

**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA DE AGRONOMIA**

**Variación de la nutrición fosforada de trigo (*Triticum aestivum* L.) de  
acuerdo al nivel de disponibilidad de fósforo en un Andisol de la  
Décima Región de Chile**

Tesis presentada como parte de los  
requisitos para optar al grado de  
Licenciado en Agronomía

**German Ricardo Dassé Planella**

VALDIVIA - CHILE

2005

PROFESOR PATROCINANTE:

Dante Pinochet T.

Ing. Agr., M.Sc. Ph.D

-----

PROFESORES INFORMANTES:

Ricardo Fuentes P.

Ing. Agr., M.Sc

-----

Daniel Calderini R.

Ing. Agr. , Dr

-----

*Madre, esta tesis te la dedico a ti  
por ser la persona que ha  
dedicado toda su vida, que me  
ha dado toda su fuerza, la  
enseñanza y las ganas de vivir.*

## AGRADECIMIENTOS

A todas las personas del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos les agradezco por su camaradería y por entregarme el conocimiento y la herramientas necesarias para desempeñarme en forma profesional.

Agradezco en forma especial a Ruth, Olga y Jerman por colaborar directamente en el desarrollo de este trabajo.

A don Roberto Mac Donald le doy las gracias por escucharme y por poder compartir una amistad.

A mi profesor patrocinante don Dante Pinochet, que me ha hecho conocer y comprender la esencia de la ciencia. Le estoy profundamente agradecido por lo que he logrado gracias a usted.

Finalmente quiero agradecer a mis padres y hermanos que si no fuese por ellos yo nunca hubiese iniciado este camino. A Angélica y su familia por su cariño y apoyo. Y de manera muy especial agradezco a; M. Marcela Planella, M Valentina Planella y Alfredo Dünner que me han dado su apoyo incondicional desde siempre.

Gracias.

## INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
2	<b>REVISION BIBLIOGRAFICA</b>	3
2.1	Antecedentes generales del cultivo de trigo	3
2.1.1	Trigo en Chile	4
2.1.2	Importancia	6
2.1.3	Descripción botánica	6
2.1.4	Variedades de trigo	8
2.1.5	Aspectos agroclimatológicos	8
2.1.6	Requerimientos hídricos	9
2.1.7	Requerimientos nutricionales	9
2.1.8	Requerimientos de suelo	10
2.1.9	Época de siembra	10
2.2	Fertilización	11
2.2.1	Método racional	11
2.2.2	Demanda de fósforo	12
2.2.2.1	Rendimiento a alcanzar	12
2.2.2.2	Requerimiento interno	13
2.2.2.3	Índice de cosecha	14
2.2.3	Suministro de fósforo	15
2.2.3.1	Eficiencia de la fertilización fosforada	16
2.2.3.2	Eficiencia de absorción de fósforo	18
2.3	Nutrición fosforada del cultivo de trigo	19
2.3.1	Efectos de la nutrición fosforada en la productividad de materia seca del trigo	19
2.3.2	Efectos en la distribución de la materia seca	21

Capítulo		Página
2.3.3	Efectos de la nutrición fosforada sobre el índice de cosecha (IC)	22
2.3.4	Efectos de la nutrición fosforada en la tasa de crecimiento	23
2.4	Concentración de fósforo	23
2.4.1	Concentración de fósforo en el grano	24
2.4.2	Requerimiento interno de fósforo	25
2.5	Absorción de fósforo del cultivo de trigo	26
2.5.1	Tasa de absorción de fósforo	27
2.6	Translocación de fósforo	27
2.7	Índice de extracción de P a cosecha	28
3	<b>MATERIAL Y METODO</b>	30
3.1	Material	30
3.1.1	Características del sitio	30
3.1.1.1	Características químicas	30
3.1.1.2	Características geomorfológicas	31
3.1.2	Características climáticas de la zona	31
3.1.3	Características climáticas del período del ensayo	31
3.1.4	Tiempo térmico	33
3.1.5	Material vegetal	33
3.1.6	Fertilizantes utilizados	33
3.2	Método	34
3.2.1	Preparación de suelo	34
3.2.2	Prácticas culturales y encalado	34
3.2.3	Tratamientos de fertilización fosforada	34
3.2.4	Diseño del ensayo	34
3.2.5	Tamaño de las parcelas	35
3.2.6	Siembra del ensayo	35
3.2.7	Fertilización del ensayo	35

Capítulo		Página
3.3	Evaluación del ensayo	36
3.3.1	Muestras del material vegetal	36
3.3.2	Procesamiento y peso del material vegetal	36
3.3.3	Determinación de la concentración de fósforo	37
3.4	Parámetros de la nutrición fosforada derivados	37
3.4.1	Absorción acumulada de fósforo	37
3.4.2	Tasa de absorción de fósforo	38
3.4.3	Tasa de crecimiento	38
3.4.4	Translocación de fósforo	38
3.5	Parámetros de la demanda de fósforo	39
3.5.1	Índice de cosecha	39
3.5.2	Índice de extracción de fósforo	39
3.5.3	Requerimiento interno de fósforo	39
3.6	Tratamiento óptimo de fertilización fosforada	39
3.6.1	Eficiencia de la fertilización fosforada	39
3.7	Eficiencia de uso de fósforo	40
3.8	Análisis estadístico	40
3.8.1	Evaluación estadística de los efectos de los tratamientos	40
3.8.2	Ajuste del crecimiento acumulado, absorción de P, tasas de crecimiento y absorción de P y función de respuesta a la fertilización del ensayo	40
4	<b>PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	41
4.1	Parámetros de medición directa	41
4.1.1	Producción de materia seca	41
4.1.1.1	Producción de materia seca de hojas	41
4.1.1.2	Producción de materia seca de tallos	42
4.1.1.3	Producción de materia seca de espigas	44
4.1.1.4	Producción de materia seca de granos	45

Capítulo	Página	
4.1.1.5	Producción de materia seca total	46
4.1.2	Concentración de fósforo	51
4.1.2.1	Concentración de fósforo de hojas	51
4.1.2.2	Concentración de fósforo de tallos	52
4.1.2.3	Concentración de fósforo de espigas	53
4.1.2.4	Concentración de fósforo de granos	55
4.1.2.5	Concentración de fósforo estimada total	56
4.2	Parámetros derivados	61
4.2.1	Absorción acumulada de fósforo	61
4.2.1.1	Absorción acumulada de fósforo de hojas	61
4.2.1.2	Absorción acumulada de fósforo de tallos	62
4.2.1.3	Absorción acumulada de fósforo de espigas	64
4.2.1.4	Absorción acumulada de fósforo de granos	65
4.2.1.5	Absorción total de fósforo	65
4.2.2	Contribución porcentual de cada órgano a la materia seca total producida	71
4.2.2.1	Contribución porcentual de las hojas	71
4.2.2.2	Contribución porcentual de los tallos	72
4.2.2.3	Contribución porcentual de las espigas	73
4.2.2.4	Contribución porcentual de los granos	74
4.2.3	Acumulación porcentual de MS y P	79
4.2.4	Tasa de crecimiento	80
4.2.4.1	Tasa de crecimiento de hojas	81
4.2.4.2	Tasa de crecimiento de tallos	83
4.2.4.3	Tasa de crecimiento de espigas	85
4.2.4.4	Tasa de crecimiento de granos	86
4.2.4.5	Tasa de crecimiento del total de la parte aérea	87
4.2.5	Tasa de absorción de fósforo	89
4.2.5.1	Tasa de absorción de P de hojas	89

Capítulo		Página
4.2.5.2	Tasa de absorción de P de tallos	91
4.2.5.3	Tasa de absorción de P de espigas	93
4.2.5.4	Tasa de absorción de P de granos	94
4.2.5.5	Tasa de absorción de P en el total de la parte aérea	96
4.2.6	Translocación de P en la parte aérea de trigo	98
4.3	Tratamiento óptimo de fertilización fosforada	99
4.4	Parámetros fertilización racional del cultivo de trigo	101
4.4.1	Índice de cosecha	102
4.4.2	Índice extracción de fósforo	103
4.4.3	Requerimiento interno de fósforo (RP)	105
4.4.4	Factor de demanda de P	106
4.5	Eficiencia de recuperación del P	107
4.6	Eficiencia interna del uso de fósforo por el cultivo de trigo	108
5	<b>CONCLUSIONES</b>	110
6	<b>RESUMEN</b>	112
	<b>SUMMARY</b>	113
7	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	115
	<b>ANEXOS</b>	122

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Análisis químico del sitio utilizado	30
2	Relación entre el tiempo cronológico y el tiempo térmico durante el desarrollo del cultivo de trigo	33
3	Composición química de la mezcla Frölich	33
4	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la producción de materia seca acumulada (kg MS/ha) por órgano del cultivo del trigo	48
5	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la concentración de fósforo (g/100g) por órgano del cultivo de trigo	58
6	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la absorción de fósforo (kg P/ha) por órgano del cultivo de trigo	68
7	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la contribución de órganos (%) en la materia seca total producida por el cultivo del trigo	76
8	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana del crecimiento de las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	82
9	Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo $[Y=Y_{\max}/(1+\exp((B-X)/C))]$ de la materia seca de tallos producida en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	84
10	Parámetros del ajuste a una regresión no lineal de una ecuación de tipo lineal extendida $(Y=A+B*X+C/X)$ de la materia seca de las espigas en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	85

Cuadro		Página
11	Parámetros del ajuste a una regresión lineal ( $Y=A+B*X$ ) de la materia seca de los granos en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	87
12	Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo [ $Y=Y_{max}/(1+exp((B-X)/C))$ ] de la materia seca total producida en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	87
13	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	89
14	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en los tallos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	91
15	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en espigas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	93
16	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de regresión lineal ( $Y = A + B*X$ ) de la absorción de fósforo en granos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	95
17	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo [ $Y=Y_{max}/(1+exp((B-X)/C))$ ] de la absorción total de fósforo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	96
18	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la translocación de fósforo (kg P/ha) de distintos órganos de la planta hacia el grano	98
19	Participación porcentual en la translocación de fósforo hacia el grano de los distintos órganos del trigo bajo distintas dosis de fertilización fosforada	99

Cuadro		Página
20	Regresión no lineal de tipo Mitscherlich para los rendimientos de grano en trigo	100
21	Variación de los índices de cosecha del cultivo del trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	102
22	Variación en el tiempo de los índices de cosecha del cultivo del trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	103
23	Variación de los índices de extracción de fósforo del cultivo del trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	104
24	Variación en el tiempo de los índices de extracción de fósforo del cultivo del trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	104
25	Efecto de distintas dosis de fósforo sobre el factor de demanda de P, usando el RP de cada tratamiento y el óptimo	107
26	Efecto de distintas dosis de fósforo sobre el factor de absorción de P (FAPC) y la eficiencia de recuperación de fósforo	108
27	Efecto de distintas dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la eficiencia uso de P (UEP) en tres estados fenológicos distintos	109

**INDICE DE FIGURAS**

Figura		Página
1	Precipitación y evaporación promedio mensual (mm) registrada durante el período de estudio (junio 2001 a junio de 2002)	32
2	Temperatura mínima y máxima promedio mensual (°C) registrada durante el período de estudio (junio 2001 a junio de 2002)	32
3	Diseño del ensayo	35
4	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en las hojas del cultivo de trigo	41
5	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en los tallos del cultivo de trigo	43
6	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en las espigas del cultivo de trigo	44
7	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en los granos del cultivo de trigo	45
8	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la producción total de materia seca acumulada del cultivo de trigo	47
9	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la concentración de fósforo en las hojas del cultivo del trigo	51
10	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la concentración de fósforo en los tallos del cultivo del trigo	53

Figura		Página
11	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la concentración de fósforo en las espigas del cultivo del trigo	54
12	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la concentración de fósforo en los granos del cultivo del trigo	56
13	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la concentración de fósforo estimada total del cultivo del trigo	57
14	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la absorción de fósforo acumulada en las hojas de trigo	61
15	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la absorción de fósforo acumulada en los tallos de trigo	63
16	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la absorción de fósforo acumulada en las espigas de trigo	64
17	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la absorción de fósforo acumulada en los granos de trigo	65
18	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la absorción de fósforo acumulada total de trigo	66
19	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la contribución de las hojas de trigo en el total de materia seca producida	71
20	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la contribución de los tallos de trigo en el total de materia seca producida	73
21	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la contribución de las espigas de trigo en el total de materia seca producida	74

Figura		Página
22	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la contribución de los granos de trigo en el total de materia seca producida	75
23	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la acumulación porcentual de materia seca total en el tiempo	79
24	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la acumulación porcentual de fósforo total en el tiempo	80
25	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de crecimiento de las hojas	83
26	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de crecimiento de los tallos	84
27	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de crecimiento de las espigas	86
28	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de crecimiento total de materia seca	88
29	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de absorción de fósforo de las hojas	90
30	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de absorción de fósforo de los tallos	92
31	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de absorción de fósforo de las espigas	94
32	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de absorción de fósforo de los granos	96
33	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la tasa de absorción total de fósforo	97
34	Ajuste a una regresión no lineal de tipo Mitscherlich de los rendimientos del cultivo del trigo bajo cuatro dosis de fertilización fosforada	101

Figura		Página
35	Variación del requerimiento interno de P (g/100g) durante el período de acumulación de biomasa del trigo bajo cuatro tratamientos de fertilización fosforada	106

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Variación en el tiempo en la producción de materia seca de los granos (kg MS/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	123
2	Variación en el tiempo en la producción de materia seca total (kg MS/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	123
3	Variación en el tiempo en la concentración de fósforo (g/100g) en granos, sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	123
4	Ajuste de la producción de materia seca de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	124
5	Ajuste de la producción de materia seca de los tallos a un modelo de distribución sigmoidea para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	124
6	Ajuste de la producción de materia seca de las espigas a una regresión no lineal de una ecuación lineal extendida para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	125
7	Ajuste de la producción de materia seca de los granos a una regresión lineal para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	125
8	Ajuste de la producción de total materia seca a un modelo sigmoideo para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	126
9	Ajuste de la absorción de fósforo de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	126
10	Ajuste de la absorción de fósforo de los tallos a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	127

Anexo		Página
11	Ajuste de la absorción de fósforo de las espigas a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	127
12	Ajuste de la absorción de fósforo total a un modelo de distribución sigmoidea para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	128

## 1 INTRODUCCION

La absorción de fósforo de las plantas a igual disponibilidad de P en el suelo es variable según el tipo de cultivo. Esta variación es dependiente del rendimiento a alcanzar, de la eficiencia de uso interno del nutriente y de la eficiencia de absorción que presenta el cultivo de adquirir el fósforo disponible en el suelo. Dentro de los cereales, el trigo es el cultivo más importante y uno de los más estudiados, debido a su alta demanda en la producción mundial de alimentos. Sin embargo, aún se requiere una mejor comprensión de la interacción suelo-fósforo-cultivo para el diseño de normas eficientes de fertilización, particularmente en los suelos derivados de cenizas volcánicas. Para ello, se requiere establecer las variaciones en la eficiencia de uso de P a través del tiempo en distintas disponibilidades de P en el suelo.

Se ha establecido que en los suelos derivados de materiales volcánicos existe una respuesta a la fertilización fosforada, pero existen pocos estudios de campo bajo distintos niveles de fertilidad fosforada en que se evalúe la dinámica del fósforo al interior de la planta y la eficiencia con que el cultivo hace uso del P. Para ello, se requiere conocer la absorción de fósforo directa desde el suelo, la reutilización o translocación de P, en que momento se producen estos fenómenos, cual es la variación con distintos niveles de disponibilidad de P a través del tiempo en función de la biomasa vegetal producida y establecer las relaciones fuente-destino para el contenido de fósforo en la planta.

El método de fertilización razonada incluye el conocimiento de estos parámetros en la determinación de una dosis de fertilización fosforada. Este método incluye las interrelaciones clima-cultivo-suelo-fertilizante y simplifica este sistema en tres componentes (demanda, suministro y eficiencia de fertilización). Dentro de la demanda se expresan las relaciones clima-cultivo, las cuales se cuantifican a través de la productividad alcanzable, índice de cosecha y requerimiento interno del nutriente. Este

método de fertilización es ampliamente utilizado en Chile (con una baja validación de sus parámetros) en los distintos agroecosistemas del país.

La hipótesis de este trabajo es que los parámetros de la demanda de P y uso interno del P del cultivo de trigo no son variables bajo las disponibilidades agronómicas usuales de fósforo.

El objetivo general de este trabajo de tesis fue determinar la variación de distintas dosis de P aplicado como fertilizantes soluble sobre las variables del cultivo del trigo relacionadas con la producción de materia seca y absorción de P.

A su vez los objetivos específicos fueron:

Evaluar la variación del crecimiento acumulado y de la tasa de crecimiento de materia seca del cultivo de trigo, tanto en sus órganos individuales como en el total de la parte aérea, en distintos niveles de fertilidad fosforada.

Evaluar la absorción y distribución del fósforo en el cultivo de trigo, la variación en las tasas de absorción de P y translocación de P producida por distintos niveles de fertilidad fosforada.

Determinar la variación de los parámetros para calcular la demanda de fósforo del cultivo de trigo (índice de cosecha, requerimiento interno de P, índice de extracción de P) y evaluar su variación en relación tratamiento de fertilización óptimo.

Determinar la eficiencia de recuperación del P del suelo por el cultivo de trigo, evaluando la variación en la eficiencia de absorción de P del cultivo en distintos niveles de disponibilidad de P inicial en el suelo.

Evaluar las variaciones de la eficiencia de uso interno del fósforo por parte del cultivo.

## 2 REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Antecedentes generales del cultivo de trigo.

El trigo es uno de los primeros cultivos domesticados para la alimentación humana y por 8.000 años ha sido el alimento base para las mayores civilizaciones de Europa, Oeste Asiático y del Norte Africano. Hoy en día el trigo es el cultivo que ocupa la mayor superficie sembrada, sobrepasando las 240 millones de hectáreas a nivel mundial (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. FAO, 2002) y continua siendo la mayor fuente de alimento para los humanos. Esta producción lidera todos los cultivos, incluyendo arroz, maíz y papas (CURTIS, 1982).

El trigo es una especie monocotiledónea, perteneciente a la familia de las poáceas (gramíneas) de ciclo anual. Todos los trigos, tomando en cuenta los silvestres y cultivados pertenecen al género *Triticum*. Existen 14 especies reconocidas de trigo que están divididas en tres subgrupos de acuerdo al número de cromosomas en sus células reproductivas en: diploides, tetraploides y hexaploides (INGLETT, 1974).

