástago principal). Para determinar las tres últimas variables, se seleccionaron aleatoriamente cinco espigas de vástago principal.

6.4.7. Análisis estadístico

Los datos del experimento fueron sometidos a análisis de varianza, cuando la prueba de F resultó significativa se realizó la prueba de medias, utilizando la diferencia significativa honesta (DSH) a un nivel de significancia del 5%, utilizando el software SAS (SAS Institute, 2002). Las relaciones entre variables se obtuvieron mediante análisis de regresión y se ajustaron a modelos lineales, bilineales o sigmoideos (TableCurve 2D, Jandel Scientific, AISN Software, 1992).

VII. RESULTADOS

7.1. DETERMINANTES ECOFISIOLÓGICOS DEL RENDIMIENTO EN TRES CULTIVARES DE TRIGO EN FUNCIÓN A LA DOSIS Y FRACCIONAMIENTO DE NITRÓGENO



Texcoco, Estado de México, 13 de noviembre de 2012
Ref.: 175-12

ING. TANIA LILIBETH VILLAFÑA ARROYO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
PRESENTE:

Por este medio le agradezco y acuso de recibido su artículo "Determinantes ecofisiológicos del rendimiento en tres cultivares de trigo en función a la dosis y fraccionamiento de nitrógeno", cuyos autores(as) son: Tania Lilibeth Villafña Arroyo, Edgar Jesús Morales Rosales, Gaspar Estrada Campuzano y Carlos Gustavo Martínez Rueda, que fue enviado para su posible publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Le notificamos que el autor(a) principal y los coautores(as), no podrán alterarse y quedaran como se envía en esta versión.

Asimismo, me permito informarle que su contribución será sometida a revisión técnica por los árbitros que se designen en caso de ser aceptado, se le notificará sobre las observaciones correspondientes.

Agradezco su colaboración y le envío un cordial saludo.

Atentamente



DRA. DORA MA. SANGERMAN-JARQUÍN
EDITORA EN JEFA DE LA REVISTA
MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

c.c.p. * Archivo
DMSJ/mdpg

Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13.5. Coatlínchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. y Fax: 01 595 9212681

**DETERMINANTES ECOFISIOLÓGICOS DEL RENDIMIENTO EN TRES
CULTIVARES DE TRIGO EN FUNCIÓN A LA DOSIS Y FRACCIONAMIENTO
DE NITRÓGENO**

**YIELD ECOPHYSIOLOGICAL DETERMINANTS IN THREE CULTIVARS OF
WHEAT IN FUNCTION TO THE DOSE AND FRACTIONATION NITROGEN**

Villafaña A., T. L.^{1*}; Morales R., E. J.¹; Estrada C., G.^{1*}; Martínez R., C. G.¹

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus

Universitario “El Cerrillo” Toluca, México. Tel. (722) 2 96 55 29 ext. 142

Email: gestradac@uaemex.mx

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar la biomasa, rendimiento de grano, índice de cosecha (IC) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) en tres cultivares de trigo bajo dos niveles de nitrógeno en tres momentos de aplicación (estrategias). El experimento se estableció bajo condiciones de temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 2011 en Toluca, México. Se evaluaron los genotipos de trigo: Salamanca S-75, Romoga F-96 y Tollocan F-2005 con dos niveles de N (100 y 200 kg N ha⁻¹) con tres estrategias de aplicación: 1 (50% de N en la siembra y 50% en amacollamiento); 2 (50% de N en la siembra y 50% en espiguilla terminal); 3 (50% de N en la siembra y 50% en hoja bandera). Los datos fueron analizados en un diseño estadístico de parcelas divididas. Cuando las pruebas de F fueron significativas se realizó la diferencia significativa honesta (DSH). Las relaciones entre variables se obtuvieron mediante análisis de regresión y se ajustaron a modelos lineales, bilineales o sigmoideos. Entre los cultivares, Tollocan F-2005 mostró

mayor biomasa, rendimiento e IC. Con 200 kg N ha⁻¹ se incrementaron en promedio los valores de biomasa, rendimiento y EUR. Se observó una respuesta positiva en las estrategias 2 y 3; sin embargo, el efecto de la estrategia depende del cultivar y dosis de fertilización. Tollocan F-2005 alcanzó el máximo rendimiento de grano (695.61 g m⁻²) cuando se suministraron 200 kg N ha⁻¹ aplicando 50% en la siembra y 50% en hoja bandera.

Palabras clave: *Triticum spp.* estrategia de aplicación, índice de cosecha, eficiencia en el uso de la radiación.

ABSTRACT

The objective of the research was to assess the biomass, grain yield, harvest index (HI) and radiation use efficiency (RUE) on three wheat cultivars under two nitrogen levels in three application times (strategies). The experiment was established under rainfed conditions during the season spring-summer 2011 in Toluca, Mexico. We evaluated wheat genotypes: Salamanca S-75, Romoga F-96 and Tollocan F-2005 with two levels of N (100 and 200 kg N ha⁻¹) with three implementation strategies: 1 (50% of N in the sowing and 50% at tillering), 2 (50% of N in the sowing and 50% at terminal spikelet), 3 (50% of N in the sowing and 50% in the flag leaf). The data were analyzed in a split plot statistical design. When F tests were significant was honest significant difference (HSD). Relations between variables were obtained by regression analysis and were adjusted to linear, bilinear or sigmoid models. Among the cultivars, Tollocan F-2005 showed higher biomass, yield and HI. With 200 kg N ha⁻¹ increased average biomass values, grain yield and EUR. There was a positive response in strategies 2 and 3; however, the effect of the implementation strategy

depends on cultivar and fertilization rates. Tollocan F-2005 reached the highest grain yield (695.61 g m^{-2}) when supplied 200 kg N ha^{-1} applied 50% in the sowing and 50% in the flag leaf.

Keywords: *Triticum spp.* implementation strategy, harvest index, radiation use efficiency.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las plantas depende de la habilidad del dosel vegetal para capturar y utilizar la radiación solar, CO_2 , agua y elementos minerales. Existe una relación estrecha entre la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y su crecimiento (Bonhomme, 2000). La radiación interceptada acumulada (RIA) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) son los principales determinantes del crecimiento y de la producción de biomasa vegetal (Gallagher y Biscoe, 1978). La EUR, representa la cantidad de materia seca y/o rendimiento alcanzado por unidad de radiación interceptada por el cultivo, de tal forma que la pendiente de la relación lineal entre ambas variables se conoce como EUR (Hunt *et al.*, 1990).

Por otro lado, el rendimiento de grano en cereales, es el resultado final del crecimiento del cultivo y los procesos de desarrollo que ocurren en toda la estación de crecimiento (Slafer, 2003). Durante los últimos años, el rendimiento mundial de trigo se ha incrementado considerablemente, pasando de 222 millones de toneladas en 1961 a 653 en 2010 (FAO, 2012). En este sentido, el rendimiento de los cultivares de trigo de reciente liberación en nuestro país se ha incrementado significativamente, reportándose a principios de los 60's una media nacional de 1.7 t ha^{-1} y en el 2010 de 5.4 t ha^{-1} (FAO, 2012).

El aumento significativo en el rendimiento de grano se debe a la utilización de nuevas técnicas de manejo, y a la comprensión de los componentes fisiológicos que determinan el crecimiento y rendimiento de trigo. Las prácticas de manejo agronómico que impactan la producción de materia seca y rendimiento de grano, y la disponibilidad de nitrógeno que influye en la tasa de crecimiento de este cereal son herramientas que nos permite comparar el comportamiento de distintos cultivares, estrategias de manejo, niveles de fertilización y condiciones ambientales (Monteith, 1977; Otegui *et al.*, 1995; D'Andrea *et al.*, 2008). Muchos estudios han mostrado que la aplicación fraccionada del fertilizante nitrogenado induce una mayor recuperación de nitrógeno por la planta y rendimientos más altos comparados con la aplicación en un solo momento. Sin embargo, la proporción del fraccionamiento debe ser determinada localmente teniendo en cuenta el estado inicial de fertilidad del suelo. En general, bajo las condiciones de temporal una pequeña dosis de nitrógeno (no superior a 50 kg N ha^{-1}) debería ser utilizada en la siembra y el fertilizante adicional podría aplicarse en cobertera al final del amacollamiento o al inicio del encañe (López y Muñoz, 2012).

El objetivo de la investigación fue evaluar la biomasa, rendimiento de grano, índice de cosecha (IC) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR) en tres cultivares de trigo bajo dos niveles de nitrógeno en tres momentos de aplicación (estrategias).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se estableció bajo condiciones de temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 2011 en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de

la Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México (19° 15' 33'' N, 99° 39' 38'' O y 2640 msnm). El tipo de suelo es vertisol pélico con una textura franco-arcillosa (USDA, 2000). El clima predominante en la región es C (w2)(w)b(i) que corresponde al templado subhúmedo con lluvias en verano y poca oscilación térmica, la temperatura media anual es de 12.8 °C y una precipitación media anual de 900 mm (García, 1988).

Factores de estudio y diseño experimental

Se evaluaron los cultivares (cvs.) de trigo: Salamanca S-75 (liberación antigua), Romoga F-96 (liberación intermedia) y Tollocan F-2005 (liberación reciente), con dos niveles de nitrógeno (N): 100 y 200 kg N ha⁻¹, utilizando como fuente urea (46%), aplicado en forma fraccionada en tres diferentes momentos del cultivo (estrategias). La aplicación fraccionada del nutrimento en algunas de las etapas fenológicas constituye una estrategia. En el Cuadro 1 se puede observar la composición de cada una de las estrategias evaluadas. Cada estrategia, etapa de aplicación y fertilizante total, se suministro a cada uno de los cultivares bajo estudio.

Cuadro 1. Descripción de la estrategia, etapa de aplicación y fertilizante total para tres genotipos de trigo.

Estrategia	Etapa de aplicación			Fertilizante Total kg N ha ⁻¹		
	S*	Amac.	ET	HB	Dosis Alta	Dosis Baja
1	50%	50%			200	100
2	50%		50%		200	100
3	50%			50%	200	100

*S = siembra; Amac. = amacollamiento; ET = espiguilla terminal; HB = hoja bandera

Cada unidad experimental consistió de 6 hileras de 3 m de largo y 0.20 m de separación (3.6 m^2) con una densidad de 350 semillas m^{-2} . La parcela experimental útil estuvo conformada por los cuatro surcos centrales.

VARIABLES EVALUADAS

Durante la estación de crecimiento del cultivo se registraron las siguientes etapas fenológicas: emergencia (Eme.), amacollamiento (Amac.), espiguilla terminal (ET), hoja bandera (HB), antesis (Ant.) y madurez fisiológica (MF) las cuales fueron determinadas visualmente cuando el 50% de las plantas en la parcela habían alcanzado la etapa indicada, utilizando la escala de Zadoks *et al.*, (1974). La ET se identificó por microscopía (microscopio estereoscópico Leica MZ6, Leica Microsystems, Germany) mediante observaciones de los ápices de las plantas cosechadas al azar dos veces por semana de cada unidad experimental (Kirby y Appleyard, 1984).

La cosecha se realizó cuando los cultivares alcanzaron la madurez fisiológica (MF); se cosecharon las plantas que ocuparon 1m de cada uno de los dos surcos centrales de cada unidad experimental. Las plantas fueron secadas en una estufa de aire forzado a 70°C durante 72 h, hasta alcanzar peso constante.

La radiación incidente (I_0) y transmitida (I_t) en cada una de las parcelas se registró periódicamente desde la emergencia del cultivo hasta madurez fisiológica, utilizando para ello un Ceptómetro lineal (Cavadevices Inc, Argentina) en días despejados y al medio día solar ($\pm 1\text{h}$). Para registrar el porcentaje de radiación interceptada por el dosel del cultivo, el sensor se colocó diagonalmente entre los dos surcos centrales de cada parcela, midiéndose la radiación en tres diferentes posiciones (izquierda, centro y derecha) y

siguiendo el perfil de las hojas senescidas, utilizando el valor promedio de dichas mediciones como el valor de la radiación transmitida por el dosel del cultivo (Slafer *et al.*, 1990). La radiación incidente fue estimada en cada parcela, colocando el sensor por arriba del dosel del cultivo (cuarta posición); la proporción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (%RFAI) por el cultivo fue calculada como $[(I_0 - I_t)/I_0] \times 100$. El %RFAI determinado en diferentes momentos fue relacionado con el número de días desde emergencia y los datos fueron ajustados mediante una función sigmoidea, descrita a continuación:

$$\%RFAI = \frac{a + b}{(1 - \exp(-\frac{x - c}{d}))}$$

Donde: x es el número de días a emergencia del cultivo (para %RFAI pre-antesis) o el número de días posterior a la antesis (para %RFAI en post-antesis), y a , b , c y d son constantes del modelo.

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR, $g MJ^{-1}$) para los periodos de emergencia a madurez fisiológica (EUR_{ciclo}) y de emergencia a antesis (EUR_{pre-antesis}), se estimó mediante modelos de regresión lineal simple con intercepto forzado al origen [$Y=b(x)$]; mientras que para el periodo de antesis a madurez fisiológica la EUR se estimó como el cociente entre la biomasa acumulada desde antesis a madurez fisiológica y la radiación interceptada acumulada (RIA, $MJ m^{-2}$) post-antesis. Para ambos casos, la EUR estuvo representada como la pendiente (b) de la relación lineal entre la biomasa (Y) y la RFAI (X).

El rendimiento de grano se obtuvo contando el número de granos y el peso individual de los mismos por metro cuadrado y se expresó en $g m^{-2}$.

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza, para un diseño experimental de parcelas divididas y cuando las pruebas de F resultaron significativas se realizó la prueba de comparación de medias, utilizando la diferencia significativa honesta (DSH) a un nivel de significancia del 5%, utilizando el software SAS (SAS Institute, 2002). Las relaciones entre variables se obtuvieron mediante análisis de regresión y se ajustaron a modelos lineales, bilineales o sigmoideos (TableCurve 2D, Jandel Scientific, AISN Software, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de grano

Para un mejor entendimiento de los determinantes fisiológicos del rendimiento, Slafer *et al.* (1994) y Feil (1992), han sugerido la evaluación agronómica de cultivares liberados en distintas épocas para proporcionar mejores enfoques para su uso como criterio de selección y para recomendarlos a los distintos productores de cereales de grano pequeño.

En nuestra investigación, el rendimiento fue significativamente diferente ($P \leq 0.01$) entre cultivares, dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación, variando de 3.9 a 7.6 t ha⁻¹. Tollocan F-2005 fue el cultivar que respondió positivamente al incrementar el fertilizante nitrogenado. Con 200 kg N ha⁻¹ este cultivar presentó el mayor rendimiento de grano (Fig. 1a). Resultados similares fueron reportados por Siddique *et al.* (1989), quienes observaron que el cultivar moderno de trigo Kulin liberado en 1986 tuvo el rendimiento e índice de cosecha más alto, 63 y 48% más que el cv. antiguo Purple Straw liberado en 1860.

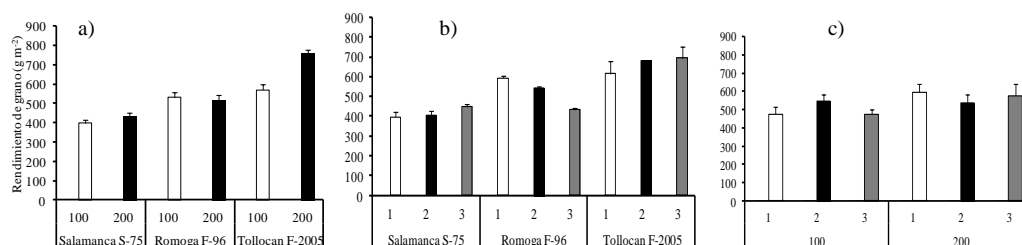


Figura 1. Relaciones entre el rendimiento de grano y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c), para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México. Estrategias: 1 (S y Amac.), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

Diversos investigadores como Perry y D'Antuono (1989); Silvey (1978); Austin *et al.* (1980) y Dalrymple (1980) realizaron evaluaciones históricas de cultivares de trigo, ellos sugirieron que los cambios genéticos han incrementado el rendimiento de grano. Sin embargo, Campillo *et al.* (2007) en un experimento de manejo y uso de fertilizante realizado en trigo, reportaron que la dosis de N afectó significativamente ($P < 0.05$) el rendimiento de grano en el cv. Dollinco-INIA, observando que los rendimientos aumentaron en función de la dosis de N, fluctuando entre 3.1 (testigo sin N) y 10.63 t ha⁻¹ (300 kg N ha⁻¹).

Respecto a Salamanca S-75, se encontró el menor rendimiento, mientras que Romoga F-96 tuvo rendimiento intermedio, en ambos genotipos no se detectaron diferencias significativas en las dosis de N evaluadas ($p > 0.05$). En este sentido, Lawes, (1977); Austin *et al.* (1980); Stöppler *et al.* (1988), Austin y Ford (1989); Karpenstein-Machan y Scheffer

(1989) reportaron que cultivares modernos y antiguos de trigo, cebada y avena no respondieron diferencialmente al incremento de nitrógeno en el suelo.