Las primeras formas de trigo recolectadas por el hombre hace más de doce mil años eran del tipo *Triticum monococcum* y *T. dicoccum*, caracterizadas fundamentalmente por tener espigas frágiles que se disgregan al madurar. Hoy en día, gran parte del trigo en el mundo es hexaploide, conocido botánicamente como *Triticum aestivum* L. em Thell, este corresponde al trigo panadero, el cual se utiliza básicamente en la producción de harina para pan y galletas. La otra especie de trigo importante a nivel mundial es tetraploide, conocida botánicamente como *Triticum turgidum* L. ssp. *durum* (Desf.) Husn., que corresponde al trigo duro o candeal, este grano puede ser de color ámbar o pardo rojizo (INGLETT, 1974).

Dos especies biológicas de *Triticum* existen para cada nivel de ploidia, entre los trigos diploides, *Triticum monococcum* que se mantiene limitado a ciertas

extensiones y su forma salvaje ssp. *aegilopoides* que es ampliamente utilizado en el medio oriente. Los híbridos resultantes entre estos son completamente fértiles (FAO, 2002).

La segunda especie de trigo diploide *T. urartu*, que se pensó ser solamente endémica para Armenia está emparentada con *T. aegilopoides*, y tiene un amplio rango de distribución en el medio oriente (FAO, 2002).

Las especies tetraploides *T. turgidum* y *T. timopheevii* se encuentran tanto en formas salvajes como cultivadas, los híbridos entre éstos son estériles, estableciéndolos como especies biológicas válidas. Por su parte, las especies hexaploides sólo se encuentran en forma cultivada, estas son el *T. aestivum* y el *T. zhukovskyi*. (FAO, 2002)

El origen del actual trigo cultivado se encuentra en la región asiática comprendida entre los ríos Tigris y Eufrates, habiendo numerosas gramíneas silvestres comprendidas en este área y emparentadas con el trigo. Restos carbonizados de granos de trigo e impresiones de estos en arcilla cocida al horno encontrados en el sitio neolítico de Jarno en el noreste de Iraq y datados con radiocarbono, demostraron que estos restos vegetales estaban alrededor del año 6.700 AC. (INGLETT, 1974).

Por su parte, investigaciones mas recientes (ZOHARY y HOPF, 1993) han descubierto que en algunos sitios arqueológicos ubicados en Siria se encontraron restos de *T. turgidum* ssp. *dicoccum*, los cuales databan de alrededor de 7.500 años AC. Al igual que en la región montañosa al sureste de Turquía donde se encontraron restos de *Triticum monococcum* ssp. *aegilopoides*, los cuales databan de alrededor de 7.500 a 6200 años AC. (HEUN, *et al.*, 1997).

**2.1.1 Trigo en Chile.** El cultivo del trigo es uno de los más tradicionales dentro de la agricultura chilena, sus inicios se remontan con la llegada de los españoles en el siglo XVI.

En el año 1.541 se realizó la primera siembra de aproximadamente un kilogramo de semilla la cual se llevó a cabo en el valle del río Mapocho, cerca de la ciudad de Santiago. Con la cosecha de ésta se obtuvo alrededor de 500 kg. (Encina, sf.citado por MELLADO, 1998).

El trigo durante el siglo veinte se ha sembrado desde la Tercera hasta la Décima Región, con grandes fluctuaciones en el área sembrada y en el rendimiento promedio nacional. (MELLADO, 1998).

En los tres primeros decenios del siglo la superficie aumentó significativamente, para mantenerse sobre las 700.000 hectáreas. Sin embargo, desde el decenio 1971-1980 en adelante la superficie de trigo ha disminuido a un ritmo de 10.000 hectáreas anuales, hasta llegar a un promedio de 407.000 hectáreas en los últimos seis años (MELLADO, 1998).

Según IRARRAZAVAL (1979), los rendimientos entre los años 1935 y 1978 estuvieron en función del precio de los fertilizantes, y que la superficie sembrada en ese período varió según la rentabilidad o utilidad económica esperada.

Desde la década de los noventa, los rendimientos en nuestro país han ido aumentando notoriamente, situando los promedio nacionales por sobre los 3500 kg ha<sup>-1</sup>. Según MELLADO (1998), esta situación se atribuye en mayor medida a las nuevas variedades de trigo, ya que para la Asociación Nacional de Productores de Semilla, en Chile se habrían liberado mas de 200 variedades en el siglo veinte.

Por su parte, los rendimientos promedios varían dependiendo del tipo de agricultura y de agroecosistema, así en la agricultura de riego el rendimiento alcanzable promedio es de 8000 kg ha<sup>-1</sup>, a su vez en los suelos de tipo trumao de valle es de 7000 kg ha<sup>-1</sup>, en el Secano Costero de 6000 kg ha<sup>-1</sup>, los rojos arcillosos alrededor de 5000 kg ha<sup>-1</sup> y en el Secano Interior es de sólo 4000 kg ha<sup>-1</sup> (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

**2.1.2 Importancia.** El trigo se encuentra dentro de los cinco cultivos de mayor producción a nivel mundial, esto se explica ya que de éste se producen harinas, las cuales son base para la preparación de gran parte de la alimentación mundial.

El trigo también resalta, según MELLADO (1998), por el suministro de energía por persona que en Chile en el período 1982-1990, era de 2494 calorías y como en ese mismo período la ingesta calórica proveniente del trigo fue de 841 calorías por persona, se deduce que la contribución de este cereal al suministro de energía fue alrededor de un 34%, lo cual es muy similar al período comprendido entre los años 1991-1996. En esta misma publicación se hace mención al aporte proteico el cual era de un 63% en la década 1971-1980, la cual bajó a un 50% en el período 1991-1996.

**2.1.3 Descripción botánica.** El trigo es una especie poácea (gramínea). Su sistema radical está compuesto de dos tipos de raíces, las raíces seminales y las raíces coronarias (adventicias y las raíces de la corona) las raíces seminales son las primeras en desarrollarse junto con la radícula, luego las coronarias que se desarrollan inicialmente a partir de la corona ubicada en el subnudo correspondiente al punto de unión del mesocotilo con el coleoptilo (KIRBY, 1994).

La parte aérea se compone de una serie de unidades repetidas o fitómeros, cada uno potencialmente teniendo un nudo, una hoja, un entrenudo alargado y un brote en la axila de la hoja. Una hoja se inserta en cada nudo, las hojas basales usualmente mueren e incluso terminan por desaparecer (FAO, 2002).

Desde el eje principal, dependiendo de las condiciones de cultivo, pueden originarse varios macollos; éstos, luego de desplegar la tercera a cuarta hoja, generan su propio sistema de raíces adventicias. Los macollos, por lo tanto, aunque formando siempre parte de la planta que los originó, comienzan a independizarse progresivamente de ésta, hasta llegar a comportarse como una planta individual. Estos tienen su origen en

la base de la planta a partir de una yema que da lugar al crecimiento de ellos (FAIGUENBAUM, 1987).

El número total de macollos por planta puede llegar hasta veinte, dependiendo fundamentalmente del cultivar, fertilidad del suelo, fecha de siembra, densidad de población, competencia ejercida por las malezas y del abastecimiento hídrico (FAIGUENBAUM, 1987).

Las inflorescencias corresponden a espigas, están compuestas por 15 a 25 espiguillas; éstas son sésiles y se presentan dispuestas en torno a un raquis. Cada espiguilla presenta externamente dos brácteas denominadas glumas y contiene tres a cinco antecios dispuestos sobre una raquilla. Cada uno de los antecios se compone de una lemma o glumela inferior, de una pálea o glumela superior y de una flor. Normalmente uno a dos antecios son estériles, generándose un máximo de dos a cuatro flores fértiles en cada espiguilla. En algunos cultivares las lemmas se prolongan en forma de arista, originándose espigas barbadas. (KIRBY, 1994; FAO, 2002).

Cada flor está compuesta por tres estambres y por dos estigmas plumosos que nacen directamente del ovario; en la base de la flor se encuentran dos estructuras transparentes llamadas lodículas o glumélulas; todas las estructuras de la flor se encuentran protegidas por dos brácteas: lemma, la más externa y pálea, la más interna. La flor, que presenta autopolinización, proyecta sus estambres al exterior del antecio una vez que ha ocurrido la antesis (KIRBY, 1994; FAO, 2002).

La semilla de trigo es parte de un fruto llamado cariósipide, en el cual las paredes del ovario (pericarpio) y la testa, están estrechamente unidas siendo inseparables. El fruto es de carácter indehiscente y contiene una sola semilla (FAO, 2002).

**2.1.4 Variedades de trigo.** De acuerdo a los requerimientos de frío (vernalización) y horas de luz (fotoperíodo) los trigos se clasifican en tres tipos.

- Trigos Invernales. Poseen crecimiento inicial rastrero y un largo período vegetativo. Necesitan vernalización para espigar, es decir, estar sometido durante algunos períodos a bajas temperaturas ( $0^{\circ}$  a  $10^{\circ}$  C), entre siembra y macolla, para inducir el espigado (MELLADO, 2001).
- Trigos Primaverales. Tienen crecimiento inicial erecto y corto período vegetativo, y no requieren vernalización (MELLADO, 2001).
- Trigos de hábito Alternativo. Tienen su origen en el cruzamiento entre trigos de invierno y de primavera. Son de crecimiento inicial semirrecto y de período vegetativo intermedio en relación con los invernales y primaverales (MELLADO, 2001).

**2.1.5 Aspectos agroclimatológicos.** El trigo se adapta a una gran gama de climas, pero las condiciones ideales se encuentran en las zonas templadas, con inviernos bien marcados y temperaturas en alza hacia la etapa reproductiva. Una buena germinación se logra con temperaturas iguales o superiores a  $3$  o  $4^{\circ}$  C, pudiendo incluso germinar con temperaturas de  $0^{\circ}$  C. Dependiendo de la temperatura del suelo en el momento de la siembra, la emergencia puede demorar en promedio entre  $12$  y  $18$  días. El trigo resiste las heladas durante todo el período vegetativo, pero no así durante el periodo reproductivo, por ello las Regiones V, VI y Metropolitana deben evitarse las siembras en el mes de abril, ya que las variedades primaverales que son las que se siembran en esa zona, pueden espigar temprano en septiembre, quedando expuestas a una helada. En las Regiones IX y X ninguna variedad debería espigar antes del  $10$  ó  $15$  de noviembre y por ello las variedades de primavera no pueden ser sembradas en otoño (FAIGUENBAUM, 1987).

**2.1.6 Requerimientos hídricos.** Es importante mantener la humedad entre los primeros 30 cm. de suelo, ya que entre el 50 a 69% de sus requerimientos de agua están en esta estrata de suelo, debido a que en esta zona se ubica alrededor del 75% de la masa radicular de la planta (MELLADO, 2001). Esto no significa que esta especie pueda absorber agua a mayores profundidades desde donde puede obtener toda el agua necesaria (EVANS, 1996) Las necesidades de agua para el trigo van aumentando desde el mes de octubre hasta diciembre, debido a su rápido desarrollo y crecimiento, que coincide con las etapas de encañado, espigado y formación del grano. Aunque los cultivos deben disponer de humedad aprovechable en el suelo durante todo su ciclo de crecimiento, hay períodos más críticos que otros (MELLADO, 2001).

En trigo se ha determinado que el riego que da mayor beneficio en términos de grano es el que aplica entre el espigado y la floración. (MELLADO, 2001)

**2.1.7 Requerimientos de suelo.** Si bien el cultivo se adapta a una gran gama de suelos, las mejores respuestas se obtienen en suelos planos, fértiles, de texturas medias, de buen drenaje y con altos contenidos de materia orgánica. La falta de aireación y la humedad a saturación, que son condiciones que normalmente se producen durante el desarrollo de las plantas producen una disminución de los rendimientos. Sin embargo, el cultivo del trigo tolera mejor la humedad que otros cultivos como leguminosas de grano que se siembran en la misma época como la arveja y la lenteja (FAIGUENBAUM, 1987).

Según FAIGUENBAUM (1987), el trigo se puede adaptar desde pH 5,5 a 7,0. Por su parte RODRIGUEZ *et al.* (2001) señalan que el trigo es un cultivo tolerante a la acidez teniendo pH 5,4 como crítico y un valor de pH 5,6 a alcanzar independiente del tipo de suelo.

**2.1.8 Época de siembra.** En la zona de riego de las Regiones V, VI y Metropolitana, la época recomendada comprende los meses de mayo a junio y la primera quincena de julio (FAIGUENBAUM, 1987).

En las Regiones VII y VIII se siembran básicamente trigos alternativos y también primaverales. En el caso de los alternativos para la zona de riego, en lo general, se recomienda efectuar las siembras de mayo y hasta el 15 de julio, en tanto en secano la época es desde fines de abril hasta fines de junio, para los trigos primaverales las siembras pueden prolongarse hasta el mes de agosto (FAIGUENBAUM, 1987).

Para las Regiones IX y X la siembra va desde abril hasta fines de agosto, dependiendo de la precocidad de la variedad. Los invernales se siembran entre el 15 de abril y el 30 de junio y los alternativos entre mayo y agosto (FAIGUENBAUM, 1987).

## **2.2 Fertilización.**

La forma de determinar las necesidades de fertilización de los cultivos se ha hecho en base a los resultados de la experimentación de distintas dosis de fertilizantes en condiciones de campo. Este pensamiento obliga a que debe existir una intensa cobertura de la superficie dedicada a los distintos cultivos con experimentos para obtener resultados con un mínimo de precisión para poder así abarcar la gran variabilidad del clima, de los suelos y del manejo. De esta manera RODRIGUEZ (1993), propuso un método en el cual se establecen los principios de la nutrición de los cultivos y con estos se explica la respuesta de los cultivos a la fertilización.

**2.2.1 Método racional.** Bajo el concepto del método racional, la fertilización de los cultivos se enmarca dentro de las interacciones del subsistema ecológico con el subsistema de cultivos o pecuario que se encuentra en un determinado ámbito socio-económico, de esta manera el potencial productivo, dado por su condición genética, está sólo limitado por las características físicas del agroecosistema y por su manejo (RODRIGUEZ, 1993).

De esta manera va a existir una demanda de nutrientes para satisfacer sus necesidades metabólicas y estructurales, la cual va a estar en respuesta a la biomasa que el cultivo alcance en un determinado agroecosistema. La demanda de nutrientes por parte de los cultivos, en especial fósforo y nitrógeno no es satisfecha por el suministro de nutrientes que es capaz de entregar el suelo, con lo cual se produce un déficit nutricional del cultivo, por lo tanto, el objetivo de la fertilización es satisfacer el déficit nutricional para poder establecer la producción que se pueda alcanzar en un determinado agroecosistema (RODRIGUEZ, 1993).

Según lo descrito anteriormente, el mismo autor formula estos parámetros expresándolos en la siguiente ecuación matemática.

$$DF = \frac{Dnc - Sns}{Ef} \quad (2.1)$$

donde,

$DF$  = Dosis de fertilizante

$Dnc$  = Demanda de nutriente del cultivo

$Sns$  = Suministro de nutriente del suelo

$Ef$  = Eficiencia fertilización

**2.2.2 Demanda de fósforo.** La demanda de fósforo se entiende como la cantidad de P requerida por un cultivo para alcanzar cierta productividad, la cual va a depender de las relaciones existentes en un determinado sistema productivo suelo-clima y el cultivo en cuestión.

A medida que los cultivos se van desarrollando, estos van generando una demanda de nutriente, la cual se utiliza para satisfacer sus procesos metabólicos. Esta demanda es variable para cada cultivo, la cual va a depender del potencial genético que ellos tengan, por lo tanto, el como se exprese éste potencial va a depender del clima,

suelo y nivel tecnológico utilizado. Dicho de otra manera, la demanda, en este caso del fósforo; va a depender del rendimiento a alcanzar del cultivo y de su requerimiento interno (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

2.2.2.1 Rendimiento a alcanzar. La productividad a alcanzar es el rendimiento posible de obtener dependiendo de las condiciones del agroecosistema, este rendimiento potencial se ve claramente reflejado a través de dos tasas: la tasa de crecimiento y la tasa de desarrollo del cultivo (PINOCHET, 2000). La primera definida como la ganancia de peso o aumento de volumen de la planta en totalidad o en sus órganos individuales y la segunda como el desarrollo fonológico del cultivo en el cual se observa el paso de una fase vegetativa a una fase reproductiva a través de la aparición de distintos órganos. Es importante definir bien este parámetro ya que una mala estimación del rendimiento alcanzable se traducirá finalmente en una demanda del cultivo que puede estar sub o sobrestimada (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

2.2.2.2 Requerimiento interno. Se define como la concentración mínima óptima de nutriente en la materia, que permite realizar las funciones estructurales y metabólicas requeridas por el cultivo. Este parámetro es variable a través del tiempo en los nutrientes móviles (N, P, K, Mg, Mo y Cl), pero relativamente constante en los nutrientes inmóviles (Ca, Fe y B) (PINOCHET, 2000). Este parámetro es determinado en el momento de cosecha y representa la concentración del nutriente por unidad de materia seca total producida. En Chile se ha determinado que el requerimiento interno del fósforo en trigo es de 0,17 % (RODRÍGUEZ, 1993).

La concentración de fósforo en el tejido de plantas anuales generalmente disminuye a medida que la planta avanza en sus estados de desarrollo (RACZ, *et al.* 1965; BÉLANGER y RICHARDS, 1999), al igual que las concentraciones críticas de nutrientes o requerimiento interno (BÉLANGER y RICHARDS, 1999). De esta manera, las concentraciones más altas de fósforo se requieren en los estados de crecimiento temprano.

La concentración de fósforo disminuye con el tiempo en las plantas anuales porque como la planta madura, una proporción del aumento de su peso seco está compuesto de fósforo estructural y de los tejidos de almacenaje (ELLIOTT *et al.*, 1997a).

Existen también otros parámetros que es necesario determinar para poder realizar una estimación de la absorción total de un cultivo, como son el índice de cosecha y la humedad de cosecha (PINOCHET, 2000).

2.2.2.3 Índice de cosecha. El índice de cosecha es una medida de eficiencia, la cual corresponde a la producción de materia seca del cultivo que esta en el producto cosechado versus la cantidad total de materia seca producida por el cultivo (PINOCHET, 2000). Según RODRIGUEZ (1993) este parámetro se determina a través de la siguiente expresión.

$$IC = \frac{MS_{PC}}{MS_{PA} + MS_{PC}} \quad (2.2)$$

donde,

$IC$  = Índice de cosecha (kg/kg).

$MS$  = Materia seca (kg/ha).

$PC$  = Producto cosechado

$PA$  = Parte aérea.

Por lo tanto, matemáticamente la demanda de fósforo de los cultivos se puede expresar mediante la siguiente formulación:

$$DP = \frac{PA*(1-HC)*RIP}{IC} \quad (2.3)$$

donde;

$DP$  = Demanda de fósforo (kg P/ha).