Al analizar la interacción cultivar por estrategia de aplicación (Fig.1b), en Salamanca S-75, no se detectaron diferencias significativas entre estrategias de aplicación; en Romoga F-96, se observó que la mejor estrategia para incrementar el rendimiento de grano fue la 1 (50% N en la S + 50% en Amac.) teniendo una producción de grano de 593.49 g m⁻². Tollocan F-2005, mostró una buena respuesta al suministro del fertilizante nitrogenado, destacando la estrategia 3 (50% N en la S + 50% en HB) logrando un rendimiento de 695.61 g m⁻². Lo anterior coincide con Dreccer *et al.* (2000), quienes afirmaron que el rendimiento de grano en trigo se incrementa en función de la dosis de N, con 20 kg N ha⁻¹ obtuvieron 198 g m⁻², mientras que con 110 kg N ha⁻¹ el rendimiento se elevó hasta 580 g m⁻².

La Figura 1c que muestra la interacción dosis de N por estrategia de aplicación, reveló que para la dosis alta (200 kg N ha⁻¹) la mejor estrategia de aplicación fue la 1 ya que en promedio se alcanzaron 594.7 g m⁻² de trigo, lo cual podría estar relacionado con una mayor proliferación de macollos y a la vez una mayor sobrevivencia de los mismos, debido a que la generación y permanencia de estos depende del estatus nutricional (nitrógeno) que tenga el cultivo (Albrizio *et al.*, 2010). En la dosis baja (100 kg N ha⁻¹), la mejor estrategia fue la 2 con un rendimiento promedio de 548.5 g m⁻².

En nuestro estudio el rendimiento de grano fue modificado por la dosis de N y la estrategia de aplicación, en promedio, con 200 kg N ha⁻¹ y aplicando el 50% N en la siembra y 50% en amacollamiento se maximizó la producción de trigo. Resultados parcialmente similares detectó Fisher (1993) quien afirmó que el N suministrado en la fase fenológica de espiguilla

terminal o en amacollamiento, el rendimiento se potencializa. Por otro lado, Dreccer *et al.* (2000) en un experimento donde evaluaron diferentes momentos de aplicación en trigo y colza, encontraron resultados opuestos a nuestro estudio, ya que el rendimiento de grano de ambas especies se incrementó en aplicaciones tardías de nitrógeno (llenado de grano).

Biomasa

En la Figura 2a se aprecia que la producción de biomasa a MF de Tollocan F-2005 con 200 kg N ha⁻¹, fue superior a Salamanca S-75 y Romoga F-96 en 23 y 26 %, respectivamente. Estos resultados confirman lo reportado por Calderini *et al.* (1997), quienes encontraron que los genotipos antiguos (1920-1980) acumularon menos materia seca durante la estación de crecimiento. Asimismo, Austin *et al.* (1989) reportaron que genotipos modernos tuvieron mayor rendimiento biológico (6%) que los genotipos antiguos. Perry y D'Antuono (1989) presentaron evidencia que cultivares australianos antiguos (Purple Straw 1860 y Nabawa 1915) tuvieron valores bajos de acumulación de materia seca en comparación con los genotipos liberados posteriormente. Caso contrario a lo reportado por Slafer *et al.* (1990), los cuales mencionan que la baja producción de biomasa resultó del bajo peso de los tallos y macollos de genotipos modernos, mientras que el peso seco de las espigas fue alto. Por otro lado, Dreccer *et al.* (2000), concluyeron que la producción de materia seca en trigo se incrementó en función del aumento en la dosis de fertilización nitrogenada (541 a 1362 g m⁻²).

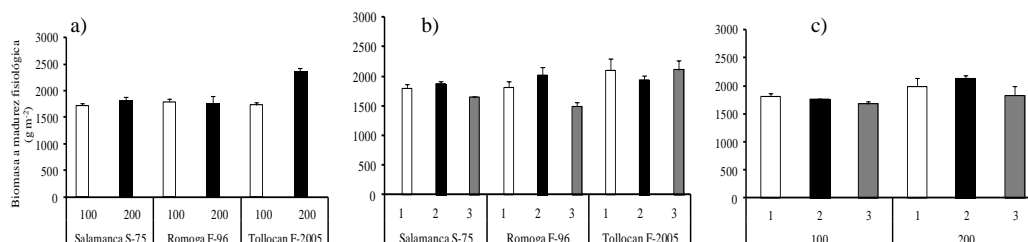


Figura 2. Relaciones entre la biomasa a madurez fisiológica y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c), para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México. Estrategias: 1 (S y Amac.), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

Al evaluar la interacción cultivar por estrategia de aplicación (Fig. 2b), se encontró que para Salamanca S-75 y Romoga F-96, la mejor estrategia fue la 2, mientras que para Tollocan F-2005 la estrategia 3 (50% N en la S + 50% en HB) fue la más adecuada.

Índice de cosecha

La Figura 3a muestra que el índice de cosecha entre los genotipos osciló entre 0.23 y 0.33 correspondiendo el valor más alto a Tollocan F-2005 y el más bajo a Salamanca S-75 ambos con la dosis de 100 kg N ha⁻¹. Lo anterior sugiere que la ganancia en el rendimiento de grano al transcurrir el tiempo se debe a la mejor distribución de la biomasa al grano impactando positivamente el IC (Siddique *et al.*, 1989).

En Tollocan F-2005, el mayor valor de índice de cosecha se observó en la estrategia 2, seguido por Romoga F-96 con la estrategia 1, y Salamanca S-75 con la estrategia 2 (Fig. 3b). En las interacciones cultivar por estrategia de aplicación (Fig.3b), y cultivar por dosis de N (Fig. 3a), se observa una tendencia positiva entre el año de liberación del cultivar y el

índice de cosecha. Este hecho confirma lo escrito por Siddique *et al.*, (1989), quienes indican que el índice de cosecha en trigo se ha incrementado a través del tiempo pasando de 0.25 en cultivares antiguos a 0.38 en cultivares recientes.

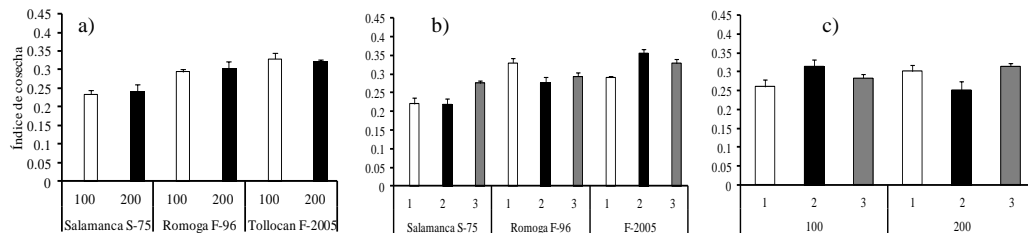


Figura 3. Relaciones entre el índice de cosecha y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c), para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México. Estrategias: 1(S y Amac.), 2(S y ET), 3(S y HB).

En la interacción dosis por estrategia de aplicación (Fig. 3c) las estrategias 1 y 3 respondieron positivamente al incrementar la dosis de N, observándose lo contrario en la estrategia 2. Resultados similares fueron reportados por Dreccer *et al.*, (2000), observando que el índice de cosecha se incrementó significativamente con el aumento de la aplicación de N. Por otro lado, Jain y Kulshrestha (1976); Austin *et al.* (1980) y Sinha *et al.* (1981), encontraron un índice de cosecha alto como consecuencia de un mayor rendimiento de grano en cultivares modernos. Sin embargo, Waddington *et al.* (1987) sugirió que incrementos en el rendimiento de grano en cultivares recientes de trigo (liberados después de 1975 por CIMMYT) fueron en gran medida debido a una mayor producción de biomasa.

En este sentido, Perry y D'Antuono (1989) en un estudio donde evaluaron diversos cultivares australianos, encontraron que la biomasa y rendimiento de grano de genotipos modernos se aumentó significativamente al aumentarse el índice de cosecha.

Radiación interceptada y eficiencia en el uso de la radiación

La productividad de un cultivo depende de la intercepción de la radiación y su conversión en materia seca. Asimismo, plantas bajo estrés no pueden ser beneficiadas por altos niveles de radiación, ya que esto podría causar fotoinhibición (Blum, 1996).

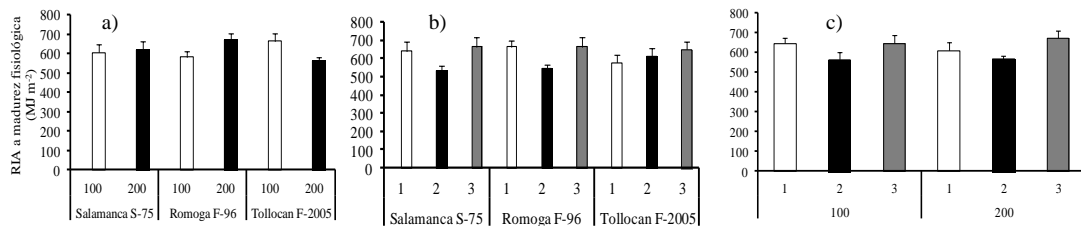


Figura 4. Relaciones entre la radiación interceptada acumulada (RIA) a madurez fisiológica y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c), para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México. Estrategias: 1(S y Amac.), 2(S y ET), 3(S y HB).

La cantidad de radiación interceptada acumulada (RIA) durante el ciclo del cultivo, se alcanzó con la dosis alta de N (200 kg N ha⁻¹) para Salamanca S-75 y Romoga F-96. En Tollocan F-2005 para esta variable, se observó un efecto negativo al aumentar la dosis del

nutrimento; sin embargo, el valor de RIA encontrada en Tollocan F-2005 con la dosis de 100 kg N ha⁻¹ (664.4 MJ m⁻²) fue similar al presentado por Romoga F-96 con la dosis de 200 kg N ha⁻¹ (667.6 MJ m⁻²) (Fig. 4a). Lo anterior fue debido a que los cultivares modernos tienen hojas más erectas, la posición de la hoja es curvada y cuentan con una hoja bandera grande, lo que implica una mejor intercepción de la luz (Donald, 1968; Austin *et al.*, 1976; Borojevic, 1986 y Makunga *et al.*, 1978).

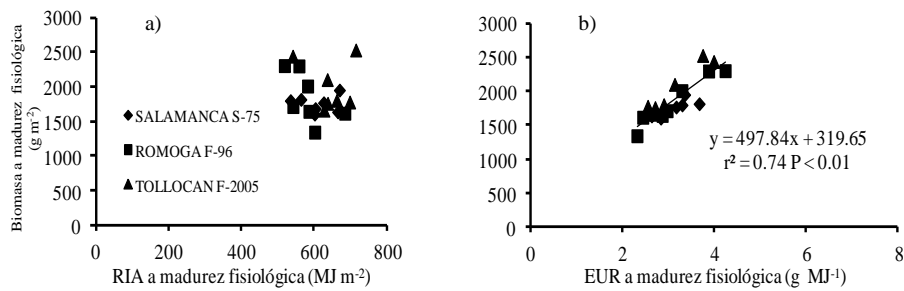


Figura 5. Relaciones entre la biomasa a madurez fisiológica y la radiación interceptada acumulada (RIA) a madurez fisiológica (a), y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a madurez fisiológica (b), para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.

No se observó una relación entre la biomasa a madurez fisiológica y la RIA a madurez fisiológica (Fig. 5a). Sin embargo, entre la biomasa y la EUR a madurez fisiológica se observó una relación lineal ($r^2 = 0.74$), esto indica que las variaciones en biomasa generadas por el cultivar, la dosis de nitrógeno y la estrategia son mejor explicadas por los cambios generados en la EUR, lo cual es coincidente con lo encontrado por Estrada-Campuzano *et al.* (2012), los cuales al evaluar un conjunto de cultivares de triticale y trigo

en condiciones de estrés hídrico encontraron que los cambios en biomasa aérea se explicaron mejor por cambios en la EUR más que por la RIA. En la Figura 5b se observa que la producción de biomasa (2533.13 g m^{-2}) fue superior en Tollocan F-2005, con la dosis 200 kg N ha^{-1} y la estrategia 1, seguido de Romoga F-96 con la dosis alta y la estrategia 2 (2307.40 g m^{-2}). Asimismo se encontró que los valores de EUR fueron superiores en Romoga F-96, con la dosis alta y estrategia 2, y Tollocan F-2005 con la dosis alta y estrategia 3 (4.2 y 4 g MJ^{-1} , respectivamente). Estos resultados confirman lo reportado por Siddique *et al.* (1989), quienes observaron que la eficiencia de conversión de radiación fotosintéticamente activa a materia seca fue ligeramente mejor para cultivares modernos (1984-1986). Albrizio y Steduto (2005) concluyeron que la aplicación de fertilizante nitrogenado incrementó la producción de biomasa y capacidad fotosintética por unidad de radiación interceptada en el cultivo de girasol; es decir, que la disponibilidad de N induce un ligero incremento en la EUR, ya que el N provoca una mayor expansión foliar.

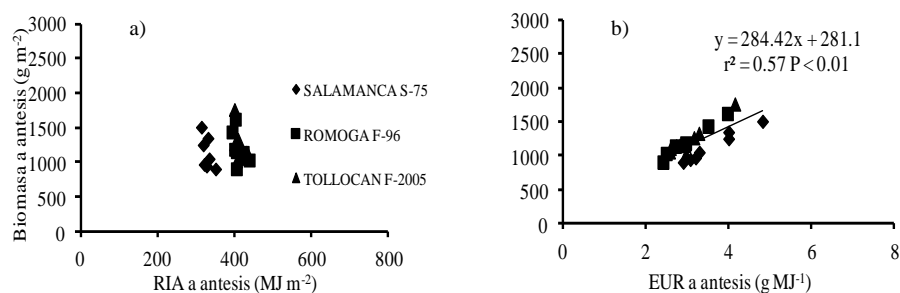


Figura 6. Relaciones entre la biomasa a antesis y la radiación interceptada acumulada (RIA) a antesis (a) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a antesis (b) para tres genotipos de trigo y dos dosis de nitrógeno en Toluca, México.

No se observó una relación entre la biomasa a antesis y la radiación interceptada acumulada (RIA) a antesis (Fig. 6a). Sin embargo, la cantidad RIA fue mayor en el genotipo Tollocan F-2005, mientras que el valor más bajo correspondió a Salamanca S-75. En contraste a lo reportado en esta investigación Calderini *et al.* (1997) encontraron que los cultivares de trigo de reciente liberación (ProINTA Pigue 1989 y ProINTA Oasisd 1990), presentaron los promedios más bajos de RIA a antesis (937 y 933 MJ m⁻², respectivamente). Asimismo, se observó que la biomasa fue mayor en Tollocan F-2005, seguida de Romoga F-96 y finalmente Salamanca S-75, con medias de 1242.10, 1212.60 y 1139.34 g m⁻², respectivamente. Resultados opuestos fueron proporcionados por Calderini *et al.* (1997), quienes encontraron que la biomasa a antesis tendió a ser menor en cultivares de reciente liberación (1989-1990), (1020-1150 gm⁻²) en relación a los materiales antiguos (1200-1680 g m⁻²).

Por otro lado, la Figura 6b revela una relación positiva ($r^2= 0.57$) entre biomasa y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a antesis. Salamanca S-75 presentó el mayor valor de EUR, seguido de Tollocan F-2005 y Romoga F-96 (con medias de 4.82, 4.15 y 3.97 g MJ⁻¹, respectivamente), con la dosis 200 kg N ha⁻¹. Sin embargo, resultados opuestos fueron presentados por Siddique *et al.* (1989) quienes reportaron valores mayores de EUR en genotipos modernos de trigo Gutha1982 y Kulin 1986, con 2.97 y 2.86 g MJ⁻¹, respectivamente, en relación al cv. antiguo Purple Straw 1860 (2.39 g MJ⁻¹).

CONCLUSIONES

Entre los genotipos evaluados, los resultados mostraron una biomasa, rendimiento e IC superior en Tollocan F-2005. Con la dosis de 200 kg N ha⁻¹ se incrementaron en promedio

los valores de biomasa, rendimiento y EUR. Se observó una respuesta positiva en las estrategias 2 (50% N en la siembra y 50% en espiguilla terminal) y 3 (50% N en la siembra y 50% en la hoja bandera), sin embargo, el efecto de la estrategia de aplicación depende del cultivar y dosis de fertilización. En nuestro estudio, el cultivar de reciente liberación Tolloca F-2005 alcanzó el máximo rendimiento de grano (695.61 g m^{-2}) cuando se suministraron 200 kg N ha^{-1} aplicando 50% N en la siembra y 50% en hoja bandera (estrategia 3).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de México por el apoyo brindado para la realización de este estudio, el cual forma parte del proyecto de investigación “Atributos ecofisiológicos determinantes del rendimiento en trigo y cebada en respuesta a la fertilización nitrogenada” con clave “2860/2010U”.

LITERATURA CITADA

- Albrizio, R. and Steduto, P. 2005. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. I. Radiation use efficiency. Netherlands. *Agricultural and Forest Meteorology*. 130: 254-268.
- Albrizio, R.; Todorovic, M.; Matic, T. and Stellacci M., A. 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. Netherlands. *Field Crops Research*. 115: 179-190.
- Austin B., R.; Edrich A., J. and Hooper E., B. 1976. Some effects of leaf posture on photosynthesis and yield in wheat. UK. *Annals of Applied. Biology*. 83: 425-446.

- Austin B., R.; Bingham, J.; Blackwell D., R.; Evans T., L.; Ford A., M.; Morgan L., C. and Taylor, M. 1980. Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. Canada. *Journal of Agricultural Science*. 94: 675-89.
- Austin B., R. and Ford A., M. 1989. Effects of nitrogen fertilizer on the performance of old and new varieties of winter wheat. Germany. *Vortr. Pflanzenzüchtg*. 16: 307-315.
- Austin B., R.; Ford A., M. and Morgan L., C. 1989. Genetic improvement in the yield of winter wheat: a further evaluation. Canada. *Journal of Agricultural Science*. 112: 295-301.
- Baker K., C. and Gallagher N., J. 1983. The development of winter wheat in the field. 2. The control of primordium initiation rate by temperature and photoperiod. Canada. *Journal of Agricultural Science*. 101: 337-344.
- Blum, A. 1996. Yield Potential and Drought Resistance: Are They Mutually Exclusive? In: *Increasing Yield Potential in Wheat: Breaking the Barriers*. Reynolds, M.P.; Rajaram, S. and McNab, A., (eds.). Mexico, D.F.: CIMMYT. 90-100 pp.
- Bonhomme, R. 2000. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. Netherlands. *Field Crops Research*. 68: 247-252.
- Borojevic, S. 1986. Genetic changes in morphophysiological characters in relation to breeding for increased wheat yield. In: *Genetic Improvement in Yield of Wheat*. Edward L. Smith (ed.). CSSA Spec. Pub. No. 13. 71-85 pp.

- Calderini F., D.; Dreccer F., M.; Slafer A., G. 1997. Consequences of breeding on biomass, radiation interception and radiation-use efficiency in wheat. Netherlands. *Field Crops Research*. 52: 271-281.
- Campillo R., R; Jobet F, C. y Undurraga D., P. 2007. Optimización de la fertilización nitrogenada para trigo de alto potencial de rendimiento en andisoles de la región de la Araucanía, Chile. Chile. *Agricultura técnica*. 67: 281-291.
- Dalrymple G., D. 1980. Development and spread of semi-dwarf varieties of wheat and rice in the United States: an international perspective. U.S. Dept. Agric., Washington, D.C., U.S.A. 147 pp. (Agricultural Economic Report No. 455).
- D'Andrea E., K.; Otegui E., M. and Cirilo G., A. 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. Netherlands. *Field Crops Research*. 105: 228-239.
- Donald M., C. 1968. The breeding of crop ideotypes. Netherlands. *Euphytica*. 17: 385-403.
- Dreccer F., M.; Schapendonk, A.H.C.M.; Slafer A., G. and Rabbinge, R. 2000. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. Netherlands. *Plant and Soil*. 220: 189-205.
- FAO (2012) FAOSTAT, FAO statistical databases – agriculture (available at <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>) (fecha de acceso 12/09/2012).
- Estrada-Campuzano, G.; Miralles J., D. and Slafer A., G. 2012. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. Netherlands. *Field Crops Research*. 128: 167-179.

- Feil, B., 1992. Breeding progress in small grain cereals-a comparison of old and modern cultivars. USA and UK. *Plant Breeding*. 108: 1-11.
- Fischer A., R. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. Netherlands. *Field Crops Research*. 33: 57-80.
- Gallagher N., J. 1979. Field studies of cereal leaf growth. I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. USA. *Journal of Experimental Botany*. 30: 625-636.
- Gallagher N., J. and Biscoe V., P. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. Canada. *Journal of Agricultural Science*. 91: 47-60.
- García E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D. F.. 217pp.
- Green F., C. 1989. Genotypic differences in the growth of *Triticum aestivum* in relation to absorbed solar radiation. Netherlands. *Field Crops Research*. 19: 285-295.
- Jain K., H. and Kulshrestha P., V. 1976. Dwarfing genes and breeding for yield in bread wheat. Z. Germany. *Pflanzenzüchtg*. 76: 102-112.
- Karpenstein-Machan, M. und Scheffer, K. 1989. Der Werdegang unserer Weizensorten dargestellt anhand der Erträge und Ertragsaufbaus von Sorten ab 1921 bis zu den heutigen modernen Sorten. Germany. *Angewandte Botanik*. 63: 417-427.
- Lawes A., D. 1977. Yield improvement in spring oats. USA. *Journal of Agricultural Science Cambridge*. 89: 751-757.

- López B, L.; Muñoz R., V.; Fernández G., P.; Redondo, R. y López-Bellido G., R.J. 2012. Respuesta del trigo a la aplicación fraccionada del nitrógeno fertilizante. España. *Vida rural*. 349: 32-37.
- Loss P., S. and Siddique M, K.H. 1994. Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environments. USA. *Advances in Agronomy*. 52: 229-276.
- Makunga D., O.H.; Pearman, I.; Thomas M., S. and Thorne N., G. 1978. Distribution of photosynthate produced before and after anthesis in tall and semi-dwarf winter wheat, as affected by nitrogen fertilizer. UK. *Annals of Applied. Biology*. 88: 429-437.
- Miralles J., D.; Slafer A., G. 1995. Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. Netherlands. *Field Crops Research*. 43: 55-66.
- Monteith L., J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. London. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Serie B* 281: 277-294.
- Otegui E., M.; Nicolini G., M.; Ruiz A., R. and Dodds, P. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. USA. *Agronomy Journal*. 87: 29-33.
- Perry W., M. and D'Antuono F., M. 1989. Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheats introduced between 1860 and 1982. Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*. 40: 457- 72.

- Reynolds P., M.; van Beem, J.; van Ginkel, M. and Hoisington, D. 1996. Breaking the yield barriers in wheat: a brief summary of the outcomes of an international consultation. In: Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers. Reynolds, M.P.,S. Rajaram, and A. McNab (eds.). CIMMYT, México, D.F: 1-10 pp.
- SAS Institute. 2002. SAS/STAT 9.0 User's guide. SAS Inst., Cary, NC.
- Siddique M, K.H.; Belford K., R.; Perry W., M. and Tennant, D. 1989. Growth, Development and Light Interception of Old and Modern Wheat Cultivars in a Mediterranean-type Environment. Australia. Australian Journal of Agricultural Research. 40: 473-487.
- Silvey, V. 1978. The contribution of new varieties to increasing cereal yield in England and Wales. UK. Journal of the National Institute of Agricultural Botany. 14: 367-84.
- Sinha K., S.; Aggarwal K., P.; Chaturvedi S., G.; Koundal R., K. and Khanna-Chopra, R. 1981. A comparison of physiological and yield characters in old and new wheat varieties. USA. Journal of Agricultural Science Cambridge. 97: 233-236.
- Slafer A., G. 2003. Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. UK. Annals of Applied Biology. 142: 117-128.
- Slafer A., G.; Andrade H., F. and Satorre H., E. 1990. Genotypic improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. Netherlands. Field Crops Research. 23: 255-263.
- Slafer A., G.; Satorre H., E. and Andrade H., F. 1994. Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. In: Genetic Improvement of Field Crops. G.A. Slafer (ed.). Marcel Dekker. New York. 1-68pp.

- Slafer A., G.; Calderini F., D. and Miralles J., D. 1996. Yield components and compensation in wheat: opportunities for further increasing yield potential. . In: Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers. Reynolds, M.P.,S. Rajaram, and A. McNab (eds.). CIMMYT, México, D.F. 101-133pp.
- Snape W., J. 1996.The contribution of new biotechnologies to wheat breeding. In: Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers. Reynolds, M.P.,S. Rajaram, and A. McNab (eds.). CIMMYT, México, D.F. 167-181pp.
- Stöppler, H.; Kölsch, E. und Vogtmann, H. 1988. Auswirkungen der Züchtung bei Winterweizen in einem landwirtschaftlichen System mit geringer Betriebsmittelzufuhr von außen. Germany and USA. Journal of Agronomy and Crop Science.162: 325-332.
- Jandel Scientific. 1994. Table Curve 2D. User's Manual version 2.03 AISN Software. Jandel Scientific, Corte Madera. CA, USA.
- USDA (Natural Resources Conservation Service). 2000. World Soil Resources Natural Resources Conservation Service (www.nhq.usda.gov/WSR/). United States Department of Agriculture. Washington, DC.
- Waddington R., S.; Cartwright M., P. and Wall C.,P. 1983. A quantitative scale of spike initial and pistil development in barley and wheat. USA. Annals of Botany. 51: 119–130.
- Waddington R., S.; Osmanzai, M.; Yoshida, S. and Ransom K., J. 1987. The yield of durum wheats released in Mexico between 1960 and 1984. Canada. Journal of Agricultural Science. 108: 469-477.

Zadoks C., J.; Chang T., T. and Konzak F., C. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. UK. Weed Research. 14: 415-421.

**7.2. CAMBIOS EN EL RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES EN
TRIGO EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA
FRACCIONADA**

CAMBIOS EN EL RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES EN TRIGO EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA FRACCIONADA

Villafaña A., T. L.¹; Morales R., E. J.¹; Estrada C., G.¹; Martínez R., C. G.¹., Solís M. E²

¹Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario “El Cerrillo” Toluca, México. Tel. (722) 2 96 55 29 ext. 142. ² Campo Experimental Celaya, INIFAP, km 6.5 carretera Celaya-San Miguel de Allende, Celaya, Estado de Guanajuato. Tel. (461) 6 11 53 23 ext. 155.

Email: gestradac@uaemex.mx

RESÚMEN

El uso de fertilizantes nitrogenados contribuye al incremento del rendimiento y calidad de grano en trigo; sin embargo, debido a factores económicos y ambientales, se plantea el uso eficiente de insumos, el cual consiste en maximizar la producción con la mínima cantidad de nitrógeno (N). El objetivo de la presente investigación fue determinar la dosis y momento de aplicación de fertilizante nitrogenado que maximice el rendimiento de grano en trigo en Toluca, México. El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 2011 en Toluca, México. Se evaluaron tres genotipos de trigo: Salamanca S-75 (liberación antigua), Romoga F-96 (liberación intermedia) y

Tollocan F-2005 (reciente liberación), con dos niveles de fertilización nitrogenada (100 y 200 kg N ha⁻¹) con tres estrategias de aplicación: 1 (50% de N en la siembra y 50% en amacollamiento); 2 (50% de N en la siembra y 50% en espiguilla terminal); 3 (50% de N en la siembra y 50% en hoja bandera). Se determinó el rendimiento de grano y sus componentes principales. Los datos fueron analizados en un diseño estadístico de parcelas divididas. Cuando las pruebas de F fueron significativas se realizó la diferencia significativa honesta (DSH). Las relaciones entre variables se obtuvieron mediante análisis de regresión y se ajustaron a modelos lineales, bilineales o sigmoideos. Tollocan F-2005 mostró mayor NG, NGPE, NEPE y rendimiento de grano; los valores de rendimiento, NG, NEPm², NGPE, NEPE y PSE se incrementaron con la dosis 200 kg N ha⁻¹. La estrategia 3 tuvo una respuesta positiva; sin embargo, el efecto de cada estrategia de aplicación está en función del cultivar y de la dosis de nitrógeno.

Palabras clave: *Triticum spp.* estrategia de aplicación, rendimiento de grano, componentes principales.

ABSTRACT

The use of nitrogen fertilizers contributes to increase yield and quality of grain in wheat; however, due to economic and environmental factors, arises the efficient use of inputs, which is to maximize production with the minimum amount of nitrogen (N). The aim of this research was to determine the dose and time of application of nitrogen fertilizer that maximizes the grain yield in wheat in Toluca, Mexico. The experiment was conducted under rainfed conditions during the

agricultural cycle spring/summer 2011 in Toluca, Mexico. Three wheat genotypes were evaluated: Salamanca S-75 (old release), Romoga F-96 (intermediate release) and Tollocan F-2005 (recent release), with two levels of N fertilization (100 and 200 kg N ha⁻¹) with three implementation strategies: 1 (50% of N in the sowing and 50% in tillering); 2 (50% of N in the sowing and 50% in terminal spikelet); 3 (50% of N in the sowing and 50% in flag leaf). Grain yield and its main components were determined. The data were analyzed in a statistical design of split plots. When the F tests were significant honestly significant difference (DSH) was performed. Relationships between variables were obtained by regression analysis and adjusted to linear, bilinear or sigmoideos models. Tollocan F-2005 showed higher KN, KPS, SPS and grain yield; performance, KN, SNPm², KPE, SPS, SDW values increased with dose 200 kg N ha⁻¹. Strategy 3 had a positive response; however, the effect of each implementation strategy is depending on the cultivar and the dose of nitrogen.

Key words: *Triticum spp.*, implementation strategy, grain yield, main components.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de trigo es necesario para mantener o incrementar el rendimiento y calidad del grano. Sin embargo, la síntesis de este nutrimento implica un costo elevado, por lo que los fertilizantes nitrogenados representan la aportación más cara en los sistemas de producción; además de que contribuye en gran medida a la contaminación agrícola, al perderse por lixiviación, volatilización y desnitrificación (Drinkwater *et al.*, 1998;

Limaux *et al.*, 1999; Smil, 2001; Crews y Peoples, 2004; Gooding *et al.*, 2011). En este sentido, se ha reportado que el objetivo de diversos estudios ha sido desarrollar sistemas de producción y prácticas de manejo que mejoren la habilidad de los cultivos para absorber nitrógeno y minimizar sus pérdidas. Asimismo, diversos autores han mencionado que la utilización de urea de lenta liberación o la aplicación fraccionada de urea convencional en diferentes momentos en la estación de crecimiento del cultivo, podría ser una alternativa para mejorar el rendimiento en trigo y minimizar las pérdidas de nitrógeno (Giambalvo *et al.*, 2010).

El rendimiento de grano en trigo es el producto del número de granos por unidad de superficie y el peso individual de los mismos. Sin embargo, ha sido reportado que el componente más importante que determina el rendimiento de grano en trigo es el número de granos por metro cuadrado. Asimismo, el número de granos m^{-2} está determinado por el número de espigas m^{-2} , el número de espiguillas por espiga y el número de flores por espiguilla (Abbate *et al.*, 1995). Estos dos componentes del rendimiento (número de granos por m^2 y peso individual del grano) son generados en diferentes momentos del ciclo del cultivo (Slafer, 2003), de tal forma que las necesidades nutricionales (e.g. nitrógeno) tienden a ser diferentes en función del componente que se está generando (Foulkes *et al.*, 2009).

En los valles altos de México donde el trigo se cultiva bajo condiciones de temporal existe poca información sobre la cantidad y momento de aplicación de

nitrógeno. El objetivo de la presente investigación fue determinar la dosis y momento de aplicación de fertilizante nitrogenado que maximice el rendimiento de grano en trigo en Toluca, México.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de temporal durante el ciclo agrícola primavera-verano 2011 en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México (19° 15' 33" N, 99° 39' 38" O y 2640 msnm). El tipo de suelo es vertisol pélico con textura franco-arcillosa (USDA, 2000).

El clima predominante en la región es C (w2)(w)b(i), correspondiente al templado subhúmedo con lluvias en verano y poca oscilación térmica, la temperatura media anual es de 12.8 °C con una precipitación media anual de 900 mm (García, 1988). Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica (Weather Monitor II, Davis Instruments Corp., USA), ubicada aproximadamente a 300 m del experimento.

2.2. Factores de estudio

Se evaluaron tres cultivares (cvs.) de trigo: Salamanca S-75 (liberación antigua), Romoga F-96 (liberación intermedia) y Tollocan F-2005 (liberación reciente), con dos niveles de nitrógeno (N): 100 y 200 kg N ha⁻¹, utilizando como fuente urea (46%), y tres estrategias de aplicación: 1 (50% N en la siembra + 50% en

amacollamiento), 2 (50% N en la siembra + 50% en espiguilla terminal), 3 (50% N en la siembra + 50% en hoja bandera).

Cada unidad experimental consistió de 6 hileras de 3 m de largo y 0.20 m de separación (3.6 m²) con una densidad de 350 semillas m⁻². La parcela experimental útil estuvo conformada por los cuatro surcos centrales.

2.3. Variables evaluadas

2.3.1. Número de flores fértiles

En el muestreo de biomasa a antesis, se determinó el número de flores fértiles por espiga, seleccionando en forma aleatoria 5 espigas de vástagos principales de igual número de espiguillas, observando bajo un microscopio estereoscópico (Leica MZ6, Leica Microsystems, Germany) aquellas flores que se encontraban según la escala de Waddington *et al.*, (1983) en un estadio mayor a 9.5, es decir, cuando contaban con el ovario desarrollado. El estigma se observó bífido completo y las anteras verdes y turgentes. Posteriormente, las espigas fueron secadas en una estufa de aire forzado a 70° C durante 72 h, hasta peso constante, y se registró el peso seco.