$PA$  = Productividad a alcanzar (qm/ha).

$HC$  = Humedad de cosecha (%).

$RIP$  = Requerimiento interno de P (%).

$IC$  = Índice de cosecha.

**2.2.3 Suministro de fósforo.** Para poder tener una visión más clara de la forma en que se encuentra el fósforo en el suelo, éste se ha representado bajo un esquema funcional en tres fracciones; pool de fósforo en solución, el cual corresponde al fósforo que las raíces pueden absorber durante su ciclo de crecimiento, la concentración del fósforo en la solución es muy baja y oscila entre 0,006 y 0,03 ppm; pool lábil de fósforo, este se encuentra adherido a superficies de la fase sólida del suelo que se encuentran en un rápido equilibrio con el fósforo en solución; Pool no-lábil de fósforo o fracción pasiva, es el resultado de reacciones de adsorción en que el fósforo queda retenido en el interior de las arcillas y de óxidos de Fe y Al, de precipitaciones muy insolubles y de reacciones ligadas a la materia orgánica muy estabilizadas en el suelo. El pool de fósforo no lábil tiende a una relación de equilibrio con el pool de fósforo lábil, la cual es lenta, pero no con el fósforo en solución. (RODRIGUEZ, 1993; RODRÍGUEZ *et al.*, 2001; MENGEL y KIRKBY, 1982).

El fósforo en solución se encuentra en dos formas disponibles para la planta;  $H_2PO_4^-$  y  $HPO_4^{2-}$  y la concentración en la cual estén presentes éstos va a depender del pH que presente el suelo, con valores de pH mayor a 7.2 se hace presente la forma  $HPO_4^{2-}$  y a su vez a pH menor a 7,2 incrementa su concentración la forma  $H_2PO_4^-$  (MENGEL y KIRKBY, 1982).

Para poder medir directamente el fósforo activo de un suelo se ha conducido a la utilización de un índice de esta fracción que corresponde al fósforo extractable por el método Olsen ( $\text{NaHCO}_3$ , pH 8,5). El valor de P extractable Olsen (ppm) representa la proporción del P activo del suelo que correlaciona con el P absorbido por los cultivos. De este modo el P Olsen es un indicador de la disponibilidad de P del suelo (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

Aunque un mismo valor de P-Olsen indica la misma disponibilidad de fósforo para los cultivos en distintos suelos, este valor representa distintas cantidades de fósforo activo. Esto se debe a que la cantidad de fósforo retenido como fósforo no extractable Olsen es variable, dependiendo de la capacidad de retención de fósforo de los distintos grupos de suelos (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001). Inmediatamente después de una aplicación de P al suelo, el P extractable Olsen comienza a disminuir a través del tiempo debido a las reacciones de adsorción hacia el interior de la matriz coloidal. Esta disminución del fósforo extractable Olsen trae consigo un incremento del fósforo no extractable Olsen y en consecuencia la dificultad de los cultivos para absorber el P activo del suelo. La fracción residual de P aplicado que permanece como P extractable Olsen en el tiempo ha sido descrita con una función potencial, la cual es dependiente del tiempo y temperatura e independiente del tipo de suelo y de la cantidad de P aplicado. Ésta refleja el envejecimiento del P aplicado (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

$$K = (1+t)^{-0.149} \quad (\text{a } 25^\circ \text{ C}). \quad (2.4)$$

Finalmente el suministro de fósforo del suelo depende, fundamentalmente de dos parámetros del sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante; la disponibilidad de P-Olsen en el suelo y la eficiencia de absorción radicular de P del cultivo o grupo de cultivos (RODRIGUEZ *et al.*, 2001).

Por su parte, el cultivo no es capaz de recuperar todo el fertilizante agregado, ya que éste sufre diversas pérdidas en su interacción con el suelo, lo cual lleva a considerar una cierta eficiencia de la fertilización de los cultivos en los distintos agroecosistemas. En esta eficiencia se considera interacciones suelo-fertilizante como cultivo-fertilizante (RODRIGUEZ, 1993).

2.2.3.1 Eficiencia de la fertilización fosforada. Sólo una parte del P aplicado en la fertilización fosforada es recuperado por el cultivo. La parte que no es recuperada es equivalente a la fracción de P aplicada no extractable P-Olsen, y corresponde a la reacción rápida inicial de adsorción de P en la superficie de la matriz coloidal. El tamaño de la fracción de P aplicada no extractable P-Olsen, depende de la capacidad de retención del P del suelo. A una mayor capacidad de retención del P del suelo, menor será la fracción de P del fertilizante aplicado que quede disponible durante la temporada del cultivo (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

La capacidad de retención de fósforo (cp) es un parámetro independiente de la cantidad de P aplicado, está expresado en ppm P que permanecen lábiles (P-Olsen) por ppm de P agregados. Este índice está muy correlacionado con el aluminio extractable del suelo a diferencia del pH (RODRIGUEZ, 1993).

$$cp=2,86 * (Al\ extractable)^{-0,469} \quad (2.5)$$

Para expresar el índice de retención de P en kg P/ha aplicados por ppm de P extractable Olsen, se considera la densidad aparente del suelo y la profundidad del muestreo (kg de suelo por ha a 20 cm. de profundidad). A este parámetro se le denominó Factor de retención de P. Este factor permite estimar la distinta cantidad de kg P/ha a aplicar para obtener 1 ppm P extractable Olsen en suelos con diferente capacidad de retención de P. A su vez refleja la cantidad de P retenido en la fracción P no extractable

Olsen del P activo del suelo por ppm de P extractable en distintos grupos de suelos, inmediatamente después de la aplicación de P (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

$$FCO = \frac{Pr\ of * Da}{cp\ (ppm / ppm)} \quad (2.6)$$

2.2.3.2 Eficiencia de absorción de fósforo. La eficiencia de absorción de P del cultivo determina la recuperación del P del fertilizante aplicado, es decir, sobre la eficiencia de fertilización que es propia del tipo de suelo y de la forma de aplicación está la eficiencia de absorción, la cual va a estar directamente relacionada con el tipo de cultivo. Esta diferencia que se produce entre los cultivos en la eficiencia de absorción se debe a la baja movilidad del P en el suelo. Cada cultivo de acuerdo a las características de su sistema radicular, tiene la capacidad de explorar diferentes volúmenes de suelo y, por tanto, interceptar zonas de alta concentración de P activo dadas por los gránulos de fertilizantes. En condiciones naturales (suelos sin historial de fertilización con P) el P activo corresponde sólo a zonas de alta concentración, debidas a la intemperización de los minerales primarios de suelo como a la apatita, generalmente escasos. El mayor o menor volumen de suelo explorado por las raíces, depende de la densidad radicular de los cultivos, que se mide como longitud de raíces (cm.) por volumen de suelo explorado (cm<sup>3</sup>) (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

En cualquier suelo que se presente una limitación en el desarrollo radicular se afecta la eficiencia de absorción. También, factores que alteran el transporte del fósforo de la solución a la superficie de las raíces pueden afectar la eficiencia de absorción. Así el manejo del régimen hídrico del suelo, las condiciones físicas del excesivo laboreo en los cultivos permanentes, las deficiencias de otros nutrientes, modifican la eficiencia de absorción de los cultivos así como también la producción máxima alcanzable RODRIGUEZ (1993).

### **2.3 Nutrición fosforada del cultivo de trigo.**

Según BATTEN (1992), la alta productividad de cereales a través del mundo está sustentada en la fertilización. De esta forma, se corrigen deficiencias naturales de ciertos elementos en el suelo, como el caso del fósforo, y adicionalmente devolver al suelo los elementos retirados producto de la exportación producida por la cosecha de los cultivos (BATTEN, 1992). Para conocer los requerimientos de P del trigo es necesario determinar la absorción de P que realiza el cultivo. La absorción de P del cultivo es dependiente a su vez de la productividad del cultivo y de la concentración de P en los tejidos en cada uno de los estados fenológicos. Ambos parámetros determinan la eficiencia interna de uso del nutriente, lo cual es dependiente de la acumulación y posterior translocación de P desde los órganos de fuente hacia el grano, todo lo cual se refleja en el requerimiento interno de P.

**2.3.1 Efectos de la nutrición fosforada en la productividad de materia seca del trigo.** Se ha establecido que el trigo es un cultivo muy sensible a las deficiencias de fósforo, sobre todo durante las primeras semanas de su crecimiento, necesitando absorber grandes cantidades durante sus primeros estados de desarrollo (WALDREN y FLOWERDAY, 1979), para sostener la tasa de producción de materia seca inicial.

RÖMER y SCHILLING (1986) estudiaron la producción de materia seca y la absorción de fósforo en las raíces y parte aérea de las plantas de trigo, en estudios de invernadero, y determinaron que al momento en que las raíces han alcanzado la máxima producción de materia seca, la parte aérea sólo se ha desarrollado en un 35%; también, observaron que cuando el fósforo ha sido absorbido en un 50-60% del total por las plantas, la parte aérea se ha desarrollado solamente en un 20-35% del total de su materia seca.

Los mismos autores, agregan que cuando el fósforo se ha absorbido hasta el estado 9 en la escala de Feekes (estado de embuchamiento), se produce la mayor contribución por unidad de fósforo absorbido en la producción de materia seca,

obteniéndose con ello los mayores rendimientos. Un parámetro altamente utilizado para describir los efectos del P absorbido sobre la productividad de materia seca, es la eficiencia de uso de P (UEP) que representa los kg MS/ha producidos por kg P/ha absorbido.

Las plantas que producen mayor biomasa aérea no necesariamente son las que presentan una mayor eficiencia de uso de P, ya que estas plantas pueden contener una gran cantidad del nutriente en sus tejidos sin que necesariamente implique una mayor productividad (Clarke *et al.*, 1982a, 1982b, citado por CARRASCO, 1992). De esta forma, parece existir una concentración mínima de fósforo que maximiza la productividad de materia seca, ya que una planta en condiciones ligeramente restrictivas de fósforo podría presentar una gran actividad metabólica radicular y foliar y una gran capacidad de utilización y de reutilización de los nutrientes absorbidos. En un estudio realizado por CLARKE *et al.* (1990) midieron la eficiencia de uso de P en dos estados de desarrollo de la planta (antes y madurez de cosecha de la parte aérea y granos) y bajo dos condiciones de manejo, con riego y sin riego, encontrando que las mayores eficiencias se presentaron al momento de la cosecha del cultivo y en los ensayos no irrigados. Por su parte, en otro estudio (BARRIGA *et al.*, 1998), describieron la eficiencia de utilización del P en los granos, para distintos genotipos de hábito de crecimiento primaveral y la influencia de dos dosis fosforadas. Se determinó que la variación de la eficiencia de utilización de P entre los genotipos era mayor a la producida en cada genotipo por la dosis de P aplicada.

**2.3.2 Efectos en la distribución de la materia seca.** Una pregunta frecuente es si la nutrición fosforada afecta la distribución de materia seca del cultivo de trigo, tanto en deficiencia como en exceso de P disponible para el cultivo. Se ha establecido que el efecto principal de las deficiencias de P, claramente evidenciado en las etapas tempranas de desarrollo, es sobre la producción o el rendimiento final del cultivo. Ello se produce porque se afecta directamente y principalmente el crecimiento de las espigas de los

macollos y en forma secundaria, el número de granos por espiga y el peso del grano (ELLIOTT *et al.*, 1997a).

ELLIOTT *et al.* (1997a) han mostrado que las deficiencias de fósforo parecen afectar la distribución del peso seco dentro de la parte aérea del trigo, cuando se comparan tratamientos en una misma fecha calendario. Estos autores, encontraron que las hojas con moderada y severas deficiencias de fósforo tenían una mayor participación en el peso seco total de la planta. Estas diferencias se hacían más evidentes a medida que avanzaban los estados de desarrollo del cultivo. Esto fue atribuido a un retraso en las fases de desarrollo de las hojas y también a un retraso en la producción de tallos. Sin embargo, al comparar individualmente cada planta en función de sus estados de desarrollo, se determinó que no existió diferencia en la distribución de la materia seca (ELLIOTT *et al.*, 1997a).

De esta forma, parece ser que no existiría un efecto directo en la distribución de la materia seca. Se considera, como descripción general para el cultivo del trigo, que de su peso seco total a través de su ontogenia, cerca del 100% de la parte aérea del trigo corresponde a las hojas en sus primeros estados de desarrollo; que en el estado de hoja bandera extendida, a medida que la planta se va desarrollando, las hojas constituyen el 50% de su peso seco y al llegar a antesis solo cerca del 20% de la materia seca (BAUER *et al.*, 1997b).

**2.3.3 Efectos de la nutrición fosforada sobre el índice de cosecha (IC).** El índice de cosecha corresponde a una relación entre la parte cosechada en materia seca en relación al total de la materia seca producida en la parte aérea (EVANS, 1996). Este parámetro es útil para estimar el total de biomasa aérea producido conociendo la biomasa seca de grano producida. Se ha postulado que este es un parámetro relativamente constante en función de la disponibilidad de fósforo para una variedad, si no se consideran situaciones en las cuales IC puede variar con la variedad y con la localidad reflejando

situaciones como temperaturas muy extremas, fuertes ataques bióticos o sequías extensamente prolongadas.

En los experimentos de campo de ELLIOTT *et al.*, (1997a) en Australia, en cuatro localidades, durante dos años diferentes y usando distintos niveles de disponibilidad fosforada (11 en un año y 12 en el otro), se determinó que la variedad Halberd, varió su índice de cosecha solo de un valor de 0,43 a 0,49m en la localidad Avon, con un valor modal de 0,45 y que en las localidades Lameroy y Coonalpin, el IC del mismo cultivar varió entre 0,31 y 0,37 siendo su valor modal de 0,35. Estos resultados muestran que las distintas disponibilidades de fósforo para el cultivo, no afectaron mayormente la variación del índice de cosecha y que la mayor variación se produce por el efecto localidad. Sin embargo, en condiciones de muy bajos niveles de P el IC puede ser afectado tal como ha sido mostrado por EGGLE *et al.* (1999). En el estudio de campo de EGGLE *et al.* (1999), en México, se evaluaron trigos de hábito de crecimiento primaveral correspondiendo a tres genotipos o líneas modernas respecto a una variedad mexicana antigua (Curinda) observando IC bajos en todos los genotipos para el tratamiento sin aplicación de fertilización fosforada, los cuales tenían un nivel de disponibilidad de P que fluctuaba entre 3 a 3,7 ppm P-Olsen, resultados que sugieren que en suelos extremadamente deficientes de P afectarían los índices de cosecha.

En un estudio realizado en Chile por BARRIGA, (1974) en el cual utilizó nueve variedades de trigo, en la misma localidad se determinó un valor modal del IC de 0,43 y que la mayor variación se produjo en forma inversamente proporcional entre una mayor altura del cultivar y un menor IC.

**2.3.4 Efectos de la nutrición fosforada en la tasa de crecimiento.** ELLIOTT *et al.* (1997a) determinaron que las tasas de crecimiento, tanto de los órganos como de parte aérea total del trigo, se veían disminuidas y retrasadas a medida que disminuía la disponibilidad de fósforo. Sus resultados fueron similares a los reportados por Cartwright *et al.* (1974) citado por ELLIOTT *et al.* (1997a) y mostrarían que la tasa

fotosintética, entre otros factores, estaría gobernada por la nutrición fosforada en la planta. De esta manera, tasas de crecimiento subóptimas son el resultado de un mecanismo adaptativo a la deficiencia de P, ya que disminuiría los requerimientos de P y se ajustarían a la baja disponibilidad presente en suelos deficientes de P.

EGLE *et al.* (1999) midieron el efecto de la fertilización fosforada sobre la tasa de crecimiento del trigo en tres estados de desarrollo del cultivo (macollaje a antesis, antesis, antesis a madurez) observando que entre macollaje a antesis y entre antesis a postantesis las tasas de crecimiento de la parte aérea del trigo se afectan aumentando con la fertilización fosforada; sin embargo, entre postantesis y madurez no se observó un aumento en las tasas de crecimiento de la parte aérea producto de la fertilización fosforada.

#### **2.4 Concentración de fósforo.**

La relación entre una cantidad de fósforo (kg P/ha) presente en la parte aérea por unidad de materia seca producida (kg MS/ha) se expresa a través de la concentración de fósforo en los tejidos. Esta concentración es dependiente de las necesidades de formación de productos carbonados que son dominados por la ontogenia del cultivo (GREENWOOD *et al.*, 1995). De esta forma, es considerado que la formación de proteínas produce un alto requerimiento de nutrientes minerales (especialmente N, P, S) y otros carbohidratos (lignina, celulosa y hemicelulosa) como de menor requerimiento de éstos nutrientes. Por ello, es interesante conocer como varían los requerimientos nutricionales de P a través de la ontogenia y de los órganos del cultivo. En general, independientemente de la ontogenia, la concentración en la parte aérea de las plantas aumenta con el aumento de la disponibilidad de fósforo en el suelo (ELLIOTT *et al.*, 1997b). Este mismo autor ratifica que a medida que el cultivo se va desarrollando, aumentando su biomasa, la concentración de P en el total de la parte aérea del cultivo va disminuyendo (ELLIOTT *et al.*, 1997b). Este comportamiento general de la parte aérea del trigo, también ocurre en sus órganos utilizados como fuente de los asimilados. Así, al analizar la variación de la concentración de P en los órganos por separado, se ha

observado que las hojas y los tallos disminuyen la concentración de P con el aumento de biomasa, a través del desarrollo del cultivo (BAUER *et al.*, 1987c). Sin embargo, esto no quiere decir que las curvas entre hojas y tallos sean iguales. La variación de la concentración en cada órgano es dependiente de los requerimientos de compuestos carbonados que se formen en ellos y la capacidad que tiene el tejido para exportar hacia otros órganos los carbohidratos almacenados. Así, por ejemplo, en un experimento realizado en Dakota del Norte (USA) en trigo primaveral, la concentración de P de los tallos fue mayor que la de las hojas hasta espigadura; posterior a este período, las hojas tuvieron una concentración de P ligeramente mayor o igual que la de los tallos (BAUER *et al.*, 1987c), mostrando los efectos producidos por la translocación de compuestos carbonados con P desde los tejidos fuentes.