2.3.2. Madurez fisiológica

Para determinar la madurez fisiológica (MF) se marcaron en el momento de antesis 20 espigas de vástago principal por parcela, y dos veces por semana se registró el peso seco de 5 granos basales de 5 espiguillas centrales de la espiga, a partir de los 7 días posteriores a la antesis.

La madurez fisiológica (MF) fue estimada mediante una regresión bilineal entre el peso seco del grano y el tiempo térmico desde antesis (Miralles y Slafer, 1995) utilizando la siguiente ecuación:

$$Y = a + bx(x \leq c) + bc(x > c) \quad (1)$$

Donde: Y es el peso seco del grano, a es el intercepto, b es la tasa de llenado de grano, x es el tiempo térmico después de antesis ($^{\circ}\text{Cd}^{-1}$) y c es la duración total de llenado de grano o madurez fisiológica.

2.3.3. Rendimiento de grano y sus componentes

Cuando las plantas alcanzaron la madurez fisiológica se realizó la cosecha. En cada parcela, las plantas de dos surcos centrales de 100 cm de longitud fueron cosechadas manualmente y separadas en tallos y espigas de vástagos principales y macollos. Cada uno de los estratos fue secado en una estufa de aire forzado a 70°C durante 72 horas hasta peso constante.

De esta manera se determinó el rendimiento de grano (expresado en g m^{-2}), el número de granos por unidad de área (NG), el peso individual del grano (PIG), el número de espiguillas por espiga (NEPE), el número de granos por espiga (NGPE), el número de granos por espiguilla (NGPEspiguillas) y el número de espigas por metro cuadrado (NEPm²). El NG se determinó seleccionando 5 espigas de forma aleatoria de igual número de espiguillas y se contó el número de granos por espiguilla.

2.3.4. Análisis estadístico

Los datos del experimento fueron sometidos a análisis de varianza, para un diseño experimental de parcelas divididas y cuando las pruebas de F resultaron significativas se realizó la prueba de comparación de medias, utilizando la diferencia significativa honesta (DSH) a un nivel de significancia del 5%, utilizando el software SAS (SAS Institute, 2002). Las relaciones entre variables se obtuvieron mediante análisis de regresión y se ajustaron a modelos lineales, bilineales o sigmoideos (TableCurve 2D, Jandel Scientific, AISN Software, 1994).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Muchos factores limitan el rendimiento de grano en trigo; y el rendimiento final es el resultado de la interacción de factores genéticos, ambientales y agronómicos (Siddique *et al.* 1989).

Los análisis de varianza revelaron que para el factor cultivar, hubo diferencias altamente significativas ($p \leq 0.001$) para todas las características bajo estudio con excepción del PSE. Con relación al nitrógeno todas las variables fueron diferentes desde el punto de vista estadístico, excepto PSE y NEPm². En cuanto a la estrategia, solo el PSE no fue significativo (Cuadro 1).

Las interacciones cultivar x nitrógeno (Cv x N), cultivar x estrategia (Cv x E) y nitrógeno por estrategia (N x E) resultaron altamente significativas en todos los caracteres con excepción del PSE. La interacción triple Cv x N x E no fue significativa en la variable PSE (Cuadro 1).

Cuadro 1. Significancia estadística de los valores de F del rendimiento y sus componentes en tres cultivares de trigo evaluados bajo distintas dosis de nitrógeno y estrategias de aplicación en Toluca, México.

Fuente de variación	NFFAnt	NG	PIG	PSE	NEPm ²	NEPE	NGPEs	NGPE
Cultivar (Cv.)	***	***	***	ns	***	***	***	***
Nitrógeno (N)	**	***	***	ns	ns	***	***	***
Estrategia (E)	***	***	***	ns	**	***	***	***
Cv x N	***	***	*	ns	*	***	***	***
Cv x E	***	***	***	ns	***	***	***	***
N x E	***	***	***	ns	***	*	***	***
Cv x N x E	***	***	***	ns	***	***	***	***

ns, *, **, ***; no significativo, significativo a 0.05, 0.01 y 0.001, respectivamente.

NFFAnt= número de flores fértiles a antesis, NG= número de granos, PIG= peso individual del grano, PSE= peso seco de la espiga, NEPm²= número de espigas por metro cuadrado, NEPE= número de espiguillas por espiga, NGPE= número de granos por espiguilla, NGPE= número de granos por espiga.

En la Figura 1 en donde se presenta la relación entre el rendimiento de grano y la dosis de nitrógeno ($r^2= 0.99$), se aprecia que Tollocan F-2005 respondió positivamente al aumentar la cantidad de nitrógeno por hectárea, observándose incrementos en el rendimiento de grano. ($r^2= 0.99$). Resultados similares fueron reportados por Ortiz-Monasterio (2002) quien al evaluar diferentes dosis de nitrógeno (0 a 300 kg N ha⁻¹) aplicado a cultivares liberados en distintos años, observó que el cultivar Genaro 81 (reciente liberación) respondió positivamente al incremento del nitrógeno. Asimismo, Austin *et al.* (1980); White y Wilson (2006) observaron que al aumentar la dosis de fertilizante nitrogenado de 0 a 300 kg N

ha⁻¹, el rendimiento de grano fue mayor en aquellos tratamientos con dosis altas de nitrógeno.

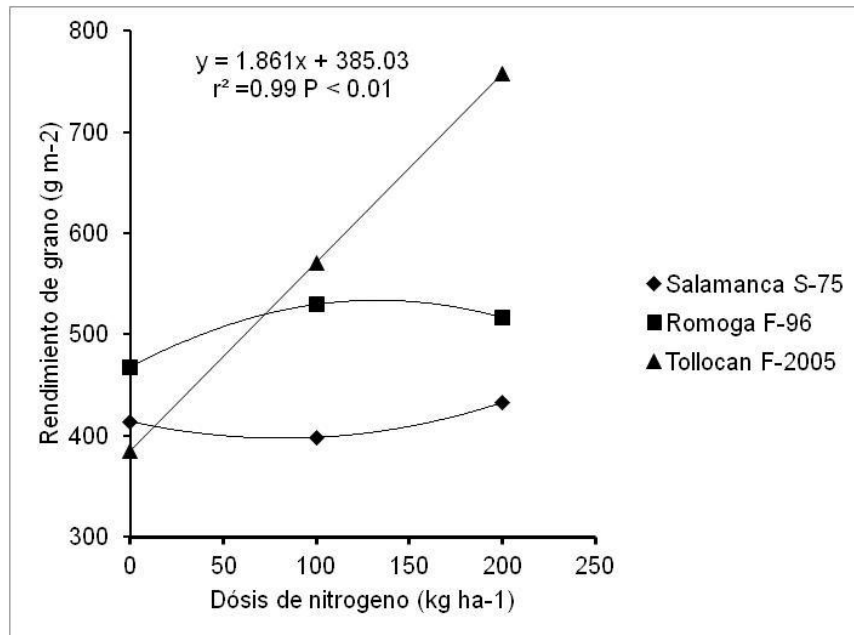


Figura 1. Relaciones entre el rendimiento de grano y la dosis de nitrógeno aplicado, para tres genotipos de trigo en Toluca, México.

La Figura 2a mostró una relación positiva ($r^2= 0.91$) entre el rendimiento y el número de granos por unidad de superficie, observándose que el cultivar Tollocan F-2005 presentó el mayor número y rendimiento de grano, seguido de Romoga F-96 y Salamanca S-75. Cabe destacar que no se observó relación entre el rendimiento y el peso individual de grano (Fig. 2b).

Astegiano *et al.*, (2003) reportaron datos similares a nuestro estudio, observando que para todos los cultivares de trigo evaluados existió una relación ($r^2= 0.90$)

entre el rendimiento y el número de granos. Asimismo, Abbate *et al.* (1998) afirmó que el rendimiento de grano en trigo está determinado por el peso y el número de granos por unidad de superficie, siendo este último componente el que presenta correlación más alta con el rendimiento. También Abbate *et al.* (1995) reportaron que en ambos experimentos (1988 y 1989) existió una relación altamente significativa entre el rendimiento de grano y el número de granos por m², sin observarse ninguna correlación entre el rendimiento y el peso de grano.

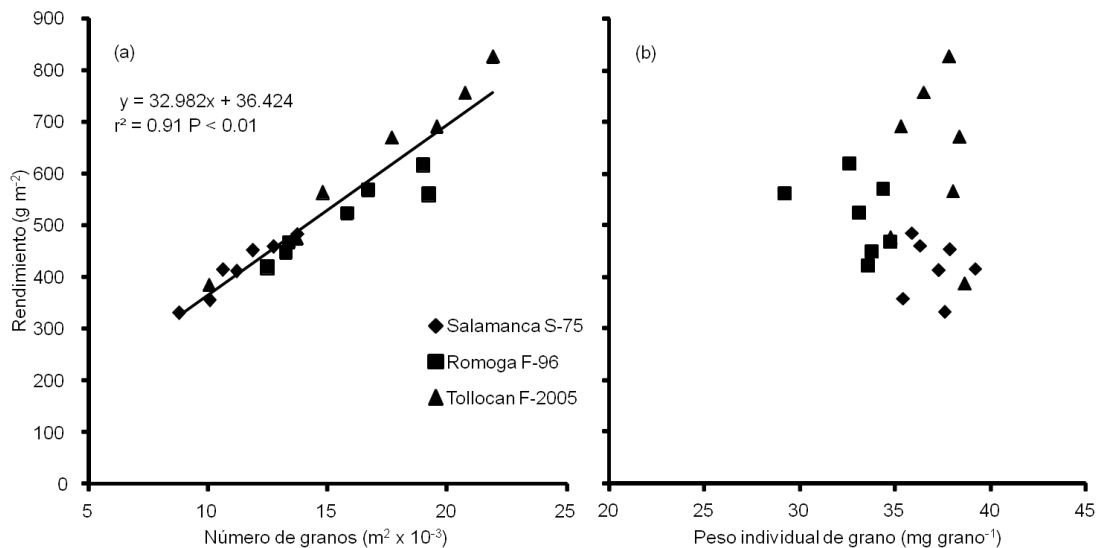


Figura 2. Relaciones entre el rendimiento de grano y el número de granos por unidad de superficie (a), y el peso individual de grano (b) para tres genotipos de trigo y 3 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

En la figura 3a se observa que Salamanca S-75 y Tollocan F-2005 respondieron positivamente al aumento del nitrógeno, siendo este último cultivar, el que

presentó el máximo número de granos ($20.7 \text{ granos por m}^2 \times 10^{-3}$) (Fig. 3a). Resultados similares fueron reportados por Feil (1992), al observar que cultivares modernos de trigo producen mayor número de granos por unidad de área. Austin *et al.*, 1989, evaluaron 13 cultivares de trigo, representativos de genotipos muy antiguos, antiguos, intermedios y modernos, y observaron que los cultivares modernos obtuvieron 59% más grano, 14% más espigas por metro cuadrado y 30% más granos por espiga. Asimismo, Astegiano *et al.* (2003) observaron que el cultivar Baguette 10 (reciente liberación), obtuvo el mayor número de granos por m^2 (8672).

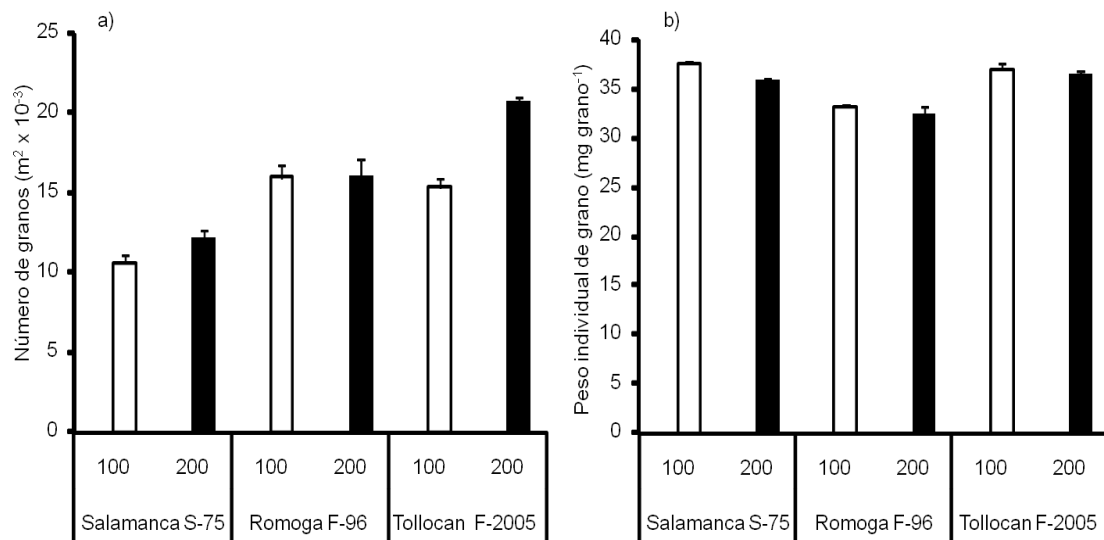


Figura 3. Relaciones entre el número de granos por unidad de superficie y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y relaciones entre el peso individual de grano y el cultivar y dosis de nitrógeno (b) para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

En este orden de ideas, Abbate *et al.* (1995) reportaron que el número de granos por m² se incrementó cuando se aumentó la dosis de nitrógeno, observando que para el año 1988 aumento de 8981 a 12753 granos por m² con 0 y 120 kg N ha⁻¹, respectivamente, y para el año 1989 de 10492 a 14178 granos por m² con 0 y 140 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Los tres cultivares de trigo evaluados, presentaron mayor peso individual de grano con la dosis baja (100 kg N ha⁻¹) (Fig. 3b); asimismo, se observó que Salamanca S-75 y Tollocan F-2005 tuvieron pesos de grano similares (37.6 y 37.1 mg, respectivamente). Lo anterior coincide con lo reportado por Astegiano *et al.* (2003) quienes informaron que los cultivares de trigo Baguette 10 (moderno) y Cacique (antiguo) presentaron pesos de grano semejantes (30.9 y 29.6 mg, respectivamente).

Algunos estudios reportaron pesos altos del grano en cultivares modernos de trigo (Gymer, 1981; Wych y Rasmusson, 1983; Cox *et al.*, 1988). En contraste a lo reportado por Sinha *et al.*, 1981; Hesselbach, 1985 y Perry y D'Antuono, 1989, quienes observaron bajos pesos de grano en trigos modernos de invierno.

En este sentido, se observa que Salamanca S-75 y Tollocan F-2005 obtuvieron pesos de grano similares; sin embargo, Tollocan F-2005 presentó mayor número de granos por unidad de superficie, lo que se tradujo en un mayor rendimiento de grano.

Tollocan F-2005 (Fig. 4a) obtuvo el mayor número de granos con la estrategia 2 (50% en S + 50% en ET), seguido de Romoga F-96 con la estrategia 1 (50% en S

+ 50% en Amac.) y Salamanca S-75 con la 3 (50% en S + 50% en HB) (18.6, 17.8 y 12.4 granos por $m^2 \times 10^{-3}$, respectivamente). Fischer (1993) observó que el número de granos se incrementó cuando se aplicaron 60 kg N ha^{-1} en la etapa de tallo principal y 60 kg N ha^{-1} en espiguilla terminal. Por otro lado, Shearman *et al.* (2005) reportó que el número de granos por m^2 se incrementó en función del año de liberación del cultivar, pasando de 13 mil a 18 mil granos por unidad de superficie para el año 1970 y 1995, respectivamente.

En la Figura 4b se observa que el peso individual de grano en Tollocan F-2005 se incrementó con la estrategia 3, seguido de Salamanca S-75 con la estrategia 1 y Romoga F-96 con la 3. Resultados similares fueron reportados por Fischer (1993) al observar que el peso individual de grano varió de 36 mg (180 kg N ha^{-1} en la siembra) a 41 mg (60 kg N ha^{-1} en tallo principal y 60 kg N ha^{-1} en inicio del embuche). Lo anterior confirma que el peso de grano se incrementa cuando se fracciona el nitrógeno.