**2.4.1 Concentración de fósforo en el grano.** Los granos son el destino de los carbohidratos producidos por la planta y representan el tejido que es privilegiado por el cultivo en su destino reproductivo. La concentración de P en el grano del trigo ha sido ampliamente estudiada en numerosas publicaciones, debido a la gran importancia que tiene en la semilla un elevado contenido inicial de P, durante los primeros estados de desarrollo del cultivo. En diversos estudios se ha mostrado que la concentración de P en los granos varía entre 0,23 y 0,42%. Dentro de los factores que determinan esta variación están la nutrición fosforada del cultivo, el régimen hídrico, la especie de cultivo y el hábito de crecimiento del cultivo. De esta forma, siembras de trigo panaderos realizadas en el sur de Australia mostraron una concentración de fósforo en el grano al momento de su madurez de 0,23% (ZUBAIDI *et al.*, 1999). Otro estudio realizado igualmente en Australia por BATTEN (1994) determinó que las concentraciones oscilaron entre 0,25 y 0,28%, utilizando las variedades Prime Hard, Australian Hard, Australian Standard White, Australian Soft. Presentando que las concentraciones obtenidas fueron más bajas a las reportadas por otros autores en Norteamérica y el Reino Unido, donde usualmente las concentraciones reportadas son mayores a 0,30%. Similarmente, CLARKE *et al.*, (1990) en un estudio en Canadá, mostraron concentraciones de P en el grano que fluctuaban entre 0,30 y 0,42% y estas

concentraciones estaban directamente relacionadas a una buena disponibilidad de fósforo a etapas tempranas de su desarrollo. Esto fue corroborado por CAMPBELL *et al.*, (1990), quienes determinaron diferencias en la concentración de P en el grano al hacer estudios con y sin irrigación, teniendo concentraciones entre 0,15 y 0,18% sin irrigación y entre 0,38 y 0,58% con irrigación. A su vez BATTEN (1992) analizó las concentraciones de P en el grano en distintas estaciones de crecimiento y con distintas aplicaciones de fósforo, encontrando que la variación de la concentración de P oscilaba entre 0,16 y 0,27%. Este último autor, sugiere que las mayores dosis producen mayores concentraciones en el grano, aunque no necesariamente se traduzcan en mayores rendimientos (consumo de lujo).

**2.4.2 Requerimiento interno de fósforo.** El requerimiento interno de fósforo es la concentración mínima óptima del nutriente demandado por el cultivo para su óptimo crecimiento y con el objetivo de determinar la absorción total del cultivo en su parte aérea se evalúa al momento de cosecha del cultivo (RODRIGUEZ *et al.*, 2001). En términos generales, corresponde a la concentración de P promedio ponderada del cultivo a través de sus estados de desarrollo y crecimiento. La evaluación de su variación a través del tiempo se debe realizar en experimentos de fertilización P, eligiéndose los tratamientos de dosis más cercanos al óptimo de productividad alcanzado por el cultivo y que no reflejen deficiencia o exceso de nutrición fosforada. Usualmente, el requerimiento interno declina con el tiempo, puesto que las plantas avanzan en edad o desarrollo aumentando la biomasa de menor requerimiento de nutrientes, es decir, mayor contenido de carbohidratos estructurales que carbohidratos del contenido celular (ELLIOTT *et al.*, 1997b). En un estudio realizado en Australia por ZUBAIDI *et al.* (1999) se determinó la variación de éste parámetro para trigos panaderos y candeales, encontrando que la variación entre los trigos candeales estaba entre 0,11 y 0,15% y que los trigos harineros oscilaron entre 0,11 y 0,12%, siendo este parámetro prácticamente constante para los trigos panaderos. En la revisión hecha por RODRIGUEZ (1993) indicó que el requerimiento interno de P al momento de cosecha es de 0,17%, determinando que esta concentración de P va a estar directamente relacionada al

objetivo productivo que se busque, ya que generalmente si se lleva a cabo una cosecha antes de su madurez fisiológica, se obtendrían requerimientos internos de P más altos. De esta forma, en un estudio realizado por OSBORNE y RENGEL (2002), en el cual analizaron la eficiencia de absorción y eficiencia de utilización de P de tres cultivares de trigo y uno de triticale, indican que la concentración crítica suficiente de fósforo o requerimiento interno del cultivo de trigo a finales de macolla (37 días desde siembra, en invernadero) es de 0,20%.

## **2.5 Absorción de fósforo del cultivo de trigo.**

La absorción de fósforo del cultivo es una variable derivada que resulta de la combinación entre la productividad de materia seca y la concentración de P del cultivo. Este parámetro se refleja a través de la tasa de absorción de P, la translocación de P y absorción directa de P hacia los granos y el índice de extracción en la cosecha.

En el estudio de EGGLE *et al.* (1999) midieron la absorción de P (kg P/ha) en cuatro estados de desarrollo del cultivo (macollaje, antesis, postantesis y cosecha) encontrando que todas las variedades evaluadas presentaron un aumento considerable en la absorción de fósforo, con la fertilización fosforada, en los cuatro estados de desarrollo mencionados.

**2.5.1. Tasa de absorción de fósforo.** La tasa de absorción se refiere a la velocidad de absorción por un cultivo. En general, se ha descrito que las plantas, como un todo, comienzan su absorción con una velocidad lenta, alcanza un máximo y luego decrece en los estados finales del desarrollo del cultivo. En un estudio se midió la tasa de absorción de la parte aérea del trigo en siete períodos de crecimiento, observando que la mayor tasa de absorción se encontraba desde cinco hojas desplegadas hasta hoja bandera y desde hoja bandera hasta emergencia de espiga, llegando en ambos momentos a valores de 0,29 kg P/ha/día<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> JOHNSTON, A. (2004). Ing. Agr. Ph.D., POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE, POTASH AND PHOSPHATE INSTITUTE OF CANADA PPI/PPIC. Comunicación Personal.

Sin embargo, la tasa de absorción de un nutriente es dependiente de cada especie y variedad, pudiendo ser modificada por el ambiente en el cual se desarrollan (BATTEN *et al.*, 1994). Considerando los órganos individuales de la planta, éstos presentan diferentes tasas de absorción de un nutriente, tanto a través de su ontogenia y característica de fuente o destino de cada órgano. Así, en los órganos que funcionan como fuente las tasa de absorción de P del órgano muestra incluso valores negativos cuando la exportación de carbohidratos, asociados al nutriente, son movilizados al órgano destino, que en el caso del trigo son los granos. De esta forma, el grano usualmente muestra tasas lineales de absorción del nutriente. Además debe considerarse que la planta en sus primeros estados utiliza el P contenido en las reservas que tiene la semilla y lo absorbido desde el suelo adyacente a ésta y después a medida que pasa el tiempo, al desarrollar su sistema radical se produce un incremento paulatino en la absorción del fósforo que viene del fertilizante, tal como ha sido mostrado por PINO y CASAS (1988), al describir la curva de absorción de fósforo en función del tiempo.

## **2.6 Translocación de fósforo.**

La translocación de fósforo se refiere a la reutilización del P absorbido por el cultivo y se produce a través del floema desde los órganos más viejos hacia otros órganos en desarrollo de la parte aérea. Es evidente en condiciones de baja disponibilidad de P para las plantas, cuando las raíces no pueden aportar todo el P requerido por los nuevos órganos en formación, produciéndose una reutilización del P, de manera que son los órganos más viejos, los cuales suplen en parte las necesidades de los nuevos tejidos creados. Este proceso implica la reutilización de las reservas de P a través del quiebre del P orgánico, presente en los órganos más viejos, principalmente las hojas (SCHACHTMAN *et al.*, 1998).

En el cultivo de trigo, el contenido de P en los granos se debe principalmente a la translocación, ya que la formación de éste órgano se produce en las etapas finales del cultivo, cuando la tasa absorción de P directa desde el suelo está en la fase final, la cual

es usualmente baja. Así, CLARKE *et al.* (1990) al medir la translocación de P hacia el grano, encontraron que ésta correspondía a entre un 75 a un 87%, del P contenido en el grano. El mínimo encontrado en ese estudio, fue relacionado a las condiciones de extrema sequía durante el año de estudio y correspondió a los tratamientos sin riego, implicando que aunque existieron elevados niveles de P en las hojas y tallos inicialmente, éstos no fueron translocados adecuadamente ya que la planta no terminó su ciclo fisiológico completamente.

Además, se ha mostrado la influencia que tienen distintas disponibilidades o niveles de fósforo sobre la translocación. A medida que aumentan los niveles, mayores son las tasas de desacumulación de P desde los órganos fuente a los órgano destino (ELLIOTT *et al.*, 1997b).

## **2.7 Índice de extracción de P a cosecha.**

Esta relación corresponde a un índice que indica la proporción del P absorbido en la parte aérea que se encuentra en el grano. Es utilizado para mostrar la proporción del P exportado desde el cultivo, producto de la cosecha del grano. ZUBAIBI *et al.* (1999) en experimentos realizados en Australia, han mostrado que la variación existente en trigo panadero es de 67 a 75%, en distintos cultivares. Por su parte, CLARKE *et al.* (1990) mostraron variaciones para este parámetro referente al medio ambiente en el cual se desarrollan las plantas y tomando en cuenta el efecto año, así obtuvo índices de extracción de cosecha de P que variaron entre 81 y 93%. Además, en una revisión hecha por BATTEN (1992), en la cual analizó el índice de extracción de fósforo por los granos debido al efecto de estaciones de crecimiento distintas, mostró que los valores más frecuentes fluctúan entre 81 y 89%.

En Chile, en el estudio de BARRIGA *et al.* (1995) utilizando sobre 15 genotipos nacionales de trigo (entre progenitores e híbridos F<sub>1</sub>) obtuvieron que el índice de extracción de P a cosecha varió entre 69 y 90%, siendo su media de 83%.

### 3 MATERIAL Y METODO

#### 3.1 Material.

El estudio se realizó en la Estación Experimental Santa Rosa, la cual pertenece a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile. Se encuentra ubicada a 4 kilómetros al norte de la ciudad de Valdivia.

**3.1.1 Características del sitio.** El suelo del lugar donde se realizó el ensayo corresponde a un suelo trumao, de la serie Valdivia, clasificado como Typic Hapludand (INSTITUTO DE INVESTIGACION DE RECURSOS RENOVABLES (IREN), CORPORACION DE FOMENTO (CORFO), UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (UACH) (1978). El sitio del ensayo presentó las siguientes características.

3.1.1.1 Características Químicas. El análisis de suelo se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Austral de Chile arrojando los siguientes resultados

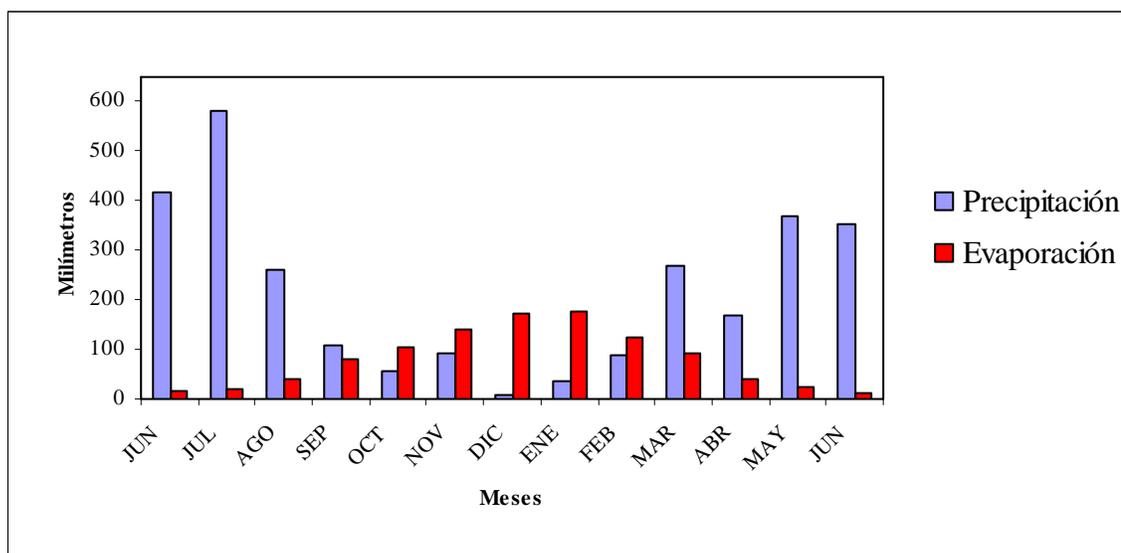
#### CUADRO 1 Análisis químico del sitio utilizado.

pH (1:2,5) agua	5,6 ± 0,1
pH (1:2,5) CaCl <sub>2</sub> 0,01M	4,8 ± 0,1
Fósforo intercambiable (mg kg <sup>-1</sup> P-Olsen)	9,0 ± 1,1
Calcio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,50 ± 0,14
Magnesio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,17 ± 0,06
Sodio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,03 ± 0,01
Potasio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,36 ± 0,06
Suma de bases intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	1,07 ± 0,26
Aluminio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,32 ± 0,07
Saturación de aluminio (%)	23,9 ± 8,7
Azufre disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	35,01 ± 0,68
Zinc extractable (mg kg <sup>-1</sup> )	0,22 ± 0,04
Fierro extractable (mg kg <sup>-1</sup> )	39,01 ± 2,78
Cobre extractable (mg kg <sup>-1</sup> )	1,68 ± 0,10
Manganeso extractable (mg kg <sup>-1</sup> )	2,70 ± 0,48

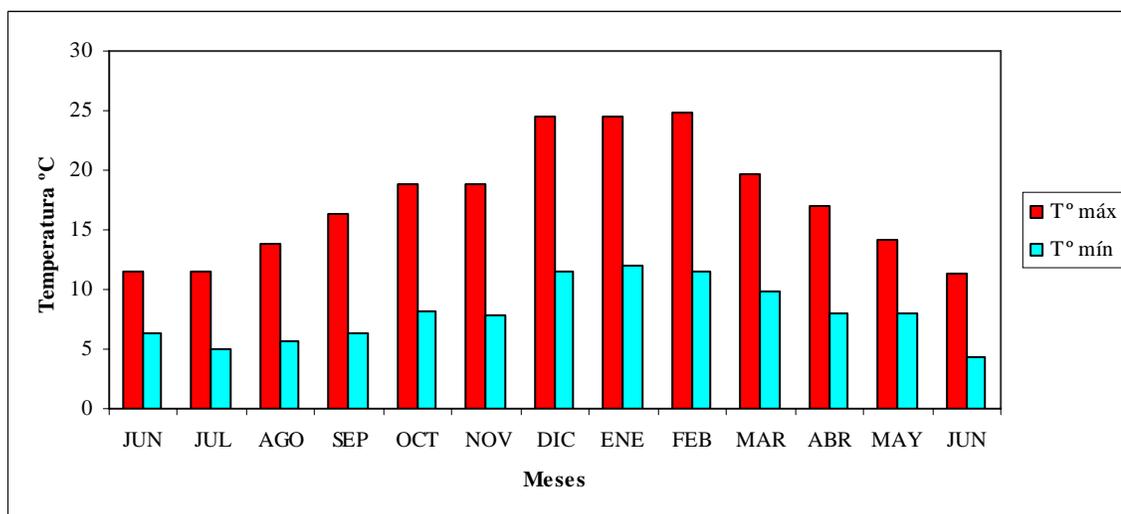
3.1.1.2 Características geomorfológicas. La serie Valdivia se encuentra en la depresión de San José a una altura de 9 a 20 m.s.n.m. Se presenta en forma de cenizas volcánicas sobre depósitos marinos llamados canagua, que corresponden a una toba más o menos cementada mezclada con clastos alterados. La topografía es compleja con pendientes dominantes de 3 a 8% y sectores ligeramente ondulados de 2 a 5% (IREN, CORFO y UACH, 1978).

**3.1.2 Características climáticas de la zona.** La influencia que ejerce la cercanía al mar y la hoya hidrográfica de los ríos Valdivia y Cruces hacen que esta zona tenga un clima de características marítimas (HUBER, 1970). Esta zona se caracteriza por altas precipitaciones, las cuales fluctúan entre 1800 y 3100 mm anuales, con un promedio de 2500 mm. Estas lluvias, presentan una distribución estacional bien marcada siendo el invierno la estación más lluviosa. La primavera es de lluvias moderadas con temperaturas que empiezan a subir de los 10 grados como promedio a partir de la segunda quincena de septiembre (MONTALDO y FUENTES, 1980). El verano es una estación con meses frecuentemente secos y temperaturas máximas diarias ocasionalmente superiores a los 25 °C. La temperatura desciende desde comienzos de marzo a fines de mayo cuando los promedios diarios bajan de 10° C (MONTALDO y FUENTES, 1980). Las temperaturas medias anuales son del orden de los 12° C con una oscilación anual de 9,2° C, siendo enero el mes mas calido con 16,7° C y julio el mes mas frío con 7,5° C respectivamente (MONTALDO, 1983).

**3.1.3 Características climáticas del período del ensayo.** Durante los meses en que se realizó el ensayo se registró la información climática de precipitación, evaporación, temperatura mínima y máxima (Figura 1 y 2) en la estación climatológica del Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile, ubicado en la isla Teja.



**FIGURA 1** Precipitación y evaporación promedio mensual (mm) registrada durante el período de estudio (junio 2001 a junio de 2002).



**FIGURA 2** Temperatura mínima y máxima promedio mensual (°C) registrada durante el período de estudio (junio 2001 a junio de 2002).

**3.1.4 Tiempo Térmico.** Con los datos de las temperaturas medias diarias se calculó el tiempo térmico para el período de estudio, utilizando una temperatura base de 0 °C, siendo éste relacionado con los momentos de colecta de cada muestreo (Cuadro 2).

**CUADRO 2 Relación entre el tiempo cronológico y el tiempo térmico durante el desarrollo del cultivo de trigo.**

<b>Días desde emergencia</b>	37	44	51	58	65	72	79	86
<b>Tiempo Térmico (GDA)</b>	537	633	726	820	901	1010	1095	1184
<b>Días desde emergencia</b>	93	100	107	114	121	128	135	142
<b>Tiempo Térmico (GDA)</b>	1284	1376	1486	1606	1740	1873	2004	2127

**3.1.5 Material vegetal.** Se utilizó el cultivar Otto-B de von Baer. Este cultivar es un trigo alternativo, que alcanza una altura entre 75 y 100 cm, su espiga es blanca amarillenta y sin barbas la cual se torna inclinada hacia la madurez (VON BAER, sf)

**3.1.6 Fertilizantes utilizados.** Se utilizaron como fertilizantes superfosfato triple (46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), el cual fue tamizado entre 3 y 2 mm para su homogenización, KCl (60% K<sub>2</sub>O) y Nitram magnésico (27 %N) y Magnesul (27% MgO). Además se adicionó boronatrocalcita (10% B) y mezcla Frölich, cuya composición se muestra en el Cuadro 3.