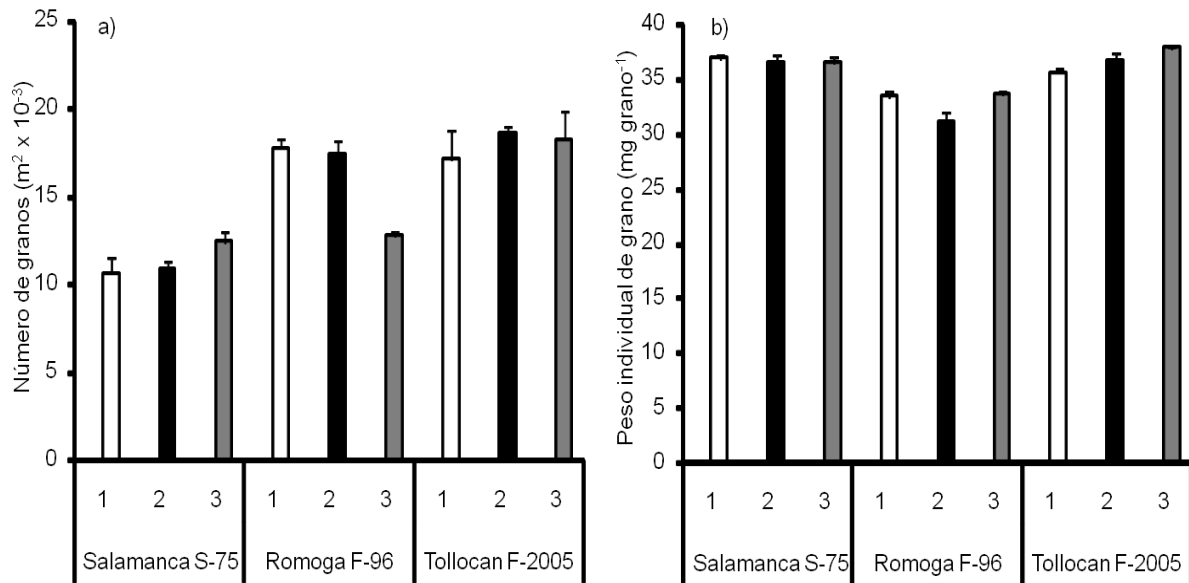


Figura 4. Relaciones entre el número de granos por unidad de superficie y el cultivar y estrategia de aplicación (a), y relaciones entre el peso individual de grano y el cultivar y estrategia de aplicación (b) para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México. 1 (S y Amac.), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

La figura 5a que muestra la relación entre el número de granos, y cultivar y dosis de nitrógeno, revela un incremento significativo en esta variable cuando se suministraron 200 unidades de nitrógeno en todas las estrategias de aplicación. En este sentido, con 200 kg N ha⁻¹ (100 kg al momento de sembrar y 100 kg en el amacollamiento del cultivo) se obtuvieron 45.8 granos por panta. Estos resultados confirman lo reportado por Fischer (1993) quien encontró que el número de granos por m² se incrementó de 1833 cuando se aplicaron 180 kg N ha⁻¹, a 1880 cuando se aplicaron 240 kg N ha⁻¹. También encontró que para la dosis alta (180 kg N ha⁻¹) la mejor estrategia de aplicación fue en la siembra, tallo

principal y amacollamiento. Por otro lado, Albrizio *et al.* (2010), informaron que el número de granos por m² estuvo fuertemente influenciado por la cantidad de nitrógeno fertilizante suministrado; en este sentido, observaron que el número de granos por m² con la dosis 120 kg N ha⁻¹ fue 25% superior a los tratamientos con 0 kg N ha⁻¹.

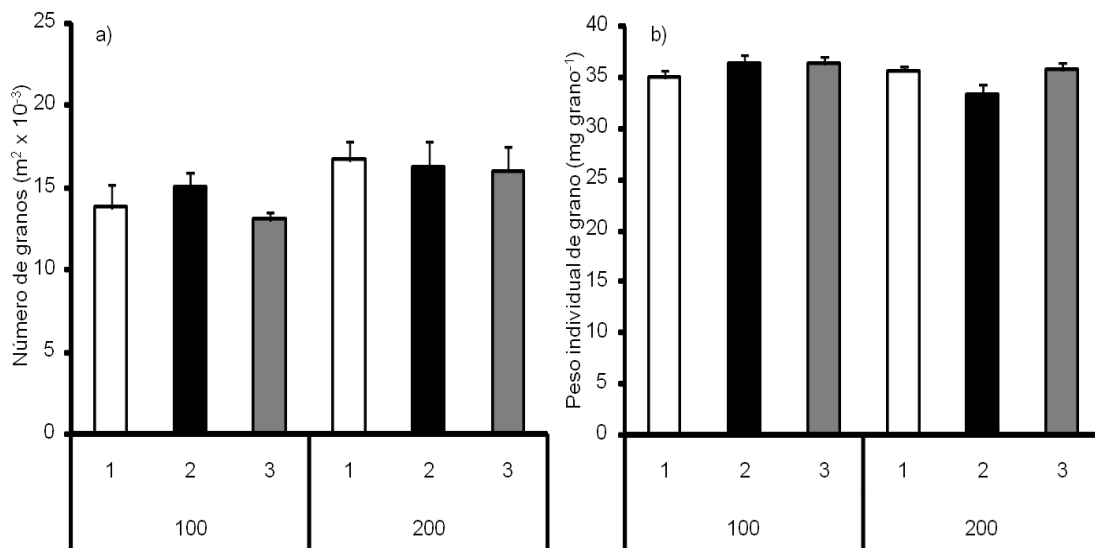


Figura 5. Relaciones entre el número de granos por unidad de superficie y la dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (a), y relaciones entre el peso individual de grano y la dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (b) para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México. 1 (S y Amac.), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

En relación al peso de grano (Fig. 5b), con 100 kg de N ha⁻¹, aplicando la mitad del nutrimento al momento de sembrar y la otra mitad en la fase fenológica de espiguilla terminal se obtuvo el mayor peso individual de grano (36.4 mg). En

contraste a los resultados de este estudio, Fischer (1993) encontró que el peso individual de grano pasó de 36.4 a 38.4 mg cuando se incremento la cantidad de 0 a 120 kg de N ha⁻¹.

En la Figura 6a se aprecia que Salamanca S-75 obtuvo el mayor número de espigas por m² al aplicar 200 kg N ha⁻¹, mientras que, para Romoga F-96 y Tollocan F-2005 el incremento de nitrógeno no fue significativo. Abbate *et al.* (1995) reportaron el mismo efecto ya que con 120 kg N ha⁻¹ lograron un 17% más de espigas por m² respecto al tratamiento testigo sin fertilizante nitrogenado.

En el cultivar de liberación intermedia Romoga F-96 (Fig. 6b) se observa que cuando se fertilizó con la estrategia 1 presentó en promedio el mayor número de espigas por m² (643.7), seguido de Tollocan F-2005 con la estrategia 3 (617.7) y Salamanca S-75 con la estrategia 1 (611.9). Este hecho confirma parcialmente los resultados de Astegiano *et al.* (2003) quienes al evaluar 7 cultivares de trigo, reportaron que los cultivares de liberación intermedia presentaron el mayor número de espigas por m² (388), aunque este valor fue inferior a los resultados de nuestra investigación. Por otra parte, Albrizio *et al.* (2010) informaron que la aplicación de dosis altas de nitrógeno al inicio del ciclo del cultivo, se tradujo en un incremento del número de tallos y espigas por m².

Para la interacción nitrógeno por estrategia de aplicación, la figura 6c muestra que para la dosis baja de nitrógeno la estrategia 1 fue la que respondió mejor, mientras que para la dosis alta fue la estrategia 2. Nuestros resultados corroboran lo informado por Fischer (1993), quien afirma que a medida que se incrementa el

nitrógeno por hectárea, es muy importante fraccionarlo en las distintas etapas fenológicas. Este investigador concluye que existe respuesta positiva del trigo al fraccionamiento de nitrógeno hasta la etapa de inicio de embuche.

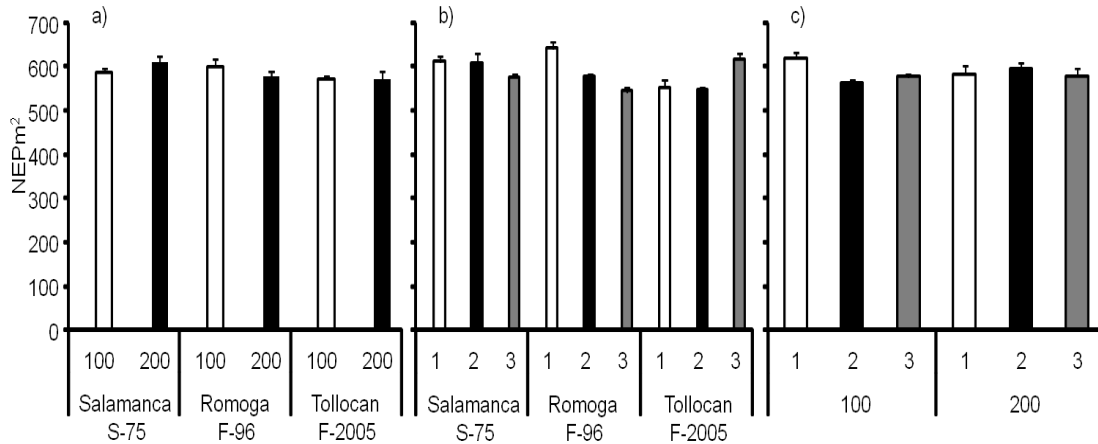


Figura 6. Relaciones entre el número de espigas por metro cuadrado (NEPm²) y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c), para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México. 1 (S y Amac), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

Los tres genotipos evaluados respondieron positivamente al aplicar 200 kg N ha⁻¹ (Fig. 7a); sin embargo, Tollocan F-2005 fue el cultivar con el mayor número de granos por espiga (36.5), superando a Salamanca S-75 y Romoga F-96 en 45 y 24%, respectivamente. En este orden de ideas, varios estudios han reportado que cultivares modernos de trigo responden positivamente al incremento de fertilizante nitrogenado, lo cual se ve reflejado en un alto número de granos por espiga

(Hoeser *et al.*, 1979; Austin *et al.*, 1989; Perry y D'Antuono, 1989; Slafer y Andrade, 1989;).

Tollocan F-2005 con 50% de N suministrado en la siembra + 50 % en espiguilla terminal alcanzó el máximo NGPE (Fig. 7b), seguido de Romoga F-96 con la misma cantidad y momento de aplicación y Salamanca S-75 con 50% de N en la siembra + 50% en la hoja bandera, obteniendo valores de 33.9, 23.5 y 21.6 NGPE, respectivamente. En contraste, Fischer (1993) reportó un mayor NGPE cuando se suministró 120 kg N ha⁻¹ en espiguilla terminal en un solo momento de aplicación (44.6). Por otro lado, Mossedaq y Smith (1994) citaron que el NGPE fue superior cuando se suministraron 120 kg N ha⁻¹ que cuando no se aplicó nitrógeno, asimismo observaron que esta variable se incrementó cuando el nitrógeno se fraccionó en embuche (40 kg N ha⁻¹) y en antesis (80 kg N ha⁻¹).

La figura 7c que hace referencia a la relación estrategia de aplicación y dosis de nitrógeno revela que todas las estrategias respondieron positivamente al suministrar 200 kg N ha⁻¹, el mayor NGPE se observó en la estrategia 1 con la dosis alta. Demotes-Mainard y Jeuffroy, (2001) reportaron que el NGPE varió de 38.1 a 41.1 cuando se suministraron 120 y 300 kg N ha⁻¹, respectivamente, en dos momentos de aplicación (siembra y amacollamiento).

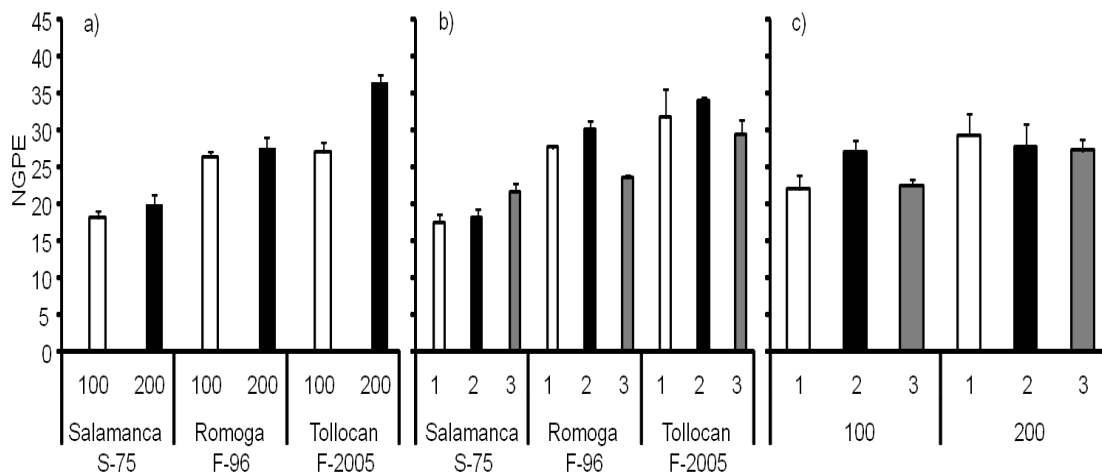


Figura 7. Relaciones entre el número de granos por espiga (NGPE) y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c), para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México. 1 (S y Amac), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

La figura 8a muestra la respuesta que tuvo cada cultivar en función de la dosis de nitrógeno, en ella se observa que Tollocan F-2005 incrementó el número de espiguillas por espiga al incrementar el nivel de nitrógeno, alcanzándose el máximo valor con 200 kg N ha⁻¹ (18.9). Estrada-Campuzano *et al.* (2012) reportó que el número de espiguillas por espiga en el cultivo de trigo se incrementó 5% cuando se aumentó la dosis de nitrógeno.

Los cultivares Romoga F-96 y Tollocan F-2005 respondieron mejor a la estrategia de aplicación 3, sin embargo, el valor más alto correspondió a Tollocan con 18.4 NEPE (Fig. 8b). Fischer (1993) en un estudio donde evaluó distintas dosis y momentos de aplicación de fertilizante nitrogenado en trigo, observó que el

número de espiguillas por espiga se incrementó cuando se aplicó el nitrógeno en la etapa de espiguilla terminal.

En general, con 200 kg N ha⁻¹, todas las estrategias de aplicación actuaron positivamente. En promedio, con 200 kg N ha⁻¹ distribuidos en 50% en la siembra y 50% en la hoja bandera se lograron los mejores resultados (Fig. 8c). Contrariamente a lo reportado por Demotes-Mainard y Jeuffroy, (2001) quienes afirmaron que el número de espiguillas por espiga se incrementó cuando el nitrógeno se aplicó en la etapa de espiguilla terminal.

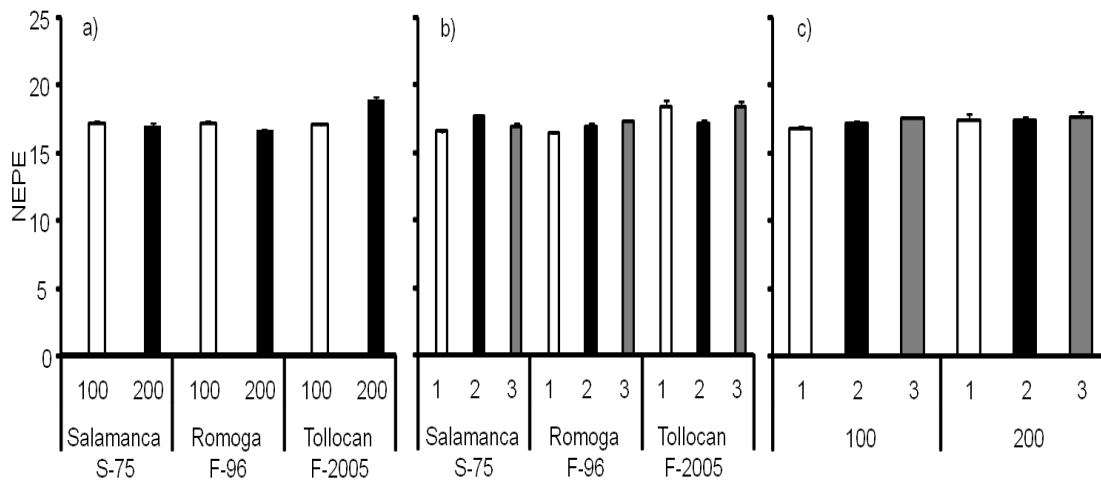


Figura 8. Relaciones entre el número de espiguillas por espiga (NEPE) y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c) para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México. 1 (S y Amac), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

Entre los cultivares evaluados, en la variable número de granos por espiguilla, no existió una tendencia positiva que nos indique que el suministro adicional de

nitrógeno aumenta el valor de esta variable, de ahí, que en Romoga F-96 con 100 kg N ha⁻¹ se haya encontrado un mayor número de granos por espiguilla (2.7), seguido de Tollocan F-2005 y Salamanca S-75 (Fig. 9a). Nuestros resultados contrastan con lo reportado por Estrada-Campuzano *et al.* (2012) quien observó que el número de granos por espiguilla se incrementó 4% con la dosis alta de nitrógeno. Por otro lado, Arduini *et al.* (2006) informaron que el número de granos por espiguilla fue superior en los cultivares de trigo de reciente liberación (Simeto y Suevo) en comparación con el genotipo Creso liberado en 1974.

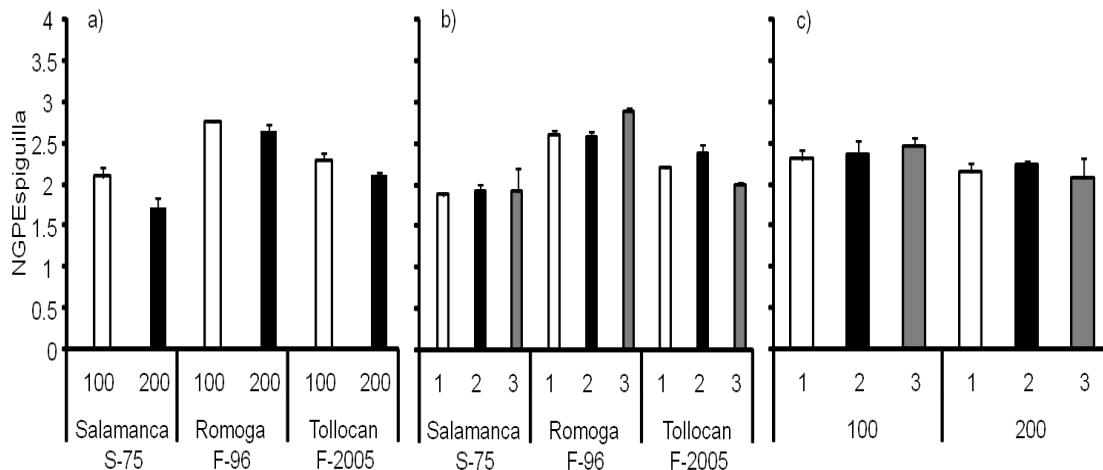


Figura 9. Relaciones entre el número de granos por espiguilla (NGPEspiguilla) y el cultivar y dosis de nitrógeno (a), y el cultivar y estrategia de aplicación (b), y dosis de nitrógeno y estrategia de aplicación (c) para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México. 1 (S y Amac), 2 (S y ET), 3 (S y HB).

El cultivar Romoga F-96 fue superior a los otros genotipos, obteniendo en promedio el mayor NGPEspiguilla (2.9) cuando se adicionó 50% de N en la siembra y 50% de N en la hoja bandera (Fig. 9b).

Los valores de NGPEspiguilla fueron mayores con 100 kg N ha⁻¹ (Fig. 9c), siendo la mejor estrategia la 3. Contrariamente a lo observado por Fischer (1993) quien informó que el NGPEspiguilla alcanzó su valor máximo cuando se aplicó el nitrógeno en amacollamiento o en espiguilla terminal.

No se observaron relaciones entre el número de flores fértiles a antesis y el peso seco de la espiga (Fig. 10a). Sin embargo existió relación ($r^2 = 0.58$) entre el número de granos por espiga y el peso seco de la espiga (Fig. 10b).

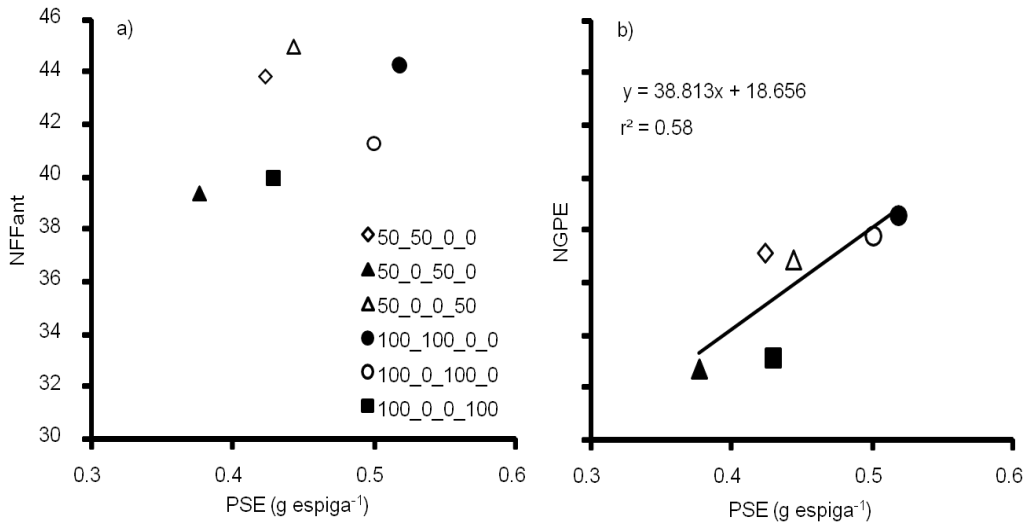


Figura 10. Relaciones entre el peso seco de la espiga (PSE) y el número de flores fértiles a antesis (NFFAnt) (a), y el número de granos por espiga (NGPE) (b) para tres genotipos de trigo y 2 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

50_50_0_0= 50 kg N ha⁻¹ en la siembra + 50 kg Nha⁻¹ en amacollamiento,
50_0_50_0= 50 kg N ha⁻¹ en la siembra + 50 kg Nha⁻¹ en espiguilla terminal,
50_0_0_50= 50 kg N ha⁻¹ en la siembra + 50 kg Nha⁻¹ en hoja bandera,
100_100_0_0= 100 kg N ha⁻¹ en la siembra + 100 kg Nha⁻¹ en amacollamiento,
100_0_100_0= 100 kg N ha⁻¹ en la siembra + 100 kg Nha⁻¹ en espiguilla terminal,
100_0_0_100= 100 kg N ha⁻¹ en la siembra + 100 kg Nha⁻¹ en hoja bandera.

Varios autores han sugerido que existe una competencia entre las reservas vegetativas y reproductivas durante el periodo de pre antesis, y que la cantidad de asimilados acumulados en la espiga hasta antesis determina la supervivencia floral y subsecuentemente el número de granos (Willey y Holliday, 1971; Warrington *et al.*, 1977; Brooking y Kirby, 1981; Fischer, 1984). La cantidad de asimilados acumulados en los órganos reproductivos hasta antesis puede medirse como el peso seco de espigas (Rawson y Bagga, 1979).

En la Figura 10b se observó que el peso seco de la espiga fue mayor en aquellos tratamientos con 200 kg N ha⁻¹. Resultados similares fueron reportados por Abbate *et al.* (1995), al observar un incremento en el peso seco de la espiga cuando se aplicaron 140 kg N ha⁻¹. Asimismo, ellos informaron que los tratamientos con dosis altas de nitrógeno mostraron una relación entre el número de granos y el peso seco de la espiga. Similarmente a lo observado por Rawson y Bagga (1979) ; Wall (1979); Fischer y Stockman (1980) ; Fischer (1984); Thorne y Wood (1987) quienes

encontraron relaciones lineales entre el número de granos y el peso seco de la espiga.

Un mayor número de granos es el resultado de más granos por espiga; en este sentido, varios estudios han reportado que cultivares de trigo mostraron mayor número de flores fértiles por espiga como consecuencia del incremento en la distribución de asimilados hacia la espiga durante el periodo de prefloración (Fischer, 1983; Calderini *et al.*, 1995; Miralles *et al.*, 1998).

IV. CONCLUSIONES

Debido a su potencial genético, el cultivar Tollocan F-2005 presentó el mejor desempeño agronómico, obteniendo el mayor rendimiento, el cual se atribuyó a un mayor número de granos por unidad de superficie, número de granos por espiga y número de espiguillas por espiga. El incremento de la dosis de nitrógeno (200 kg N ha⁻¹) aumentó el número de granos por m² y en consecuencia el rendimiento. La respuesta de la estrategia de aplicación no tuvo un efecto específico sobre el rendimiento y sus componentes. Los resultados de la presente investigación confirman que el número de granos por metro cuadrado es el componente que determina el rendimiento de grano en trigo.

Con base a este estudio, el mejoramiento de las prácticas agrícolas en el cultivo de trigo se debe basar en la utilización de cultivares que presenten mayor potencial genético y a la utilización de dosis y épocas de aplicación de nitrógeno adecuadas que permitan manifestar dicho potencial.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas involucradas en la elaboración de la presente investigación, asimismo, los autores agracen a la Universidad Autónoma del Estado de México por el financiamiento parcial otorgado para la realización de este estudio, el cual forma parte del proyecto de investigación con clave “2925/2010”.

LITERATURA CITADA

- Abbate, P.E.; Andrade, F.H. and Culot, J.P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *Journal of Agricultural Science*. Cambridge. 124: 351-360.
- Abate, P.E.; Lazaro, L. y Andrade, F.H. 1998. ¿Es posible incrementar el número de granos por unidad de superficie? In: *Explorando Altos Rendimientos de Trigo*. M. M. Koolí, D. Martino (eds.). La Estanzuela, Uruguay, Octubre 20 al 23, 1997. CIMMYT-INIA. pp: 71-89.
- Albrizio, R.; Todorovic, M.; Matic, T. and Stellacci M., A. 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. Netherlands. *Field Crops Research*. 115: 179-190.
- Arduini, I.; Masoni, A.; Ercoli, L. and Mariotti, M. 2006. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *European Journal of Agronomy* 25: 309-318.
- Astegiano, E.D.; Hermann, M.; Leurino, G y Menegon, J. 2003. Comportamiento de componentes de productividad y rendimiento de cultivares de trigo en la región central de la provincia de Santa Fe. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias* 2: 19-28.
- 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 wheat yields

- since 1900 and associated physiological changes. *The Journal of Agricultural Science* 94:675-689.
- Austin, R.B.; Ford, M.A. and Morgan, C.L. 1989. Genetic improvement in the yield of winter wheat: a further evaluation. *The Journal of Agricultural Science*. 112: 295-301.
- Ayoub, M.; Guertin, S.; Lussier, S. and Smith, L. 1994. Timing and Level of Nitrogen Fertility Effects on Spring Wheat Yield in Eastern Canada. *Crop Science* 34: 748-756.
- Bänziger, M.; Feil, B and Stamp, P. 1994. Competition between Nitrogen Accumulation and Grain Growth for Carbohydrates during Grain Filling of Wheat. *Crop Science* 34: 440-446.
- Brooking, L.R. and Kirby, E.J.M. 1981. Interrelationships between stem and ear development in winter wheat: the effects of a Norin 10 dwarfing gene: *Gai/Rht₂*. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 97: 373-381.
- Calderini, D. F.; Dreccer, M.F. and Slafer, G.A. 1995. Genetic improvements in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and latest trends. *Plant Breed.* 114: 108-112.
- Cox, T.S.; Shroyer, J.P; Ben-Hui, L; Sears, R.G. and Martin, T.J. 1988. Genetic improvement in agronomic traits of hard red winter wheat cultivars from 1919 to 1987. *Crop Science* 28: 756-760.

- Crews, T.E. and Peoples, M.B. 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: Ecological tradeoffs and human needs. *Ecosyst. Environ.*, 102: 279-297.
- Demotes-Mainard, S. and Jeuffroy, MH. 2001. Incorporating Radiation and Nitrogen Nutrition into a Model of Kernel Number in Wheat. *Crop Science* 41: 415-423.
- Drinkwater, L.E.; Wagoner, P. and Sarrantonio, M. 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* (London). 396:262-264.
- Estrada-Campuzano, G.; Miralles J., D. and Slafer A., G. 2012. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. Netherlands. *Field Crops Research*. 128: 167-179.
- Feil, B., 1992. Breeding progress in small grain cereals-a comparison of old and modern cultivars. USA and UK. *Plant Breeding*. 108: 1-11.
- Fischer, R.A. 1983. Growth and yield of wheat. In: Potential productivity of field crops under different environments. IRRI, Los Baños, the Philippines. 129-154 p.
- Fischer, R.A. 1984. Growth and yield of wheat. In: Proceedings of a Symposium on Potential Productivity of Field Crops under Different Environments. Pp. 129-154. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.

- Fischer, R.A. and Stockman, Y.M. 1980. Kernel number per spike in wheat (*Triticum aestivum* L.): responses to preanthesis shading. *Australian Journal of Plant Physiology* 7:169-180.
- Fischer, R.A. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research*, 33:57-80.
- Foulkes, M.J.; Hawkesford, M.J.; Barraclough, P.B.; Holdsworth, M.J.; Kerr, S.; Kightley, S.; Shewry, P.R. 2009. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research* 114, 329-342.
- García E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D. F.. 217pp.
- Giambalvo, D.; Ruisi, P. and Di Miceli, G. 2010. Nitrogen Use Efficiency and Nitrogen Fertilizer Recovery of Durum Wheat Genotypes as Affected by Interspecific Competition. *Agronomy Journal*. 102: 707-715.
- Gooding, M.J.; Addisu, M.; Uppal, R.K.; Snape, J.W. and Jones, H.E. 2011. Effect of wheat dwarfing genes on nitrogen-use efficiency. *Journal of Agricultural Science*. 150: 3-22.
- Gymer, P.T. 1981. The achievements of 100 years of barley breeding. In: *Barley Genetics IV*, 112-117. Proc. Fourth Int. Barley Genetics Symp. Edinburg.

- Hesselbach, J. 1985. Breeding progress with winter barley (*Hordeum vulgare* L.). Z. Pflanzenzüchtg. 94:101-110.
- Hoeser, K.; Wenisch, K. und Oppitz, K. 1979. Ergebnisse vergleichender Untersuchungen neuerer Winterweizensorten mit Sorten aus den Anfängen der Qualitätszüchtung. Getreide, Mehl und Brot 33:113-116.
- Jandel Scientific. 1994. Table Curve 2D. User's Manual version 2.03 AISN Software. Jandel Scientific, Corte Madera. CA, USA.
- Limaux, F.; Recous, S.; Meynard, J.M. and Gukert, A. 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertilizer nitrogen application and fate of fertilizer nitrogen applied to winter wheat. plant Soil. 214: 49-59.
- Miralles J., D.; Slafer A., G. 1995. Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. Netherlands. Field Crops Research. 43: 55-66.
- Miralles, D.J.; Katz, S.D.; Colloca, A. and Slafer, G.A. 1998. Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height. Field Crops Research. 59: 21-30.
- Mossedaq, F. and Smith, D.H. 1994. Timing Nitrogen Application to Enhance Spring Wheat Yields in a Mediterranean Climate. Agronomy Journal 86: 221-226.
- Ortiz-Monasterio R., J.I. 2002. Nitrogen management in irrigated spring wheat. In: Bread wheat: Improvement and Production. FAO Plant Production and Protection Series No. 30. 567 Pág.

- Perry, M.W. and D'Antuono, M.F. 1989. Yield improvement and associated characteristics of some Australian spring wheat cultivars between 1860 and 1982. *Aust. J. Agric. Res.* 40: 457-472.
- Rawson, H.M. and Bagga, A.K. 1979. Influence of temperature between floral initiation and flag leaf emergence on grain number in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 6:391-400.
- SAS Institute. 2002. SAS/STAT 9.0 User's guide. SAS Inst., Cary, NC.
- Shearman, V.J.; Sylvester-Bradley, R; Scott, R.K and Foulkes, M.J. 2005. Physiological Processes Associated with Wheat Yield Progress in the UK. *Crop Science* 45: 175-185.
- Siddique M, K.H.; Belford K., R.; Perry W., M. and Tennant, D. 1989. Growth, Development and Light Interception of Old and Modern Wheat Cultivars in a Mediterranean-type Environment. Australia. *Australian Journal of Agricultural Research.* 40: 473-487.
- Sinha, S.K.; Aggarwal, P.K.; Chaturvedi, G.S.; Koundal, K.R. and Khanna-Chopra, R. 1981. A comparison of physiological and yield characters in old and new wheat varieties. *J. Agric. Science, Camb.* 97: 233-236.
- Slafer, G.A. and Andrade, F.H. 1989. Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) yield in Argentina. *Field Crops Research* 21: 289-296.
- Slafer, G.A. 2003. Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of Applied Biology* **142**, 117-128.

- Smil, V. 2001. *Enriching the Earth*. MIT Press, Cambridge, M.A.
- Thorne, G.N. and Wood, D.W. 1987. Effects of radiation and temperature on tiller survival, grain number and grain yield in winter wheat. *Annals of Botany* 59: 413-426.
- USDA (Natural Resources Conservation Service). 2000. *World Soil Resources*. Natural Resources Conservation Service (www.nhq.usda.gov/WSR/). United States Department of Agriculture. Washington, DC.
- Waddington R., S.; Cartwright M., P. and Wall C.,P. 1983. A quantitative scale of spike initial and pistil development in barley and wheat. USA. *Annals of Botany*. 51: 119–130.
- Wall, P.C. 1979. An analysis of factors limiting grain number and yield of spring wheat in a low-latitude environment. PhD thesis, University of Reading.
- Warrington, I.J.; Dunstone, R.L. and Green, L.M. 1977. Temperature effects at three development stages on the yield of the wheat ear. *Australian Journal of Agricultural Research* 28: 11-27.
- White, E.M. and Wilson, F.E.A. 2006. Responses of grain yield, biomass and harvest index and their rates of genetic progress to nitrogen availability in ten winter wheat varieties. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 45: 85-101.
- Wych, R.D. and Rasmusson, D.C. 1983. Genetic improvement in malting barley cultivars since 1920. *Crop Science* 23: 1037-1040.

Wylley, R.W. and Holliday, R. 1971. Plant population, shading and thinning studies in wheat. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 77: 453-461.