**CUADRO 3 Composición química de la mezcla Frölich.**

Compuesto	%
Sulfato de Magnesio	20
Oxido de Magnesio	10
Sulfato de Cobre	6
Carbonato de Calcio	28
Sulfato de Zinc	10
Bórax (Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )	25
Trióxido de Molibdeno	1

## 3.2 Método.

La metodología usada para este ensayo se detalla a continuación.

**3.2.1 Preparación de suelo.** El sitio previo a la utilización se encontraba con una pradera degradada, la cual fue arada a fines de marzo y tomadas las muestras para análisis de suelo. La preparación del suelo continuó con dos rastrajes durante la primera quincena de abril para terminar a fines de abril con un último rastraje.

**3.2.2 Prácticas culturales y encalado.** Dadas las condiciones de acidez del suelo (Cuadro 1), se realizó un enmienda calcárea el día 3 de agosto del 2001 (tres días antes de siembra), en la cual se incorporaron, con un rotovator, 4 toneladas de  $\text{CaCO}_3$ /ha (como magnecal 7 de una pureza del 95% de  $\text{CaCO}_3$ ), dentro de los primeros 20 cm de profundidad. Al momento de la siembra se desinfectó el suelo con Lorsban (clorpirifos) con una dosis equivalente de 10 kg/ha y posteriormente se incorporaron los fertilizantes. Para evitar el problema de malezas de hoja ancha en el trigo se aplicó previo al inicio de macolla MCPA (10 kg/ha) y metilsulfuron metil. Para contrarrestar daños posible por hongos, se aplicó fungicida a razón de 1L/ha al momento de tercera hoja desplegada y al estado de bota del cultivo.

**3.2.3 Tratamientos de fertilización fosforada.** Se diseñaron cuatro niveles de P como tratamientos. Se aplicaron incorporadas en los primeros 12 cm de suelo, mediante un rotovator, tres dosis de fertilización fosforada: 110, 280 y 460 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ /ha y se mantuvo un tratamiento sin aplicación de fertilización fosforada. Las dosis fueron diseñadas para obtener un tratamiento subóptimo de fertilización, óptimo de fertilización y supraóptimo de fertilización.

**3.2.4 Diseño del ensayo.** El ensayo fue dispuesto en bloques completos al azar con una orientación norte sur, consistiendo de cuatro tratamientos y con tres repeticiones, obteniéndose 12 parcelas (Figura 3).

Tratamientos	Bloques
T3	1
T2	
T4	
T1	
T2	2
T4	
T1	
T3	
T4	3
T3	
T2	
T1	

**FIGURA 3** Diseño del ensayo.

**3.2.5 Tamaño de las parcelas.** El tamaño de cada parcela fue de 2,90 m de ancho por 20 m de largo (58 m<sup>2</sup>), con el objetivo de realizar mediciones semanales del crecimiento de la parte aérea.

**3.2.6 Siembra del ensayo.** El ensayo fue sembrado el día 6 de agosto del 2001, utilizándose una dosis equivalente a 230 kg de semilla/ha distribuidas en hileras a chorro continuo mediante una sembradora Planet Jr. La distancia entre hileras fue de 17,5 cm.

**3.2.7 Fertilización del ensayo.** El ensayo fue fertilizado en la siembra en forma incorporada con dosis equivalentes a 80 kg de K<sub>2</sub>O/ha, 32 kg de MgO/ha, 1,43 kg de S/ha, 1,6 kg de B/ha, y 0,66 kg Zn/ha, 0,48 kg de Cu/ha y 0,13 kg Mo/ha. La aplicación total del N fue de 240 kg N/ha, distribuidos en 30 kg de N/ha en la siembra, incorporados y 210 aplicados en cobertera el día 22 de septiembre del 2001, cuando las plantas de todos los tratamientos, estaban con su tercera hoja desplegada.

### **3.3. Evaluación del ensayo.**

El ensayo fue evaluado en variables y componentes determinados en forma directa: peso seco de cada órgano y total de la parte aérea de las plantas y la concentración de P en cada órgano vegetal.

**3.3.1 Muestreos del material vegetal.** La emergencia ocurrió el 20 de agosto, donde el material vegetal aéreo fue cosechado semanalmente, entre el día 27 de septiembre, cuando las plantas estaban en el estado de 3 a 4 hojas (previo al inicio de la macolla) hasta el 17 de enero del 2002 (estado de grano maduro), obteniéndose 17 muestreos. La colecta del material se realizó manualmente, cortando con cuchillo a 1 cm. del suelo, el material vegetal en el área a muestrear de 0,28 m<sup>2</sup> (0,4 m de largo por 0,7 m de ancho). Al momento de realizar el corte se descartaban tres hileras laterales del área de muestreo y 40 cm. a lo largo de la parcela, para evitar efectos de borde.

**3.3.2 Procesamiento y peso del material vegetal.** Una vez realizado el corte, el material vegetal se recolectó en bolsas plásticas. Inmediatamente posterior a la colecta, las muestras vegetales fueron lavadas con agua potable y luego, lavadas con agua destilada. Seguido al lavado, las muestras se colocaron en bolsas de papel rotuladas y llevadas a un horno de aire forzado a 60 °C, hasta peso constante (48 a 64 horas, dependiendo del tamaño de la muestra). Una vez secas, se registró el peso total en una balanza electrónica marca Ohaus modelo Scout II (precisión de 0,1 g). Las muestras secas fueron separadas manualmente en sus órganos componentes: hojas, tallo, espiga, espiguillas y grano (dependiendo del caso) y registrado los pesos de cada órgano en la misma balanza Ohaus, descrita anteriormente. Cada material de órganos separados se guardó en una bolsa de papel debidamente rotulada de acuerdo al tratamiento y repetición. Estos materiales se molieron separadamente en un molino Thomas Willey 3383-L40 con tamiz de 0,9 mm y se guardaron molidos en bolsas plásticas, en un lugar seco y fresco, para su posterior análisis.

**3.3.3 Determinación de la concentración de fósforo.** Para la determinación de la concentración de P en cada órgano vegetal, de acuerdo al tratamiento y repetición se tomaron 2 gramos de la muestra de materia seca molida (balanza PRECISA 100A-300 M) y se depositaron en crisoles limpios y se llevaron a una mufla (marca LINDBERG/BLUE) para ser incinerados a 500 °C, por un tiempo de 4 horas. Las cenizas, una vez frías, se humectaron con 1 mL de agua destilada y 10 mL de mezcla ácida (HCl y HNO<sub>3</sub>). Luego, los crisoles se colocaron en un plato caliente a 100 °C, hasta que hierva la muestra. Posteriormente, la solución se filtró y colectó en matraces los que se aforaron a 50 mL. Desde los matraces se tomaron 10 mL, los cuales se mezclaron con 20 mL de la solución desarrollo color (vanadato-molibdato), se aforaron a 50 mL con agua destilada y se dejaron reposar por una hora (SAAVEDRA, 1975). La concentración de P, se determinó a través de colorimetría amarilla, en una alícuota en cubetas de vidrio en el espectrofotómetro UV/ visible, previamente calibrado con concentraciones conocidas, trabajando con una longitud de onda de 440 nm (SAAVEDRA, 1975; ROWELL, 1996).

#### **3.4 Variables de la nutrición fosforada derivados.**

Las variables derivadas corresponden a aquellas que se determinan a partir de las variables de medición directa: concentración de P y la producción de MS en cada órgano y el total de la planta. Estos fueron: absorción acumulada de P para cada órgano y para el total de la planta, la tasa de crecimiento y tasa de absorción de P en cada órgano y el total de la planta y la translocación de P entre los órganos.

**3.4.1 Absorción acumulada de fósforo.** La absorción de fósforo acumulada se obtuvo partir de la concentración de P y la materia seca de cada órgano y del total producido respectivamente.

**3.4.2 Tasa de absorción de fósforo.** Una vez obtenida la absorción acumulada de P se determinó la tasa de absorción para cada órgano y para el total de la planta; para esto se dividió la absorción de P acumulada de cada corte por siete, de tal manera expresar la tasa de absorción de P por día en cada órgano y para el total del cultivo.

**3.4.3 Tasa de crecimiento.** La tasa de crecimiento de cada órgano y del total de la planta se obtuvo a partir del crecimiento acumulado que presentó el cultivo durante su desarrollo. La tasa de crecimiento fue expresada por día en cada órgano y para el total del cultivo.

Los resultados obtenidos en la absorción de P acumulada y el crecimiento de la biomasa aérea foliar acumulada por órgano y total y sus respectivas tasas de absorción de P y MS, por órgano y total de las plantas se ajustaron a regresiones no lineales utilizando modelos sigmoideos y distribuciones Gaussianas. El grano fue el único órgano que presentó un comportamiento lineal en la absorción de P y crecimiento, de tal manera, se ajustó a una regresión lineal.

**3.4.4 Translocación de fósforo.** Para evaluar la translocación de P se determinó la cantidad de P movilizado desde los órganos fuente al órgano destino (granos); para ello, se restó el valor máximo de P presente en cada órgano del cultivo con la cantidad de P presente en el mismo órgano al momento de la cosecha, considerándose esa cantidad la translocación del órgano. Al sumar las cantidades de fósforo movilizadas desde los órganos fuente hacia el grano y teniendo la cantidad de P presentes en el grano se determinó la translocación total hacia el grano. Finalmente, la absorción de P directa desde el suelo se obtuvo por diferencia entre la cantidad total de P translocado hacia el grano y el fósforo total presente en este órgano.

### **3.5 Parámetros de la demanda de fósforo.**

Los parámetros necesarios de determinar para evaluar el método de demanda del nutriente fósforo son: índice de cosecha, el índice de extracción de P a la cosecha y el requerimiento interno de P.

**3.5.1 Índice de cosecha.** El índice de cosecha se calculó para todos los tratamientos y se expresó como los kg MS/ha de grano producido en relación al total de MS producidos por la parte aérea del cultivo al momento de cosecha.

**3.5.2 Índice de extracción de fósforo.** El índice de extracción de P se evaluó para todos los tratamientos como la cantidad de P absorbida en los granos en relación al total de P absorbido en la parte aérea del cultivo y expresado como porcentaje.

**3.5.3 Requerimiento interno de fósforo.** El requerimiento interno de P se calculó para cada muestreo durante el desarrollo del cultivo. Este parámetro se determinó sumando la absorción de P en cada órgano y expresado en relación al total de MS producida en la parte aérea y expresada como porcentaje.

### **3.6 Tratamiento óptimo de fertilización fosforada.**

La determinación del tratamiento óptimo de fertilización se realizó en base a una cosecha de granos posterior al último muestreo (2/02/2002). La superficie cosechada, por repetición de cada tratamiento, fue de 2 m<sup>2</sup>. En este último muestreo, se descartaron tres hileras laterales en cada lado de la parcela, para evitar el efecto borde.

**3.6.1 Eficiencia de la fertilización fosforada.** La eficiencia de fertilización fosforada o eficiencia de recuperación del fertilizante fosforado se determinó a partir del tratamiento óptimo de fertilización fosforada obtenido. A la absorción de P del

tratamiento óptimo se le restó la absorción de P del tratamiento sin fertilización y se expresó en función de la dosis de P aplicada.

### **3.7 Eficiencia de uso de fósforo.**

La eficiencia de uso de fósforo se determinó para todos los tratamientos en tres momentos de desarrollo del cultivo y se expresó como los kg MS/ha producidos por la parte aérea en relación a la cantidad kg P/ha absorbidos.

### **3.8 Análisis estadístico.**

A continuación se detalla los análisis utilizados en este trabajo.

**3.8.1 Evaluación estadística de los efectos de los tratamientos.** Los datos se sometieron a un análisis de varianza para determinar el efecto de los tratamientos en las variables evaluadas a través de los distintos períodos de muestreos. Se utilizó la prueba de Tukey para evaluar las diferencias entre las medias, cuando fue significativo el efecto de los tratamientos. El programa utilizado para el ANDEVA fue Statgraphics versión 2,0.

**3.8.2 Ajuste del crecimiento acumulado, absorción de P, tasas de crecimiento y absorción de P y función de respuesta a la fertilización del ensayo.** El ajuste de las ecuaciones no lineales se realizó utilizando el programa estadístico GraphPad Prism v. 4,0 utilizando todas las repeticiones y obteniendo el valor de  $R^2$  y el valor del error estándar de la ecuación ( $S_{y.x}$ ). El ajuste de la función de respuesta a la fertilización se realizó a través de un modelo tipo Mitscherlich utilizando el mismo programa estadístico.

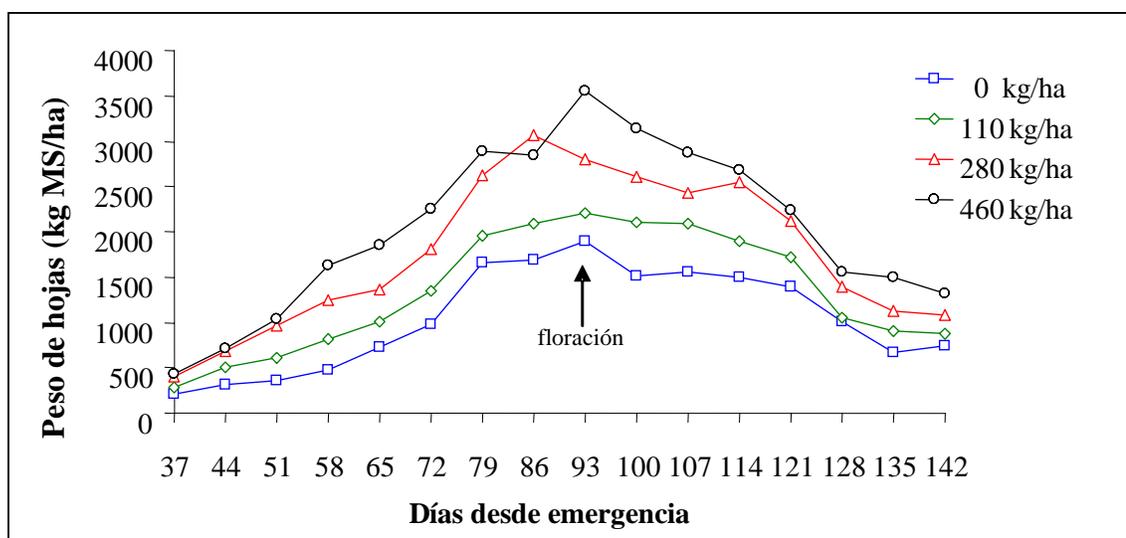
## 4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 Variables de medición directa.

Las variables de medición directa e independiente fueron la producción de materia seca y la concentración de P.

**4.1.1 Producción de materia seca.** El análisis de materia seca acumulada se realizó para cada órgano de la parte aérea de la planta de trigo.

4.1.1.1 Producción de materia seca de hojas. La producción de materia seca en los cuatro tratamientos sigue un patrón similar, mostrando una curva que se incrementa hasta alcanzar un máximo entre el día 86 y 93 desde la emergencia (alrededor de floración) y decrece hasta la cosecha en el día 142 desde la emergencia (Figura 4).



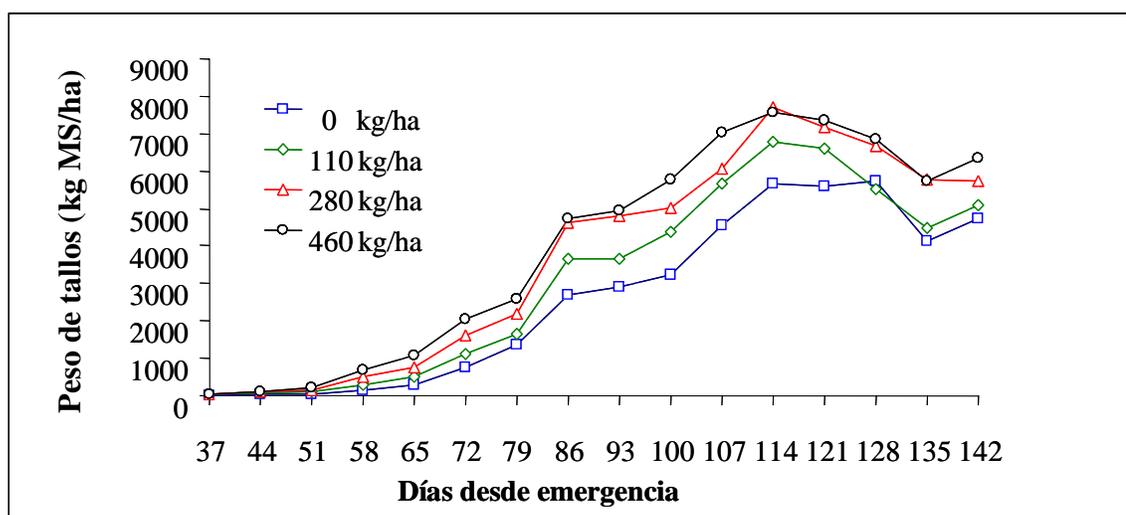
**FIGURA 4** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ( $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ ) sobre la producción de materia seca acumulada en las hojas del cultivo de trigo.

Se determinaron diferencias significativas entre el tratamiento testigo (0 kg  $P_2O_5$ /ha) y los tratamientos de 280 y 460 kg  $P_2O_5$ /ha, que correspondieron a los tratamientos con mayor fertilización fosforada durante todo el periodo de muestreo (Cuadro 4).

Al primer muestreo (37 días desde emergencia) la materia seca de las hojas varió significativamente en función de la dosis de P aplicada (202 y 435 kg MS/ha, tratamiento testigo y mayor fertilización fosforada, respectivamente). En este momento de máxima productividad de MS de las hojas, a los 93 días de emergencia (antes), los valores se ordenaron significativamente en función de la dosis de P aplicada, siendo hasta 1,84 veces mayor en el tratamiento de máxima fertilización, en relación con el testigo sin aplicación. El tratamiento de 280 kg  $P_2O_5$ /ha alcanzó el máximo una semana antes (86 días desde la emergencia) con un valor alrededor de 3000 kg MS/ha. Los valores en el muestreo final, 142 días desde emergencia, que corresponden a madurez fisiológica decaen hasta alcanzar un 35 a 40% de la máxima acumulación de MS, presentando un mayor contenido en los tratamientos de más alta fertilización fosforada. Un efecto similar de disminución de materia seca a partir de un máximo de acumulación en las hojas, también, fue observada por GREGORY *et al.* (1979b) en trigo de invierno, atribuyendo el efecto a la translocación de carbohidratos desde hojas y tallos, hacia el grano. Por su parte, en el estudio bajo condiciones de campo en Manitoba (Dakota del Norte, USA) de BOATWRIGHT y HAAS (1961), en que evaluó la influencia de la fertilización fosforada y nitrogenada sobre la producción de materia seca en trigo, se determinó que la mayor producción de las hojas fue entre espigadura y floración; lo cual concuerda con este estudio. Los mismos autores proponen que la pérdida del peso seco de las hojas desde el estado de floración a madurez, se puede atribuir a la translocación de materiales como azúcares, nitrógeno y fósforo al órgano de destino final (grano).

4.1.1.2 Producción de materia seca de tallos. En general, en la producción de materia seca de los tallos, se observó un incremento desde el muestreo inicial hasta alcanzar un

máximo de crecimiento a los 114 días desde emergencia en todos los tratamientos. A partir del cual, disminuye hasta la cosecha (Figura 5). Este comportamiento de la producción de materia seca de tallos es similar al estudio realizado por BOATWRIGHT y HAAS, (1961) en el cual encontraron que alrededor de un mes antes de la madurez de cosecha del cultivo se presentaba el máximo relativo de acumulación de materia seca de los tallos para todos los tratamientos realizados.



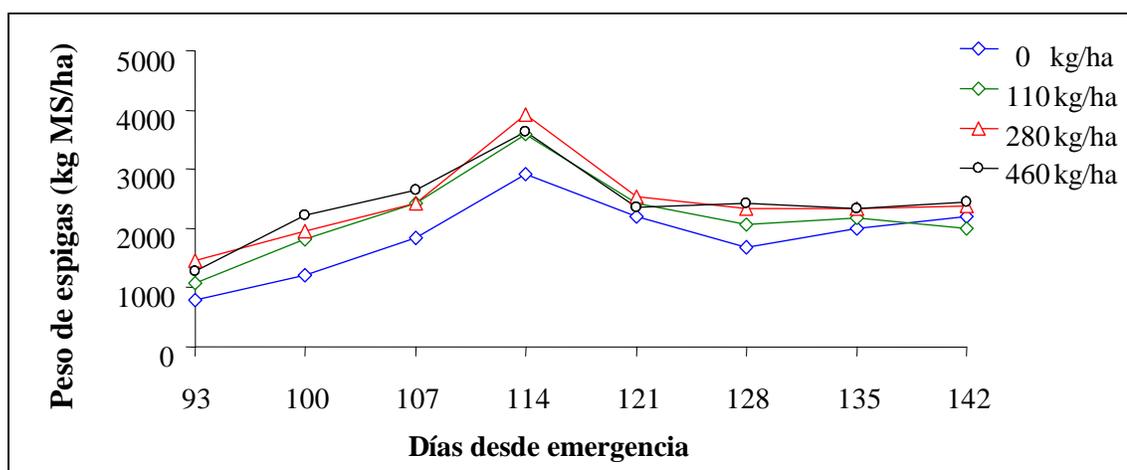
**FIGURA 5** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en los tallos del cultivo de trigo.

En la Figura 5 se observa que una semana antes de la floración existe un leve aumento en la producción de materia seca de tallos en todos los tratamientos, lo cual es explicado debido a la presencia de espigas que no estaban totalmente emitidas, lo cual pudo distorsionar este análisis al ser consideradas como parte del tallo.

Existe un desfase en el tiempo en que se alcanza el máximo con respecto al máximo obtenido en las hojas de 3 semanas. Además, la cantidad de materia seca producida en los tallos es en el máximo entre 2,3 a 3,0 veces superior que en el máximo de producción de hojas, disminuyendo la relación con el aumento de la fertilización fosforada. En el primer corte de las plantas (37 días desde emergencia) la materia seca

de los tallos es muy baja (14 a 45 kg MS/ha) y en relación a la materia seca de hojas es entre 14 y 9,5 veces inferior, mostrando el tratamiento testigo el valor más alto y el máximo de fertilización el valor menor (Cuadro 4).

4.1.1.3 Producción de materia seca de espigas. La producción de materia seca de las espigas de todos los tratamientos presentó un patrón similar. La colecta comenzó a los 93 días desde emergencia, con un incremento de la biomasa aérea que llegó a un máximo a los 114 días desde emergencia. Luego decrece la producción de materia seca y permanece prácticamente constante hasta la cosecha (Figura 6).

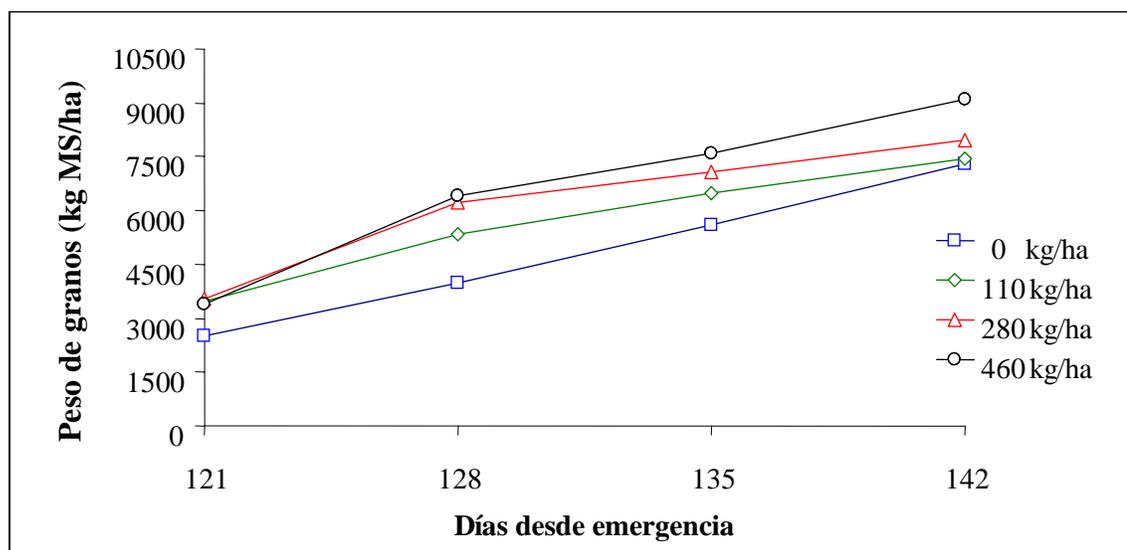


**FIGURA 6** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ( $\text{kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ ) sobre la producción de materia seca acumulada en las espigas del cultivo de trigo.

El máximo alcanzado por todos los tratamientos podría ser atribuido a que las espigas presentaron grano incipiente. Ello fue ratificado ya que en el muestreo realizado una semana después se presentó granos en la espiga, los cuales fueron separados y registrados aparte. Al analizar los máximos de producción de las espigas con relación al máximo de tallos, se puede observar que la producción de las espigas de todos los tratamientos corresponde al 50% de los tallos. Del inicio del muestreo de granos en

adelante (121 días desde emergencia) no existieron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 4), a excepción del muestreo a los 128 días que presenta diferencias significativas entre el tratamiento testigo con los tratamientos de media y alta fertilización fosforada.

4.1.1.4 Producción de materia seca de granos. La producción de materia seca de los granos presentó un comportamiento similar en todos los tratamientos. Se observó, que desde el primer muestreo de granos (121 días desde emergencia) hasta cosecha, hubo un incremento en la producción de materia seca; el cual puede ser representado por un incremento lineal en función del tiempo (Figura 7).



**FIGURA 7** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en los granos del cultivo de trigo.

Se observó que los rendimientos fueron mayores a medida que se aumentó la fertilización fosforada. Sin embargo, debido a la alta variabilidad producida en el muestreo, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados en las dos últimas colectas (Cuadro 4). Por esta razón, se realizó una cosecha posterior al último

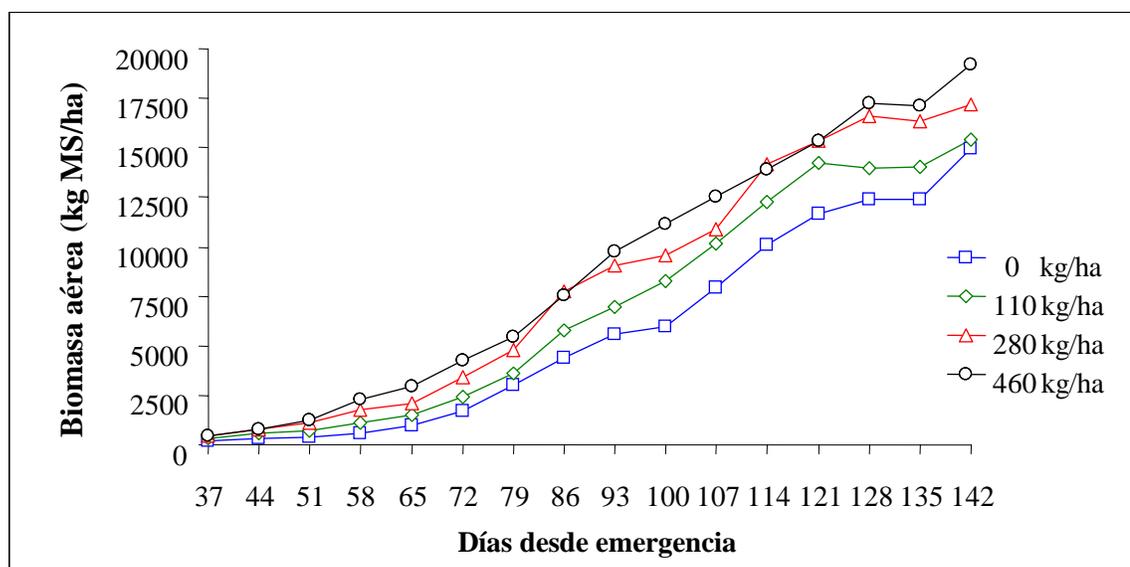
muestreo secuencial señalado (detalles en capítulos posteriores). En el muestreo final, determinado en una superficie mayor ( $2 \text{ m}^2$ ) los tratamientos fueron estadísticamente diferentes en función de la dosis de P aplicada.

La incremento de materia seca de cada tratamiento en función del tiempo (Anexo 1) mostró que el tratamiento de mayor fertilización fosforada ( $460 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ ) fue el único que presentó diferencias significativas en producción de materia seca a través del tiempo, aumentando desde  $3400 \text{ kg MS/ha}$  (121 días desde la emergencia) a  $9000 \text{ kg MS/ha}$  (142 días desde la emergencia). En todos los tratamientos, al momento de la cosecha del trigo, el grano es el órgano que presenta la mayor proporción de la materia seca total producida, seguido por la materia seca acumulada en el tallo, siendo la producción entre 1,3 a 1,5 veces mayor que la de tallos (Cuadro 4).

4.1.1.5 Producción de materia seca total. Se observó un comportamiento similar en la producción de materia seca total de todos los tratamientos. Se caracterizó por un lento crecimiento inicial que se mantuvo hasta los 65 a 72 días desde emergencia, a partir del cual existe un incremento lineal en la producción de materia seca total hasta alcanzar un máximo de producción a los 128 días desde emergencia. A partir de este muestreo hasta cosecha la producción se mantuvo relativamente constante (Figura 8). Resultados similares han sido reportados GREGORY *et al.* (1979a), quienes caracterizan al crecimiento total de materia seca en tres fases de desarrollo: fase de lento crecimiento exponencial, fase lineal y una fase constante en donde la materia seca no presenta incrementos significativos.

La producción de materia seca total aumentó con la fertilización fosforada, obteniendo diferencias significativas en todos los muestreos respecto al testigo (Cuadro 4) y en algunos puntos con respecto al de fertilización baja. Esta respuesta muestra que en los tratamientos sin fertilización y con fertilización baja estarían en deficiencia nutricional de P y que este al ser entregado en mayores cantidades estas deficiencias se superan en los tratamientos de fertilización media y alta. Las diferencias en producción

de materia seca se manifestaron desde los primeros estados de desarrollo del cultivo, mostrando lo señalado por OZANNE (1980) de que niveles adecuados de fósforo son esenciales desde las primeras etapas de desarrollo del cultivo. Este autor señala que si estas deficiencias no son subsanadas se puede disminuir el crecimiento y los rendimientos del cultivo al final de su desarrollo.



**FIGURA 8 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la producción total de materia seca acumulada del cultivo de trigo.**

A partir de los 128 días desde emergencia hasta cosecha la producción total de materia seca se mantuvo relativamente constante. Sin embargo, el tratamiento de mayor fertilización fosforada fue el único que presentó diferencias significativas en la producción de materia seca total en los cuatro muestreos (Anexo 2). Los valores alcanzados muestran que el tratamiento de mayor fertilización fosforada produjo entre 1,3 a 1,4 veces más materia seca que el testigo.

**CUADRO 4 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la producción de materia seca acumulada (kg MS/ha) por órgano del cultivo del trigo.**

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia				
		37	44	51	58	65
Hoja	0	202 ± 17 a	319 ± 40 a	350 ± 22 a	473 ± 98 a	730 ± 180 a
	110	281 ± 36 a b	505 ± 146 a b	601 ± 90 a	812 ± 116 b	1011 ± 184 a b
	280	400 ± 60 b	677 ± 12 b	967 ± 42 b	1244 ± 53 c	1360 ± 318 b c
	460	435 ± 99 b	711 ± 125 b	1032 ± 192 b	1623 ± 105 d	1854 ± 105 c
Tallo	0	14 ± 4 a	41 ± 15 a	45 ± 14 a	141 ± 42 a	273 ± 93 a
	110	27 ± 12 a b	70 ± 28 a b	97 ± 30 a b	289 ± 58 b	506 ± 89 a b
	280	38 ± 4 a b	100 ± 7 a b	151 ± 34 a b	514 ± 35 c	742 ± 220 b c
	460	45 ± 15 b	108 ± 37 b	218 ± 83 b	690 ± 74 d	1071 ± 99 c
Espiga	0					
	110					
	280					
	460					
Grano	0					
	110					
	280					
	460					
Total	0	216 ± 19 a	360 ± 44 a	395 ± 29 a	614 ± 139 a	1004 ± 270 a
	110	309 ± 41 a b	575 ± 167 a b	698 ± 118 b	1101 ± 160 b	1518 ± 264 a b
	280	438 ± 64 b c	777 ± 18 b	1118 ± 59 c	1758 ± 87 c	2102 ± 516 b c
	460	480 ± 114 b c	819 ± 161 b	1250 ± 109 c	2313 ± 179 d	2925 ± 201 c

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p<0,05; Tukey).

(Continúa)

Continuación Cuadro 4.

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia				
		72	79	86	93	100
Hoja	0	975 ± 164 a	1657 ± 213 a	1682 ± 312 a	1890 ± 132 a	1510 ± 174 a
	110	1342 ± 204 a b	1953 ± 100 a	2083 ± 315 a b	2204 ± 343 a	2100 ± 249 a b
	280	1804 ± 277 b c	2627 ± 198 b	3071 ± 628 b	2797 ± 130 b	2614 ± 320 b c
	460	2250 ± 377 c	2884 ± 292 b	2842 ± 535 a b	3558 ± 156 c	3148 ± 279 c
Tallo	0	736 ± 217 a	1371 ± 395 a	2691 ± 467 a	2903 ± 31 a	3225 ± 205 a
	110	1094 ± 206 a b	1637 ± 119 a b	3666 ± 322 b	3647 ± 470 a b	4369 ± 561 b
	280	1611 ± 161 b c	2186 ± 159 b c	4635 ± 269 c	4808 ± 764 b c	5020 ± 321 b c
	460	2037 ± 332 c	2565 ± 341 c	4729 ± 268 c	4957 ± 73 c	5788 ± 517 c
Espiga	0				781 ± 38 a	1212 ± 277 a
	110				1075 ± 111 b	1823 ± 303 b
	280				1467 ± 102 c	1957 ± 13 b
	460				1276 ± 112 b c	2213 ± 176 b
Grano	0					
	110					
	280					
	460					
Total	0	1711 ± 378 a	3027 ± 608 a	4374 ± 776 a	5574 ± 90 a	5946 ± 527 a
	110	2436 ± 406 a b	3590 ± 219 a b	5749 ± 626 a b	6926 ± 878 a	8293 ± 1097 b
	280	3414 ± 436 b c	4813 ± 348 b c	7706 ± 895 b	9071 ± 758 b	9590 ± 621 b c
	460	4287 ± 708 c	5449 ± 632 c	7571 ± 796 b	9790 ± 333 b	11149 ± 898 c

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p&lt;0,05; Tukey).

(Continúa)

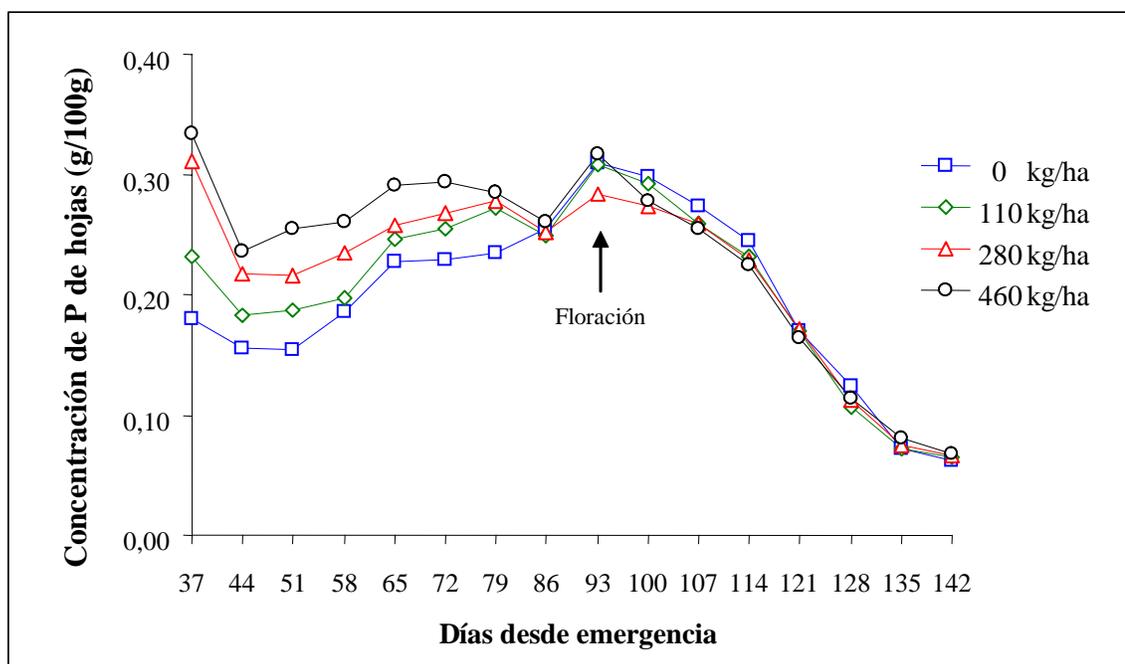
Continuación Cuadro 4.