VIII. DISCUSIÓN GENERAL

Biomasa y rendimiento

El mejoramiento genético ha permitido el incremento del rendimiento de grano en trigo, con tasas de ganancia de 6 a 58 kg ha⁻¹ año⁻¹, estimando que cultivares de trigo pueden alcanzar rendimientos de hasta 21 t ha⁻¹ bajo condiciones óptimas (Kronstad, 1996). Por lo tanto, se ha sugerido que un mejor entendimiento de las bases ecofisiológicas en el incremento del rendimiento, podría ofrecer un mejor enfoque para su utilización como criterio de selección (Loss y Siddique, 1994; Slafer et al., 1994; Slafer y Andrade, 1991, Slafer et al., 1994).

En relación con el mejoramiento del manejo agronómico en el cultivo de trigo, se ha sugerido la experimentación con cultivares liberados en distintos años, así como la aplicación de diversas estrategias de manejo, por ejemplo, la utilización de diferentes dosis de fertilización nitrogenada aplicadas en distintos momentos de crecimiento del cultivo (Slafer y Andrade, 1991; Feil, 1992; Loss y Siddique, 1994; Slafer *et al.*, 1994; Feil, 1992; Dreccer *et al.*, 2000).

Los resultados del presente estudio revelaron que el cultivar Tollocan F-2005 obtuvo el mayor rendimiento de grano con la dosis de 200 kg N ha⁻¹, aplicando 50% en la siembra y 50% en hoja bandera. Fischer (1993) evaluó el efecto de diferentes dosis de nitrógeno (0 a 320 kg N ha⁻¹) sobre el rendimiento de grano en trigo; observando que el rendimiento de grano se incrementó en función de la dosis de nitrógeno (170 a 750 g m⁻²). De igual forma, White y Wilson (2006) observaron que los rendimientos fueron significativamente superiores ($P < 0.001$)

en los tratamientos con 300 kg N ha⁻¹ (9.79 a 10.30 t ha⁻¹) comparados con aquellos en donde no se aplicó nitrógeno (3.68 t ha⁻¹). Asimismo, Sadras (2002) reportó que el rendimiento de grano en trigo se incrementó significativamente (P< 0.001) en función del nitrógeno aplicado.

Bänziger *et al.*, 1994 reportaron que el rendimiento de grano en trigo fue mayor (P< 0.05) cuando se suministraron 140 kg N ha⁻¹ en la siembra o amacollamiento y 100 kg N ha⁻¹ en espigamiento.

El mayor rendimiento de grano observado en Tolloca F-2005 fue asociado con valores superiores de producción de biomasa. Resultados similares fueron reportados por Austin *et al.*, (1989), Waddington *et al.*, (1986), Wych y Stuthman, (1983), Wych y Rasmusson, (1983), Boukerrou y Rasmusson, (1990), Peltonen-Sainio, (1990) White y Wilson (2006) quienes citan que la producción de biomasa durante la estación de crecimiento fue mayor en cultivares modernos de trigo.

Bänziger *et al.*, 1994 observaron que la producción de biomasa se incrementó significativamente (P< 0.05) cuando se suministraron 40 kg N ha⁻¹ en etapas tempranas (siembra o amacollamiento) y 100 kg N ha⁻¹ en espigamiento.

Serrano *et al.* (2000), evaluaron diferentes dosis de nitrógeno (0 a 200 kg N ha⁻¹) para trigo, observando que la dosis de N afectó significativamente la acumulación de biomasa (P<0.05), variando de 1656 a 2807 g m⁻² para 0 y 200 kg N ha⁻¹, respectivamente. Mientras que, Sadras (2002) evaluó tres dosis de nitrógeno (5, 35 y 55 kg N ha⁻¹) en trigo en tres localidades, y observó que la producción de

biomasa se incrementó significativamente en función de la dosis de nitrógeno ($P < 0.0001$), variando de 4.4 a 5.5 t ha⁻¹.

Los resultados del presente estudio confirman que la biomasa y el rendimiento de grano se incrementaron cuando se suministraron dosis altas de nitrógeno, asimismo, los valores de éstas variables fueron mayores cuando el nitrógeno se fraccionó en etapas tempranas y tardías. Green (1987) y Rudorff y Batista (1990) señalan una relación estrecha entre la biomasa a madurez fisiológica y el rendimiento de grano

Biomasa y EUR

La EUR explica de mejor manera las variaciones en la biomasa, al evaluar el cultivar, la dosis de nitrógeno y la estrategia de aplicación en el presente estudio, ya que se observó una relación ($r^2 = 0.74$) positiva entre la EUR y la producción de biomasa; coincidiendo con lo reportado por Estrada-Campuzano *et al.* (2012), quienes evaluaron cultivares de triticale y trigo en condiciones de estrés hídrico, señalando que los cambios en biomasa aérea son mejor explicados por cambios en la EUR más que por la RIA. Asimismo, Gaju *et al.* (2009) observaron que la producción de biomasa estuvo asociada ($P < 0.01$) a una elevada eficiencia en el uso de la radiación.

La presente investigación reveló que los valores de EUR fueron superiores en Romoga F-96 y Tollocan F-2005 con 200 kg N ha⁻¹, siendo las estrategias 2 y 3 las que respondieron positivamente.

Componentes del rendimiento

El nitrógeno influye en la formación y desarrollo de los componentes del rendimiento; ya que este nutrimento promueve la producción y supervivencia de tallos, así como un elevado número de granos por espiga (Frederick y Camberato, 1994). En la presente investigación, se observó que Tollocan F-2005 con 200 kg N ha⁻¹ aplicado 50% en la siembra y 50% en espiguilla terminal fue el cultivar con mayor número de granos por m², lo cual se reflejó en un rendimiento superior de grano por unidad de superficie. Los resultados de la presente investigación coinciden con lo reportado por Frederick y Camberato (1994) quienes observaron que el número de granos se incrementó significativamente ($P < 0.05$) al aumentar la dosis de nitrógeno de 0 a 101 kg ha⁻¹. Por otro lado, Fischer, 1983; Calderini *et al.*, 1995; Miralles *et al.*, 1998) citaron que el incremento en el número de granos por m², estuvo asociado con un mayor número de flores fértiles por espiga como consecuencia del incremento en la distribución de asimilados hacia la espiga.

Los cultivares Salamanca S-75 y Tollocan F-2005 presentaron pesos de grano similares; sin embargo, este último cultivar obtuvo el mayor rendimiento de grano; por lo tanto el número de granos por m² es el componente que determina el rendimiento, lo cual coincide con lo mencionado por Abbate *et al.* (1995). Así mismo, Gaju *et al.* (2009) señalan que ganancias genéticas en el rendimiento de grano en trigos se atribuyen a incrementos en el número de granos por m².

En la presente investigación se observó que en los tres cultivares de trigo, el mayor peso individual de grano se presentó con la dosis de 100 kg N ha⁻¹, lo cual difiere con lo reportado por Ayoub *et al.* (1994) quienes señalan mayores pesos de grano aplicando la dosis de 180 kg N ha⁻¹.

Fischer (1993) reportó que el rendimiento de grano en trigo, estuvo relacionado con el número de granos por metro cuadrado y con la producción de biomasa total.

Índice de cosecha

El cultivar Tollocan F-2005 con 100 kg N ha⁻¹ presentó el mayor valor de IC, en este sentido, White y Wilson, (2006) mencionan que los incrementos en los rendimientos de cultivares de trigo se atribuyen a incrementos en la distribución de biomasa hacia el grano, es decir, elevados índices de cosecha.

El mayor índice de cosecha observado en Tollocan F-2005, se atribuye a que este cultivar también presentó los máximos valores de rendimiento y de biomasa, confirmando lo citado por Donmez *et al.* (2001) al evaluar trece cultivares de trigo, citando una correlación significativa entre el rendimiento de grano y las variables índice de cosecha y biomasa (0.86 y 0.74, respectivamente).

En la presente investigación se observó que el índice de cosecha fue mayor con la dosis de 100 kg N ha⁻¹. Resultados similares fueron reportados por Sadras (2002) quien reportó que el IC disminuyó cuando se incrementó la dosis de nitrógeno.

Caso contrario a lo observado por Ayoub *et al.* (1994) quienes observaron mayores valores de índice de cosecha cuando se suministraron 180 kg N ha⁻¹.

En lo que se refiere al tiempo de aplicación del nitrógeno, en la presente investigación se observó que el índice de cosecha fue mayor cuando dicho nutrimento se suministró 50% en la siembra y 50% en espiguilla terminal, lo cual confirma lo reportado por Ayoub *et al.* (1994) quienes observaron que el IC fue mayor cuando el nitrógeno se fraccionó que cuando se suministró en una sola aplicación.

IX. CONCLUSIÓN GENERAL

- i. El cultivar Tollocan F-2005 presentó el mejor comportamiento agronómico, con base a la mayor producción de biomasa, rendimiento de grano, el cual se asocio a un mayor NG por m^2 , NGPE y NEPE.
- ii. La dosis de 200 kg N ha^{-1} incremento los valores promedio de biomasa, rendimiento y EUR.
- iii. El efecto de la estrategia de aplicación depende del cultivar y dosis de fertilización, sin embargo, se observó una respuesta positiva en las estrategias 2 (50% N en la siembra y 50% en espiguilla terminal) y 3 (50% N en la siembra y 50% en la hoja bandera).
- iv. El cultivar de reciente liberación Tollocan F-2005 alcanzó el máximo rendimiento de grano (695.61 g m^{-2}) cuando se suministraron 200 kg N ha^{-1} aplicando 50% N en la siembra y 50% en hoja bandera (estrategia 3).
- v. Los resultados de la presente investigación confirman que el número de granos por metro cuadrado es el componente que determina el rendimiento de grano en trigo.
- vi. Con base a los resultados obtenidos de la presente investigación, para el Valle de Toluca, es viable la utilización de cultivares de trigo de reciente liberación (Tollocan F-2005), ya que responden favorablemente al suministro de dosis altas de nitrógeno (200 kg N ha^{-1}).

X. BIBLIOGRAFÍA

Abbate, P.E.; Andrade, F. and Culot, J.P. 1994. Determinación del rendimiento en trigo. Boletín Técnico N° 133. EEA INTA Balcarce. Balcarce, Buenos Aires. 17 p.

Abbate, P.E.; Andrade, F.H. and Culot J.P. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grain in wheat. Journal Agricultural Science, Cambridge, 124: 351-360.

Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart, S. and Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Ed. La Barrosa. Balcarce, Buenos Aires. 147-192.

Austin, B.R.; Ford, A.M. and Morgan, L.C. 1989. Genetic improvement in the yield of winter wheat: a further evaluation. Canada. Journal of Agricultural Science, 112: 295-301.

Ayoub, M.; Guertin, S.; Lussier, S. and Smith, L. 1994. Timing and Level of Nitrogen Fertility Effects on Spring Wheat Yield in Eastern Canada. Crop Science, 34: 748-756.

Baker, C.K., and. Gallagher, J.N. 1983. The development of winter wheat in the field. 2. The control of primordium initiation rate by temperature and photoperiod. Journal Agricultural Science, 101:337-344.

Barbieri, P.A.; Echeverría, H.E.; Saínz Rozas, H.R. and Andrade, F.H. 2008. Nitrogen Use Efficiency in Maize as Affected by Nitrogen Availability and Row Spacing. Est. Exp. Agropecuaria INTA Balcarce and Fac. Ciencias Agrarias

(U.N.M.P.), Unidad Integrada Balcarce, C.C. 276 (7620) Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

Bänziger, M.; Feil, B and Stamp, P. 1994. Competition between Nitrogen Accumulation and Grain Growth for Carbohydrates during Grain Filling of Wheat. *Crop Science*, 34: 440-446.

Bell, M.A.; Fischer, R.A.; Byerlee, D. and Sayre, K. 1995. Genetic and agronomic contributions to yield gains: a case study for wheat. *Field Crops Research*, 44: 55-65.

Berger, R.; Caldato, S.; Báez, R. and Trujillo, R. 2009. Utilización de índice de área foliar para optimización de inventarios forestales – Estudio de caso.

Bonhomme, R. 1993. The solar radiation: characterization and distribution in the canopy. *In*: Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Sinoquet, H. (Eds.), *Crop Structure and Light Microclimate: Characterization and Applications*. INRA Editions, Paris, pp. 17-28.

Bonhomme, R., 2000. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. *Field Crops Research*, 68: 247-252.

Boukerrou, L. and Rasmusson, D.D. 1990. Breeding for high biomass yield in spring barley. *Crop Science* 30: 31-35.

Briggle, L.W. and Curtis, B.C. 1987. *Wheat Worldwide*. *In* E.G. Heyne (ed.), *Wheat and Wheat Improvement*. Second Edition. Madison, WI: American

Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. pp. 1-32.

Brown, D.M. 1976. Response of maize to environmental temperatures: a review. *In: Agrometeorology of the maize crop. Proc. 1976 Symp.* Ames, Iowa. Publ. WMO-481. World Meteorological Organization, Geneva. pp.15-26.

Calderini, D.F.; Dreccer, M.F. and Slafer, G.A. 1995. Genetic improvement in wheat yield and associated traits. A re-examination of previous results and latest trends. *Plant Breeding*, 114: 108-112.

Calderini, D.F.; Miralles, D.J. and Sadras, V.O. 1996. Appearance and growth of individual leaves as affected by semidwarfism in isogenic lines of wheat. *Annals of Botany*, 77: 583-589.

Calderini, D.F., Reynolds, M.P. and Slafer, G.A. 1999. Genetic gains in wheat yield and main physiological changes associated with them during the 20th century. *In: Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination.* Satorre E. H. y Slafer G. A. (eds.). Food Product Press, New York (USA). pp. 351-377.

Cárcova, J.; Abeledo, L.G. and Pereira, M.L. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. *In: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo.* E. Satorre *et al.* (eds.) FAUBA. pp. 75-85.

Charles-Edwards, D.A. 1982. Physiological determinants of crop growth. Academic Press, North Ryde, North South Wales, Australia 161 p.

Cirilo, A.G. and Andrade, F.H. 1996. Sowing Date and Kernel Weight in Maize. *Crop Science*, 36: 325-331.

Cook, R.J. and Veseth, R.J. 1992. *Wheat Health Management*. APS Press, The American Phytopathological Society. Diversity. 1995. Turkey designated by GSF as ideal site for landmark "in situ" conservation project. *In: Deborah Strauss* (ed.), *Global Genetic Resources*. 11(162): 47-67.

Cooper, P.J.M.; Gregory, P.J.; Keatinge, J.D.H. and Brown, S.C. 1987. Effects of fertilizer, variety and location on barley production under rainfed conditions in northern Syria. 2. Soil water dynamics and crop water use. *Field Crops Research*, 16: 67–84.

De la Morena, I.; Ramos, J.M.; García del Moral, L.F. 1986. Análisis de crecimiento y de la producción de grano en cultivos de cebada bajo las condiciones ambientales de la provincia de Granada. II. Evolución y supervivencia de los tallos hijos. *Anuales de Edafología y Agrobiología*, 779-796.

van Dobben, W. H. 1962: Influence of temperatures and light conditions on dry matter distribution, development rate and yield in arable crops. *Neth. Journal of Agricultural Science*, 10: 377-389.

Donald, C.M. 1962. In search of yield. *Journal of Australian Institute of Agricultural Science*, 28: 171-178.

Donald, C.M. and Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Advance in Agronomy*, 28: 361-405.

Donmez, E.; Sears, R.G.; Shroyer, J.P. and Paulsen, G.M. 2001. Genetic gain in yield attributes of winter wheat in the Great Plains. *Crop Science*, 41: 1412-1419.

Dreccer, F. M.; Schapendonk, A.H.C.M.; Slafer, A.G. and Rabbinge, R. 2000. Comparative response of wheat and oilseed rape to nitrogen supply: absorption and utilization efficiency of radiation and nitrogen during the reproductive stages determining yield. Netherlands. *Plant and Soil*. 220: 189-205.

Dreccer, M.F.; Ruiz, R.A.; Maddonni, G.A. y Satorre, E. 2003. Bases ecofisiológicas de la nutrición de los cultivos de grano. *In: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. E. Satorre *et al.* (eds.) FAUBA. pp. 481-497.

Estrada-Campuzano, G.; Miralles J., D. and Slafer A., G. 2012. Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. Netherlands. *Field Crops Research*. 128: 167-179.

FAO (2010) FAOSTAT, FAO statistical databases – agriculture (available at <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>) (fecha de acceso 18/03/2011).

FAO (2012) FAOSTAT, FAO statistical databases – agriculture (available at <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>) (fecha de acceso 12/09/2012).