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia					
		107	114	121	128	135	142
Hoja	0	1559 ± 59 a	1495 ± 175 a	1388 ± 258 a	1008 ± 335 a	671 ± 60 a	746 ± 120 a
	110	2091 ± 379 a b	1902 ± 80 b	1714 ± 144 a b	1052 ± 181 a	904 ± 153 a b	876 ± 131 a b
	280	2433 ± 289 b c	2555 ± 233 c	2114 ± 116 b c	1393 ± 33 a b	1132 ± 149 b	1089 ± 73 b c
	460	2881 ± 312 c	2685 ± 75 c	2231 ± 94 c	1553 ± 13 b	1489 ± 159 c	1322 ± 201 c
Tallo	0	4555 ± 400 a	5661 ± 725 a	5598 ± 648 a	5725 ± 1856 a	4119 ± 466 a	4734 ± 577 a
	110	5652 ± 502 a b	6763 ± 278 a b	6605 ± 910 a b	5518 ± 766 a	4485 ± 740 a b	5079 ± 569 a
	280	6062 ± 553 a b	7706 ± 452 b	7171 ± 173 b	6660 ± 264 a	5761 ± 458 b	5747 ± 263 a b
	460	7018 ± 866 b	7570 ± 529 b	7359 ± 709 b	6849 ± 37 a	5761 ± 456 b	6343 ± 579 b
Espiga	0	1849 ± 192 a	2913 ± 294 a	2188 ± 196 a	1682 ± 334 a	1997 ± 300 a	2194 ± 273 a
	110	2425 ± 245 a b	3594 ± 156 a b	2416 ± 207 a	2055 ± 141 a b	2164 ± 203 a	1999 ± 195 a
	280	2416 ± 156 a b	3930 ± 410 b	2534 ± 310 a	2338 ± 69 b	2332 ± 196 a	2374 ± 189 a
	460	2648 ± 449 b	3629 ± 265 a b	2352 ± 232 a	2415 ± 74 b	2329 ± 91 a	2453 ± 97 a
Grano	0			2511 ± 520 a	3987 ± 925 a	5590 ± 644 a	7291 ± 974 a
	110			3466 ± 318 b	5346 ± 619 a b	6494 ± 1225 a	7434 ± 973 a
	280			3554 ± 159 b	6222 ± 279 b	7075 ± 1486 a	7973 ± 456 a
	460			3387 ± 69 b	6427 ± 78 b	7581 ± 561 a	9087 ± 576 a
Total	0	7963 ± 584 a	10069 ± 1192 a	11685 ± 1577 a	12402 ± 1189 a	12376 ± 1402 a	14967 ± 1885 a
	110	10168 ± 1104 a b	12258 ± 507 a b	14201 ± 1518 a b	13970 ± 1655 a b	14048 ± 2022 a b	15389 ± 1654 a
	280	10912 ± 963 b	14190 ± 1075 b	15373 ± 676 b	16613 ± 229 b c	16300 ± 2230 a b	17183 ± 621 a b
	460	12546 ± 1566 b	13884 ± 806 b	15330 ± 317 b	17245 ± 347 c	17126 ± 1077 b	19206 ± 783 b

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ; Tukey).

**4.1.2 Concentración de fósforo.** La concentración de fósforo se determinó en cada órgano del trigo y se expresó como porcentaje de P en relación a la materia seca producida.

4.1.2.1 Concentración de fósforo de hojas. La concentración de fósforo de las hojas, presentó un comportamiento similar entre los tratamientos (Figura 9). En general, se observó que la concentración de P a partir del día 93 desde la emergencia decrece continuamente hasta la cosecha. Entre el día 37 y 93 después de la emergencia se determinó una variación errática en la concentración de P, la cual comenzó con una concentración alta que decrece alcanzando un primer mínimo entre el segundo y tercer muestreo, para incrementar hasta el máximo descrito a los 93 días después de la emergencia. Es en esta etapa (entre el primer y noveno muestreo) se presentaron las mayores variaciones de la concentración de P con respecto a los tratamientos de fertilización fosforada.



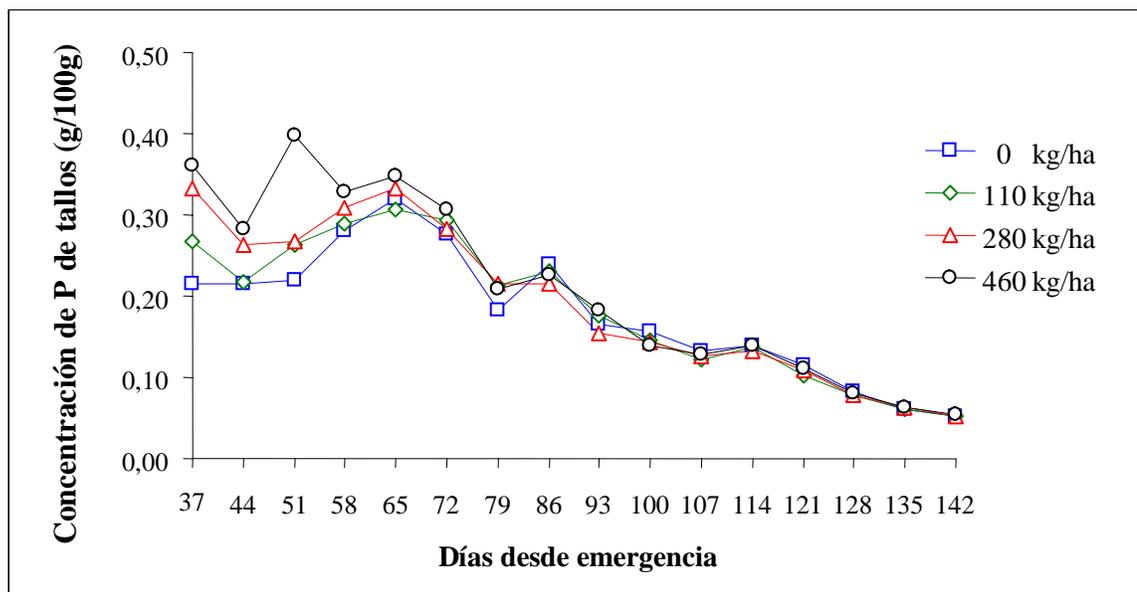
**FIGURA 9** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la concentración de fósforo en las hojas del cultivo del trigo.

En el primer muestreo se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos de media y alta fertilización fosforada con respecto al tratamiento de baja fertilización fosforada y el testigo, la cual se incrementa a tres grupos diferentes en los siguientes muestreos, diferenciándose aún más con la dosis de P aplicada hasta el día 65 después de emergencia, en donde las diferencias se hacen menores y se mantienen no significativas hasta la cosecha, en donde se manifiesta diferencias significativas solo del tratamiento de máxima fertilización P con respecto al testigo. La concentración de fósforo en el primer muestreo (37 días desde emergencia) estuvo entre 1,72 a 1,85 veces mayor al tratamiento testigo (Cuadro 5). La concentración de P de las hojas en la cosecha (día 142), decayó a un valor entre 4,3 y 5,0 el valor máximo de concentración obtenido en el día 93 desde la emergencia. Los resultados obtenidos desde floración hasta cosecha, concuerdan con los obtenidos en el estudio de ELLIOTT *et al.* (1997a), quienes atribuyeron esta disminución (de la concentración de P de las hojas) a una translocación de fósforo hacia otras partes de la planta, señalando que la etapa de floración es de gran gasto energético para la planta y de una gran utilización o reutilización de elementos.

4.1.2.2 Concentración de fósforo de tallos. La disminución de la concentración de P en tallos comenzó antes que la observada en las hojas. Desde los 65 días desde emergencia hasta la cosecha (día 142) la concentración de P de los tallos disminuyó en todos los tratamientos (Figura 10), no mostrando diferencias significativas entre los tratamientos.

Entre el día 37 al 65 desde emergencia, la concentración de P en los tallos presentó fluctuaciones entre los tratamientos (similar a lo observado en la concentración de P de las hojas). La concentración medida en el primer muestreo disminuye hasta un primer mínimo en el segundo y tercer muestreo, dependiendo del tratamiento, para incrementar al máximo observado a los 65 días desde emergencia. Los tres primeros muestreos mostraron diferencias significativas en la concentración de P en función de la dosis de P aplicada, diferencias que se van haciendo estadísticamente menores hasta hacerse no significativas en el cuarto muestreo (58 días después de emergencia).

La disminución de la concentración de P muestra, igual que en las hojas, la movilidad que tiene este nutriente al interior de la planta, sugiriendo una translocación de P que tiene como destino final los granos.

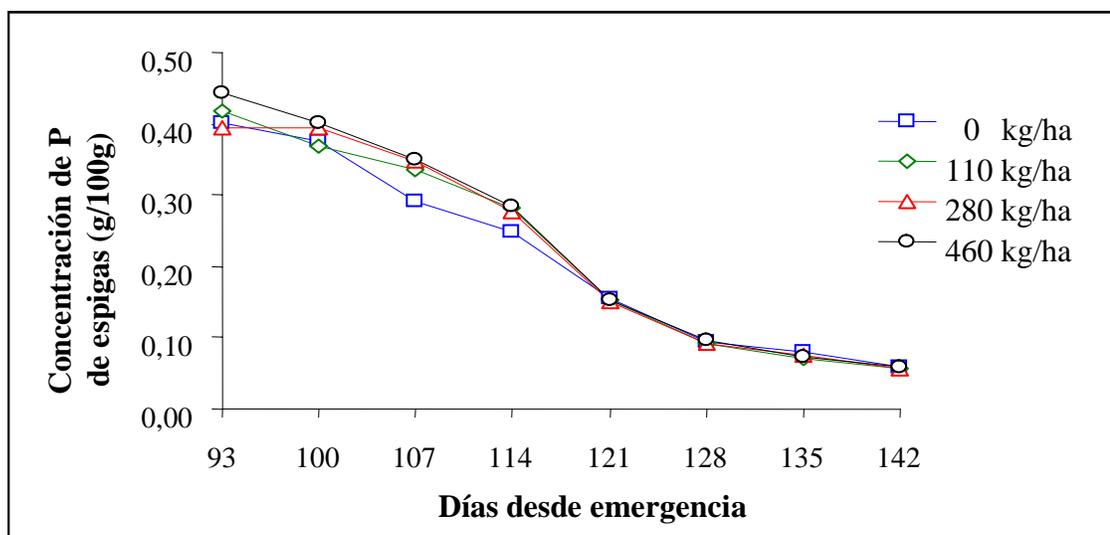


**FIGURA 10 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la concentración de fósforo en los tallos del cultivo del trigo.**

En el máximo observado, la concentración de P es entre 5,9 a 6,3 veces mayor a la concentración de P obtenida al momento de cosecha (Cuadro 5). La máxima concentración de los tallos (promedio de 0,326 a los 65 días desde la emergencia) fue similar a la obtenida en el máximo de concentración en las hojas (promedio de 0,304, a los 93 días después de emergencia) (Cuadro 4). En el momento de la cosecha las concentraciones de tallos y de las hojas fueron bajas y menores en los tallos, alcanzando en promedio valores de 0,053 en tallos y 0,065 en hojas.

4.1.2.3 Concentración de fósforo de espigas. La concentración de fósforo de espigas disminuyó desde el inicio de su colecta (93 días desde emergencia) hasta la cosecha (Figura 11). Al momento del primer muestreo (día 93) la concentración de P de las

espigas presentó un máximo en todos los tratamientos que varió entre 0,40 y 0,44% y estas fueron las más altas medidas en este estudio. Estas concentraciones de P en el máximo son entre 6,9 a 7,6 veces mayor a la obtenida al momento de la cosecha, lo cual, similarmente a lo descrito en hojas y tallos, evidencia una translocación de P desde las espigas al grano.



**FIGURA 11 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la concentración de fósforo en las espigas del cultivo del trigo.**

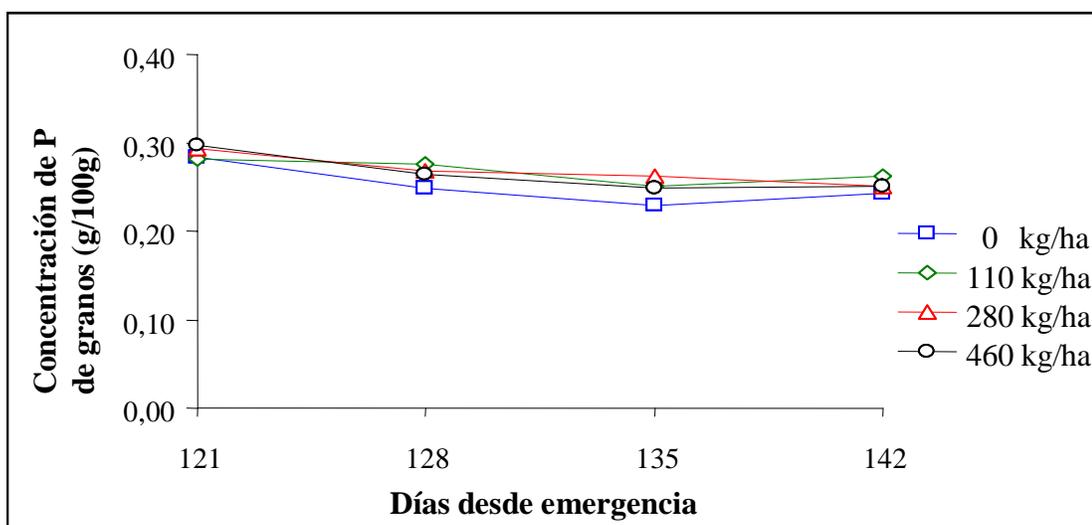
En general, las dosis fosforadas no hicieron variar la concentración de P de las espigas entre los tratamientos, ya que prácticamente no hubo diferencias estadísticamente significativas. Sólo se observaron diferencias significativas a los 107 días desde emergencia, entre los tratamientos de mayor fertilización fosforada y el testigo, y a los 135 días desde emergencia entre el tratamiento testigo y el de baja fertilización fosforada (Cuadro 5).

Al comparar el máximo de espigas con el máximo obtenido por las hojas, se observó que las espigas tienen una concentración de P que es entre 1,3 a 1,4 veces

mayor a la de las hojas y este aumento está en función de la fertilización fosforada, ya que tratamientos de mayor fertilización fosforada presentan relaciones mayores.

4.1.2.4 Concentración de fósforo de granos. En términos generales se observó que, para todos los tratamientos, la concentración de P de los granos desde el primer muestreo (121 días desde emergencia) hasta cosecha (día 142) permanece prácticamente constante (Figura 12).

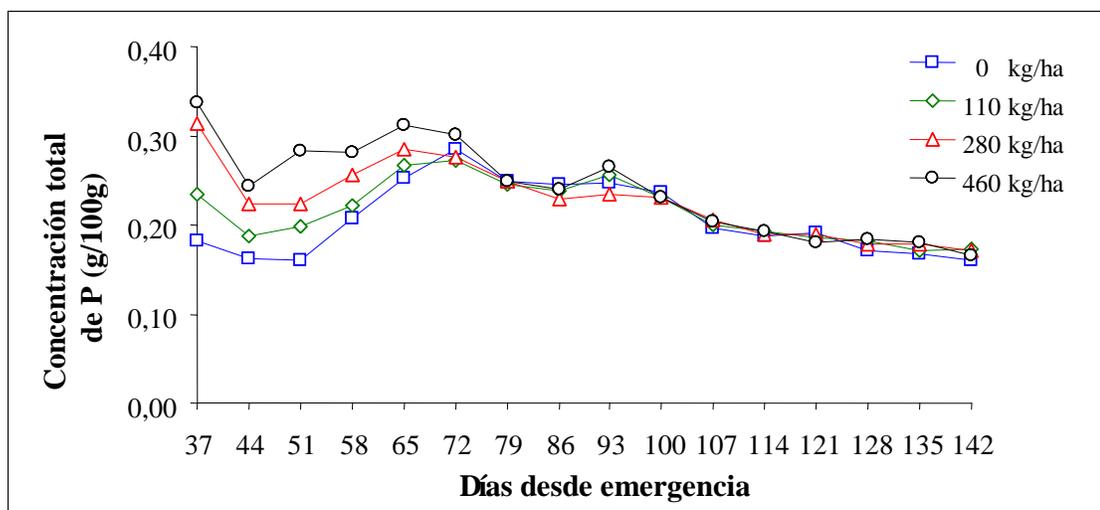
El efecto de los tratamientos sobre la concentración de P de los granos no tuvo diferencias estadísticamente significativas, la excepción la presentó el muestreo a los 128 días, donde el tratamiento de baja fertilización fosforada presentó diferencias significativas con el tratamiento testigo (Cuadro 5). Sin embargo, se observó que en función del tiempo, no existió diferencia estadísticamente significativa en la concentración de P de los granos para los tratamientos de baja y media fertilización fosforada. A su vez el tratamiento testigo y de mas alta fertilización fosforada sólo presentaron diferencias significativas en el tiempo en la primera colecta de granos (Anexo 3).



**FIGURA 12 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la concentración de fósforo en los granos del cultivo del trigo.**

La concentración de P que se observó en el grano al momento de la cosecha es entre 3,6 y 4,6 veces mayor a la que presentaron los órganos fuente (hoja, tallo y espiga) (Cuadro 4). Esto corroboraría que la movilización de P de los órganos fuente tendría como destino final el grano.

4.1.2.5 Concentración de fósforo estimada total. Desde los 65 días de emergencia hasta cosecha se observó una disminución en la concentración de P presente en el total de la biomasa aérea (Figura 13). Entre el primer muestreo y los 65 días desde emergencia se determinó una alta variación en la concentración de P entre los tratamientos, lo cual está claramente influenciado por el comportamiento que presentaron las hojas y tallos en los muestreos iniciales. La alta concentración de P en el primer muestreo decrece alcanzando un primer mínimo en la segunda colecta, luego esta concentración de P incrementa hasta el máximo señalado a los 65 días desde emergencia.



**FIGURA 13 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la concentración de fósforo estimada total del cultivo del trigo.**

La disminución inicial de la concentración de P del total de la parte aérea puede estar dada en respuesta a una baja participación inicial del fósforo proveniente de los gránulos del fertilizante debido a que las raíces tendrían una menor oportunidad de poder interceptar los gránulos, ya que la fertilización fosforada fue incorporada y no localizada. Del máximo alcanzado, la concentración de P total decrece lentamente hasta la cosecha del cultivo, en este período no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 5). Esta disminución en la concentración de fósforo en el tiempo también fue observada en el estudio realizado por ELLIOTT *et al.* (1997 a,b,c), atribuyéndolo a un efecto de dilución del elemento debido al aumento de la biomasa aérea del cultivo.