- Feil, B.**, 1992. Breeding progress in small grain cereals-a comparison of old and modern cultivars. USA and UK. *Plant Breeding*. 108: 1-11.
- Feldman, M.**; Lupton, F.G.H. and Miller, T.E. 1995. *Wheats. Triticum spp.* (Graminae-Triticinae). *In*: Smartt J., Simmonds N.W. (eds.). *Evolution of Crop Plants*. Longman Scientific & Technical Press, London, UK, pp 184-192
- Fischer, R.A.** 1979. Growth and water limitation to dryland wheat yield in Australia: A physiological framework. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 45, 83–94.
- Fischer, R.A.** 1983. Wheat. Smith W. H. & Banta J. J. (eds.). *Potential Productivity of Field Crops Under Different Growth Conditions*. IRRI, Los Baños, Philippines. pp. 129-154.
- Fischer, R.A.** 1984. Growth and yield wheat. *In*: *Proceedings Symposium on potential productivity of field crops under different environments*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philipinas, pp.129-154.
- Fischer, R.A.** 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*, 105: 447–461.
- Fischer, R.A.** 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research*, 33: 57–80.
- Fischer, R.A.** and HilleRisLambers, D. 1978. Effects of environment and cultivar on source limitation to grain weight in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29: 443-458.

- Fischer**, R.A. 1973. The effect of water at various stages of development on yield processes in wheat. *In: Plant Response to Climatic Factors, Proc. Uppsala Symp.* 1970, pp. 233-241. (UNESCO:Paris).
- Flintham**, J.E.; Borner, A.; Worland, A.J. and Gale, M.D. 1997. Optimizing wheat grain yield: effects of Rht (gibberellins-insensitive) dwarfing genes. *Journal of Agricultural Science*, 128: 11-25.
- Frederick**, J.R. and Camberato J.J. 1994. Leaf Net CO₂-Exchange Rate and Associated Leaf Traits of Winter Wheat Grown with Varioud Spring Nitrogen Fertilization Rates. *Crop Science*, 34: 432-439.
- Frey**, N.M. 1981. Dry matter accumulation in kernels in maize. *Crop Science*, 13: 436-439.
- Gaju**, O.; Reynolds, M.P.; Sparkes, D.L. and Foulkes, M.J. 2009. Relationships between Large-Spike Phenotype, Grain Number, and Yield Potential in Spring Wheat. *Crop Science*, 49: 961-973.
- Galarza**, J.M.; Miramontes, U.; Muñoz, D.; Hernández, G. y Montiel, F. 2005. Situación Actual y Perspectivas del Trigo 1990-2006.
- Gallagher**, J.N.1979. Field studies of cereal leaf growth. I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. *Journal of Experimental Botany*, 30:625-636.
- García**, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México, D. F. p. 217.

- García, F.** 1996. El Ciclo el nitrógeno en ecosistemas agrícolas. Área Agronomía, EEA INTA-Facultad de Ciencias Agrarias C.C. 276 - (7620) Balcarce.
- García, G.A.** 2008. Variabilidad en la duración de las etapas pre-antesis en trigo y su relación con el rendimiento. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 67.
- García del Moral, L.F.;** de la Morena, I. y Ramos, J.M. 1987. Biomasa, duración del área foliar y proporción grano/hoja en relación con la cosecha y sus componentes en cebada. Agricultura mediterránea, 117:163-170.
- González-Murua, C.;** González-Moro, M-B. y Estavillo-Aurre, J. M. 2003. Nitrógeno, agricultura y medio ambiente. 387-412. *In:* La ecofisiología vegetal: Una ciencia de síntesis. M. J. Reigosa, N. Pedrol y A. Sánchez (eds). Paraninfo, S. A. Vigo, España.
- González, F.G.;** Slafer, G.A. y Miralles, D.J. 2003. Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. Field Crops Research, 81: 17-27.
- González, F.G.;** Slafer, G.A. y Miralles, D.J. 2005a. Photoperiod during stem elongation in wheat: is its impact on fertile floret and grain number determination similar to that of radiation? Functional Plant Biology, 32: 181-188.
- González, F.G.;** Slafer, G.A. y Miralles, D.J. 2005b. Pre-anthesis development and number of fertile florets in wheat as affected by photoperiod sensitivity genes Ppd-D1 and Ppd-B1. Euphytica, 146: 253-269.

- Green**, F.C. 1989. Genotypic differences in the growth of *Triticum aestivum* in relation to absorbed solar radiation. Netherlands. Field Crops Research.19: 285-295.
- Gustafson**, P.; Raskina, O.; Max, X. and Nevo, E. 2009. Wheat evolution, domestication, and improvement. *In: Wheat: Science and Trade*. B.F. Carver (ed.). Wiley-Blackwell, pp. 5-30.
- Hai**, R.K.M. 1995. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology*, 126: 197-216.
- Hanson**, H.; Borlaug, N.E. and Anderson, R.G. 1982. Wheat in the Third World. IADS Development Oriental Literature Series. Westview Press, Boulder, Colorado, U.S.A.
- Harlan**, J.R. 1981. The early history of wheat: earliest traces to the sack of Rome. *In: Wheat science-today and tomorrow*. L. T. Evans & W.T. (ed..) Peacock, pp. 1-19. Cambridge University Press.
- Hay**, R.K.M. and Walker, A.J. 1989. An introduction to the physiology of crop yield. Longman Scientific Technical. 292 p.
- Jandel** Scientific. 1994. Table Curve 2D. User's Manual version 2.03 AISN Software. Jandel Scientific, Corte Madera. CA, USA.
- Jones**, R.J.; Roessler, J. and Ouattar, S. 1985. Thermal environment during endosperm cell division in maize: Effects on number of endosperm cells and starch granules. *Crop Science*, 25: 830- 834.

- Kent**, N.L. and Evers, A.D.. 1994. Storage and pre processing Technology of Cereals, 4th edn., pp. 103_128. UK: Elsevier
- Kiniry**, J.R. and Ritchie, J.T. 1985. Shade-sensitive interval of kernel number in maize. *Agronomy Journal*, 77: 711-715.
- Kiniry**, J.R. and Bonhomme, R. 1991. Predicting maize phenology. *In*: Predicting crop phenology. T. Hodges (ed.). CRC Press. Boca Raton, Ann Arbor. Boston. pp.. 115-131.
- Kiniry**, J.R.,1999. Response to questions raised by Sinclair and Muchow. *Field Crops Research*, 62: 245-247.
- Kirby**, E.J.M. 1988. Analisis of leaf, stem and ear growth in wheat from terminal spikelet stage to anthesis. *Field Crops Research*, 18: 127-140.
- Kirby**, E.J.M. and Appleyard, M. 1984. Cereal development guide 2nd edition. Arable Unit. England. 95 p.
- Kronstad**, W.E. 1996. Genetic diversity and the free exchange of germplasm in breaking yield barriers. *In*: Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers. Reynolds, M.P.,S. Rajaram, and A. McNab (eds.). CIMMYT, México, D:F. pp. 19-27.
- Lemcoff**, J.H. and R.S. Loomis. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Science*, 26:1017-1022.
- Lobell**, D.B.; Ortiz-Monasterio, J.I.; Asner, G.P.; Matson, P.A.; Naylor, R.L. and Falcon, W.P. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 94: 250-256.

Loss, P. S. and Siddique, M.K.H. 1994. Morphological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environments. USA. *Advances in Agronomy*, 52: 229-276.

Magrin, G.O.; Hall, A.J.; Baldy, C. and Grondona, M.O. 1993. Spatial and interannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67: 29-41.

Miralles D. J. and Slafer G. A. 1995. Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. *Field Crops Research*, 43: 55-66.

Miralles, D.J. y Slafer, G. A. 1999. Wheat development. *In: Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. Satorre E. H. & Slafer G. A. (eds.) Food Product Press, New York (USA). pp. 13-43.

Miralles, D.J.; Katz, S.D.; Colloca, A. and Slafer, G.A. 1998. Floret development in near isogenic wheat lines differing in plant height. *Field Crops Research*. 59: 21-30.

Miralles, D.J.; Richards, R.A. and Slafer, G.A. 2000. Duration of stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Australian Journal of Plant Physiology*, 27: 931-940.

Miralles, D.J. 2004. Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de Trigo. Información técnica de trigo. Campaña 2004. Publicación Miscelánea N° 101. Mayo 2004. INTA. pp. 1-7.

- Monteith** J L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society. London, Serie B 281:277-294.
- Monteith**, J.L., 1972. Solar radiation productivity in tropical ecosystems. Journal Of Applied Ecology, 9: 747-766.
- Monteith**, J.L. and Elston, J. 1981. Performance and productivity of foliage in the field. *In*: The growth and functioning of leaves. J.E. Dale & F.L. Mithore. (eds.). Cambridge University Press, pp. 499-517.
- Muchow**, R.C. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. I. Leaf growth and leaf nitrogen. Field Crops Research, 18: 1-16.
- Murata**, Y. 1981. Dependence of potential productivity and efficiency for solar energy utilization on leaf photosynthetic capacity in crop species. Japanese Journal of Crop Science, 50:223-232.
- Navarro**, A.; Sánchez, E.; Bravo, M. y Zazueta, B. 2007. Evaluación del comportamiento del financiamiento no bancario aplicado a la producción de trigo en Mexicali, B. C. Revista Mexicana de Agronegocios, 20: 282-297.
- Naylor**, R.L.; Falcon, W.P. and Puente-Gonzalez, A. 2001. Policy Reforms and Mexican Agriculture: Views from the Yaqui Valley. CIMMYT Economics Program Paper No. 01-01. CIMMYT, Mexico, D:F.
- Novoa**, R., and Loomis, R.L. 1981. Nitrogen and plant production. Plant Soil, 58:177–204.

- Passioura, J.B.** 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 43: 117-120.
- Peltonen-Sainio, P.**, 1990: Genetic improvements in the structure of oat stands in northern growing conditions during this century. *Plant Breeding*, 104: 340-345.
- Peng, J.;** Sun, D. and Nevo, E. 2011. Wild emmer wheat, *Triticum dicoccoides*, occupies a pivotal position in wheat domestication process. *Australian Journal of Crop Science*, 5: 1127-1143.
- Radin, J.W.**1983. Control of plant growth by nitrogen: differences between cereals and broadleaf species. *Plant, Cell Environ*, 6:65-68.
- Reddy, V.H.** and Daynard, T.B. 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica*, 28: 339-355.
- Rejesus, R.M.;** Heisey, P.W. and Smale, M. 1999. Sources of Productivity Growth in Wheat: A Review of Recent Performance and Medium to Long-Term Prospects. CIMMYT Economics Working Paper 99-05. CIMMYT, Mexico, D.F.
- Reynolds, M.P.;** Calderini, D.F.; Condon, A.G. and Rajaram, S. 2001. Physiological basis of yield gains in wheat associated with LR19 translocation from *Agropyron elongatum*. *Euphytica*, 119: 137-141.
- Reynolds, M.P.;** Pellegrineschi, A. and Skovmand, B. 2005. Sink limitation to yield and biomass: a summary of some investigations in spring wheat. *Annals of Applied Biology*, 146: 39-49.

- Rudorff**, B.F.T. and Batista, G.T. 1990. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. *Remote Sensing of Environment*, 31: 53-63.
- Sadras**, V.O.; Roget, D.K. and O'Leary, G.J. 2002. On-farm assessment of environmental and management constraints to wheat yield and rainfall use efficiency in the Mallee. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53: 587-598.
- SAS** Institute. 2002. *SAS/STAT 9.0 User's guide*. SAS Inst., Cary, NC.
- Satorre**, E.H.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E. y Savin, R. 2003. *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 783 p.
- Sayre**, K.D.; Rajaram, S. and Fischer, R.A. 1997. Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop Science*, 37: 36-42.
- Schussler**, J.R. and Westgate, M.E. 1991. Maize kernel set at low water potential: I. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. *Crop Science*, 31: 1189-1195.
- Serrago**, R.A.; Miralles, D.J. and Slafer, G.A. 2008. Floret fertility in wheat as affected by photoperiod during stem elongation and removal of spikelets at booting. *European Journal of Agronomy*, 28: 301-308.
- Serrano**, L.; Filella, I. and Peñuelas, J. 2000. Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Supplies. *Crop Science*, 40: 723-731.

- Shearman**, V.J.; Sylvester-Bradley, R.; Scott, R.K. and Foulkes, M.J. 2005. Physiological Processes Associated with Wheat Yield Progress in the UK. *Crop Science*, 45: 175-185.
- Siddique**, K.H.M.; Belford, R.K.; Perry, M.W. and Tennant, D. 1989. Growth, Development and Light Interception of Old and Modern Wheat Cultivars in a Mediterranean-type Environment. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40: 473-487.
- Sinclair**, T.R., and Horie, T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science*, 29:90-98.
- Sinclair**, T.R. and Muchow, R.C., 1999. Advances in Agronomy. *In: Sparks, D.L.* (ed.), Vol. 65. Academic Press, San Diego, CA, pp. 215-265.
- Sinha**, S.K.; Bhargava, S.C. and Goel, A. 1982. Energy as the basis of harvest index. *Journal of Agricultural Science*, 99: 237-238.
- Slafer**, G.A. and Andrade, F.H. 1991. Changes in physiological attributes of the dry matter economy of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) through genetic improvement of grain yield potential at different regions of the world. A review. *Euphytica*, 58: 37–49.
- Slafer**, G.A.; Calderini D.F. and Miralles, D.J. 1996. Yield components and compensation in wheat: opportunities for further increasing yield potential. *In: Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers.* Reynolds, M.P., S. Rajaram, and A. McNab (eds.). CIMMYT, México, D:F. pp. 101-133.

Slafer, G.A.; Andrade, F.H. and Satorre, E.H. 1990. Genotypic improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Research*, 23: 255-263.

Slafer, G. A.; Satorre, E.H. and Andrade, F. H. 1994. Increases in grain yield in bred wheat from breeding and associated physiological changes. *In: Genetic Improvement of Field Crops: Current Status and Development*. G.A. Slafer (ed.). Marcel Dekker, Inc.: New York. pp. 1-68.

Slafer, G.A. and Andrade, F.H. 1989. Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum*) yield in Argentina. *Field Crops Research*, 21: 289-296.

Slafer, G.A. and Rawson, H.M. 1994. Sensitivity of Wheat Phasic Development to Major Environmental Factors: A Re-examination of Some Assumptions made by Physiologists and Modellers. *Australian Journal of Plant Physiology*,. 21: 393-426.

Slafer, G.A.; Miralles, D.J.; Savin, R.; Whitechurch, E.M. y González, F.G. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo. *In: Producción de granos. bases funcionales para su manejo*. E. Satorre *et al.* (eds.). FAUBA. pp. 101-112.

Slafer, G.A. and Satorre, E.H. 1999. An introduction to the physiological-ecological analysis of wheat yield. *In: Wheat: Ecology and physiology of yield determination*. Satorre E.H., Slafer G.A. (eds.). Food Product Press, New York. pp. 3-12.

Slafer, G.A. 1996. Differences in phasic development rate amongst wheat cultivars independent of responses to photoperiod and vernalization. A viewpoint of the intrinsic earliness hypothesis. *Journal of Agricultural Science* in press.

Snowball, K. y Robson, A. D. 1991. Carencias y toxicidades nutricionales que afectan al trigo: Una guía para su identificación en el campo. México, D. F., CIMMYT.

Sofield, I.; Evans, L.T. ; M.G. Cook and Wardlaw, I.F. 1974. Factors influencing the rate and duration of grain filling in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology*, 4: 785-797.

Tanner, C.B. and Sinclair, T.R. 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? *In* Limitations to Efficient Water Use in Crop Production.. HM Taylor, WR Jordan and TR Sinclair (eds.). American Society of Agronomy, Wisconsin, USA. pp. 1–27.

USDA (Natural Resources Conservation Service). 2000. World Soil Resources Natural Resources Conservation Service (www.nhq.usda.gov/WSR/). United States Department of Agriculture. Washington, DC.

Waddington, S.R.; Cartwright, P.M. and Wall, P.C. 1983. A quantitative scale of spike initial and pistil development in barley and wheat. *Annals of Botany*, 51: 119–130.

Waddington, S. R.; Ranson, J. K.; Osmanzai, M. and Saunders, D. A. 1986. Improvement in the yield potential of bread wheat adapted to northwest Mexico. *Crop Science*, 26: 698-703.

- White**, E.M. and Wilson, F.E.A. 2006. Responses of grain yield, biomass and harvest index and their rates of genetic progress to nitrogen availability in ten winter wheat varieties. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 45: 85-101.
- Whitfield**, D.M. and Smith, C.J., 1989. Effects of irrigation and nitrogen on growth, light interception and efficiency of light conversion in wheat. *Field Crops Research*, 20: 279-295.
- Wiegand** C.L. and Cuellar, J.A. 1981. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. *Crop Science*, 21: 95-101.
- Wych**, R.D. and Rasmusson, D.C., 1983. Genetic improvement in malting barley cultivars since 1920. *Crop Science*, 23: 1037-1040.
- Wych**, R.D. and Stuthman, D.D. 1983 Genetic improvement in Minnesota-adapted oat cultivars released since 1923. *Crop Science*, 23: 879-881
- Zadoks**, J.C.; Chang, T.T. and Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research*, 14: 415-421.
- Zohary**, D. and Hopf, M. 2000. Domestication of plants in the old world. Oxford University Press, Oxford.