**CUADRO 5 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la concentración de fósforo (g /100g) por órgano del cultivo de trigo.**

Parte vegetal	Dosis (Kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia				
		37	44	51	58	65
Hoja	0	0,180 ± 0,006 a	0,156 ± 0,008 a	0,153 ± 0,022 a	0,186 ± 0,008 a	0,227 ± 0,012 a
	110	0,231 ± 0,017 a	0,183 ± 0,012 a b	0,187 ± 0,015 a b	0,197 ± 0,023 a b	0,246 ± 0,020 a
	280	0,311 ± 0,023 b	0,218 ± 0,023 b c	0,216 ± 0,029 b c	0,234 ± 0,012 b c	0,258 ± 0,045 a
	460	0,334 ± 0,050 b	0,237 ± 0,020 c	0,254 ± 0,016 c	0,260 ± 0,020 c	0,290 ± 0,017 a
Tallo	0	0,214 ± 0,017 a	0,216 ± 0,019 a	0,220 ± 0,034 a	0,280 ± 0,011 a	0,320 ± 0,009 a
	110	0,267 ± 0,028 a b	0,218 ± 0,015 a	0,263 ± 0,017 a b	0,288 ± 0,023 a	0,306 ± 0,029 a
	280	0,332 ± 0,031 b c	0,263 ± 0,021 b	0,268 ± 0,031 a b	0,309 ± 0,021 a	0,332 ± 0,059 a
	460	0,361 ± 0,047 c	0,282 ± 0,011 b	0,397 ± 0,113 b	0,328 ± 0,030 a	0,347 ± 0,025 a
Espiga	0					
	110					
	280					
	460					
Grano	0					
	110					
	280					
	460					
Total	0	0,182 ± 0,006 a	0,162 ± 0,010 a	0,161 ± 0,020 a	0,207 ± 0,011 a	0,252 ± 0,010 a
	110	0,234 ± 0,019 a	0,187 ± 0,011 a b	0,197 ± 0,017 a b	0,221 ± 0,023 a b	0,266 ± 0,021 a
	280	0,313 ± 0,024 b	0,224 ± 0,023 b c	0,223 ± 0,030 b c	0,256 ± 0,013 b c	0,284 ± 0,048 a
	460	0,336 ± 0,049 b	0,243 ± 0,018 c	0,283 ± 0,024 c	0,280 ± 0,020 c	0,311 ± 0,019 a

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ; Tukey).

(Continúa)

Continuación Cuadro 5.

Parte vegetal	Dosis (Kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia				
		72	79	86	93	100
Hoja	0	0,229 ± 0,017 a	0,235 ± 0,037 a	0,254 ± 0,015 a	0,309 ± 0,018 a	0,297 ± 0,017 a
	110	0,255 ± 0,032 a b	0,272 ± 0,020 a	0,249 ± 0,007 a	0,307 ± 0,009 a	0,291 ± 0,010 a
	280	0,268 ± 0,027 a b	0,278 ± 0,008 a	0,252 ± 0,005 a	0,283 ± 0,026 a	0,273 ± 0,020 a
	460	0,294 ± 0,009 b	0,285 ± 0,030 a	0,260 ± 0,017 a	0,317 ± 0,007 a	0,278 ± 0,006 a
Tallo	0	0,276 ± 0,020 a	0,182 ± 0,005 a	0,239 ± 0,020 a	0,165 ± 0,006 a	0,157 ± 0,010 a
	110	0,294 ± 0,012 a	0,214 ± 0,011 a	0,231 ± 0,012 a	0,176 ± 0,015 a	0,146 ± 0,007 a
	280	0,282 ± 0,027 a	0,215 ± 0,009 a	0,214 ± 0,010 a	0,154 ± 0,021 a	0,143 ± 0,005 a
	460	0,306 ± 0,043 a	0,208 ± 0,030 a	0,227 ± 0,010 a	0,182 ± 0,014 a	0,139 ± 0,014 a
Espiga	0				0,400 ± 0,032 a	0,375 ± 0,034 a
	110				0,418 ± 0,034 a	0,368 ± 0,030 a
	280				0,394 ± 0,030 a	0,395 ± 0,013 a
	460				0,443 ± 0,006 a	0,401 ± 0,011 a
Grano	0					
	110					
	280					
	460					
Total	0	0,285 ± 0,018 a	0,249 ± 0,024 a	0,245 ± 0,017 a	0,247 ± 0,014 a b	0,237 ± 0,013 a
	110	0,272 ± 0,023 a	0,246 ± 0,015 a	0,238 ± 0,010 a	0,256 ± 0,012 a b	0,231 ± 0,007 a
	280	0,275 ± 0,022 a	0,250 ± 0,007 a	0,229 ± 0,007 a	0,234 ± 0,007 a	0,230 ± 0,004 a
	460	0,300 ± 0,019 a	0,249 ± 0,029 a	0,239 ± 0,013 a	0,265 ± 0,007 b	0,230 ± 0,009 a

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p&lt;0,05; Tukey).

(Continúa)

Continuación Cuadro 5.

Parte vegetal	Dosis (Kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia					
		107	114	121	128	135	142
Hoja	0	0,273 ± 0,003 a	0,245 ± 0,007 a	0,169 ± 0,006 a	0,124 ± 0,019 a	0,072 ± 0,004 a	0,061 ± 0,001 a
	110	0,259 ± 0,027 a	0,232 ± 0,007 a	0,169 ± 0,017 a	0,107 ± 0,000 a	0,072 ± 0,005 a	0,064 ± 0,002 a b
	280	0,259 ± 0,012 a	0,228 ± 0,001 a	0,172 ± 0,005 a	0,113 ± 0,004 a	0,075 ± 0,004 a	0,066 ± 0,001 a b
	460	0,255 ± 0,011 a	0,225 ± 0,012 a	0,164 ± 0,009 a	0,114 ± 0,004 a	0,081 ± 0,004 a	0,068 ± 0,004 b
Tallo	0	0,133 ± 0,006 a	0,140 ± 0,004 a	0,115 ± 0,013 a	0,083 ± 0,009 a	0,062 ± 0,002 a	0,053 ± 0,003 a
	110	0,121 ± 0,013 a	0,136 ± 0,006 a	0,102 ± 0,005 a	0,077 ± 0,002 a	0,061 ± 0,004 a	0,052 ± 0,001 a
	280	0,127 ± 0,009 a	0,133 ± 0,014 a	0,109 ± 0,013 a	0,078 ± 0,003 a	0,063 ± 0,003 a	0,053 ± 0,002 a
	460	0,129 ± 0,009 a	0,138 ± 0,015 a	0,112 ± 0,015 a	0,080 ± 0,002 a	0,064 ± 0,007 a	0,055 ± 0,002 a
Espiga	0	0,290 ± 0,004 a	0,250 ± 0,022 a	0,155 ± 0,012 a	0,093 ± 0,005 a	0,079 ± 0,001 b	0,058 ± 0,004 a
	110	0,337 ± 0,037 a b	0,281 ± 0,023 a	0,154 ± 0,015 a	0,093 ± 0,003 a	0,071 ± 0,004 a	0,057 ± 0,003 a
	280	0,348 ± 0,007 b	0,277 ± 0,017 a	0,151 ± 0,017 a	0,093 ± 0,004 a	0,074 ± 0,003 a b	0,056 ± 0,002 a
	460	0,350 ± 0,020 b	0,283 ± 0,025 a	0,152 ± 0,015 a	0,097 ± 0,001 a	0,072 ± 0,001 a b	0,058 ± 0,004 a
Grano	0			0,283 ± 0,00 a	0,248 ± 0,00 a	0,230 ± 0,01 a	0,242 ± 0,008 a
	110			0,281 ± 0,00 a	0,276 ± 0,01 b	0,250 ± 0,01 a	0,262 ± 0,018 a
	280			0,294 ± 0,01 a	0,269 ± 0,01 a b	0,261 ± 0,03 a	0,251 ± 0,026 a
	460			0,297 ± 0,01 a	0,264 ± 0,01 a b	0,248 ± 0,01 a	0,250 ± 0,007 a
Total	0	0,197 ± 0,002 a	0,187 ± 0,007 a	0,191 ± 0,007 a	0,172 ± 0,018 a	0,167 ± 0,009 a	0,161 ± 0,004 a
	110	0,201 ± 0,002 a	0,193 ± 0,008 a	0,185 ± 0,011 a	0,182 ± 0,001 a	0,171 ± 0,003 a	0,172 ± 0,005 a
	280	0,205 ± 0,009 a	0,190 ± 0,010 a	0,188 ± 0,005 a	0,179 ± 0,010 a	0,178 ± 0,006 a	0,171 ± 0,007 a
	460	0,204 ± 0,007 a	0,193 ± 0,005 a	0,180 ± 0,003 a	0,183 ± 0,004 a	0,180 ± 0,008 a	0,166 ± 0,003 a

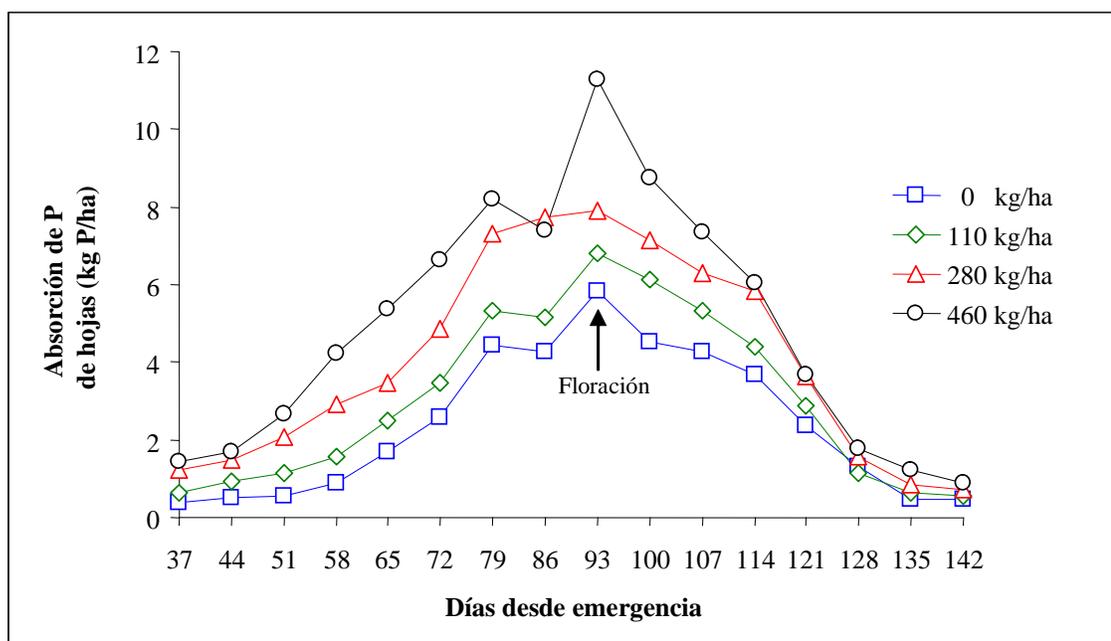
Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ; Tukey).

## 4.2 Variables derivadas.

Las variables derivadas corresponden a aquellos que se determinaron a partir de los parámetros directos.

**4.2.1 Absorción acumulada de fósforo.** Se determinó la absorción acumulada de fósforo para cada órgano de la planta del trigo.

4.2.1.1 Absorción acumulada de fósforo de hojas. La absorción de P de las hojas se registró desde el día 37 desde emergencia, de este momento la absorción de P incrementó hasta llegar a un máximo a los 93 días desde emergencia (coincidiendo con la floración del cultivo), luego la absorción de P decrece continuamente hasta la cosecha (142 días desde emergencia) (Figura 14).



**FIGURA 14 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la absorción de fósforo acumulada en las hojas de trigo.**

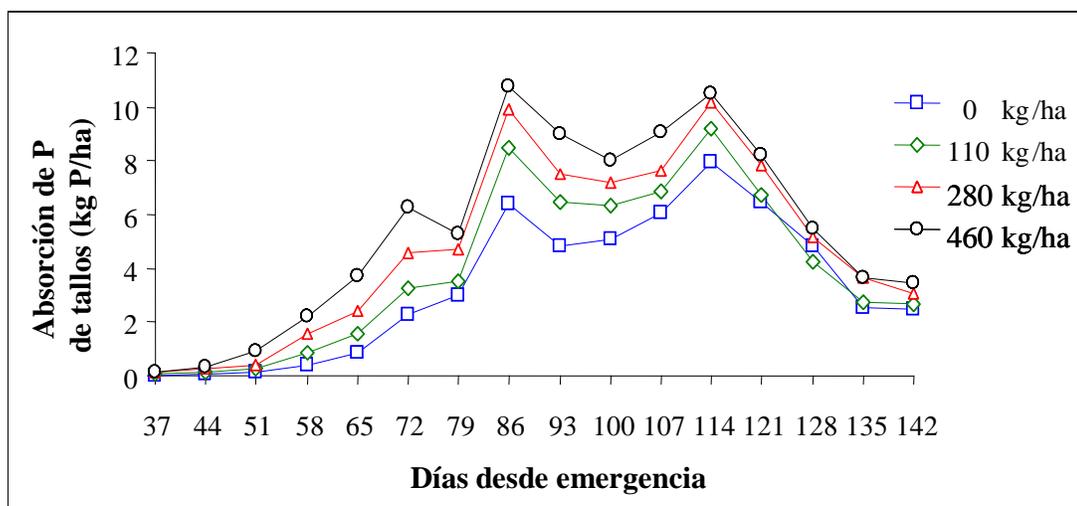
Se observaron, en la absorción de P de las hojas, diferencias significativas entre el tratamiento testigo y los tratamientos de mayor fertilización fosforada durante todo el

periodo de muestreo, excepto a los 128 días desde emergencia, donde no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 6).

En la primera colecta (37 días desde emergencia), la absorción de P de las hojas varió significativamente en función de la dosis de P aplicada (4,26 y 7,36 kg P/ha, tratamientos testigo y mayor fertilización fosforada). En el momento de máxima absorción de P de las hojas (93 días de emergencia), si bien los valores de P absorbido se ordenaron en función de la dosis de P aplicada, sólo el tratamiento de alta fertilización fosforada presentó diferencias estadísticamente significativas, siendo 1,92 veces mayor al tratamiento testigo (Cuadro 6). Los valores de absorción de P decaen en la cosecha (142 días desde emergencia) hasta alcanzar un 7,9 a 9,0% de la máxima absorción de P, presentando un mayor contenido en los tratamientos de mayor fertilización fosforada (Cuadro 6).

4.2.1.2 Absorción acumulada de fósforo de tallos. En general, se observó que la absorción de fósforo de los tallos presentó un comportamiento similar a lo largo del desarrollo del cultivo (Figura 15). Desde la primera colecta se observó un incremento de la absorción de P en todos los tratamientos hasta un primer máximo a los 86 días desde emergencia. Luego se observó una disminución hasta los 100 días, desde este momento la absorción de P de todos los tratamientos se incrementó hasta un segundo máximo a los 114 días desde emergencia para finalmente decrecer hasta la cosecha (142 días desde emergencia).

El primer máximo de absorción de P se presentó al octavo muestreo (día 86), lo cual se atribuyó a la presencia de espiga en el tallo (ver capítulo 4.1.1.2).



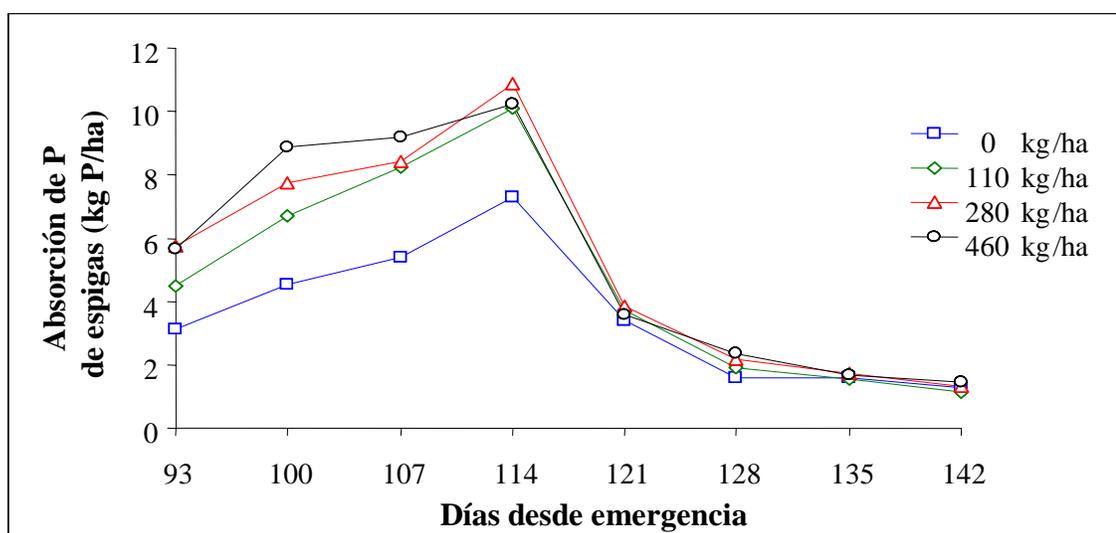
**FIGURA 15 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la absorción de fósforo acumulada en los tallos de trigo.**

Se observó que la absorción de P de tallos presentó diferencias significativas entre los tratamientos en los primeros 11 muestreos (37 a 107 días desde emergencia). Desde los 114 días desde emergencia hasta cosecha no existieron diferencias significativas entre los tratamientos a excepción del momento de cosecha (142 días desde emergencia), donde el tratamiento de mayor fertilización fosforada presentó una absorción de P estadísticamente mayor al resto de los tratamientos.

Al comparar el segundo máximo de absorción de P de los tallos (114 días desde emergencia) con el máximo de las hojas, se observó que en general el tallo presenta mayor absorción de P que las hojas (22 a 26%). Del segundo máximo la absorción de fósforo de los tallos de todos los tratamientos disminuyó hasta un 7,9 a 9,0% al momento de la cosecha (142 días desde emergencia) (Cuadro 6).

4.2.1.3 Absorción acumulada de fósforo de espigas. La absorción de P de las espigas se registró de los 93 días desde emergencia en adelante, con un incremento que llegó a un máximo a los 114 días. Luego el P decrece hasta los 128 días desde emergencia y de este momento permanece prácticamente constante hasta la cosecha (Figura 16).

El máximo alcanzado a los 114 días desde emergencia se vio influenciado por una mayor participación de grano en este muestreo (ver capítulo 4.1.1.3).

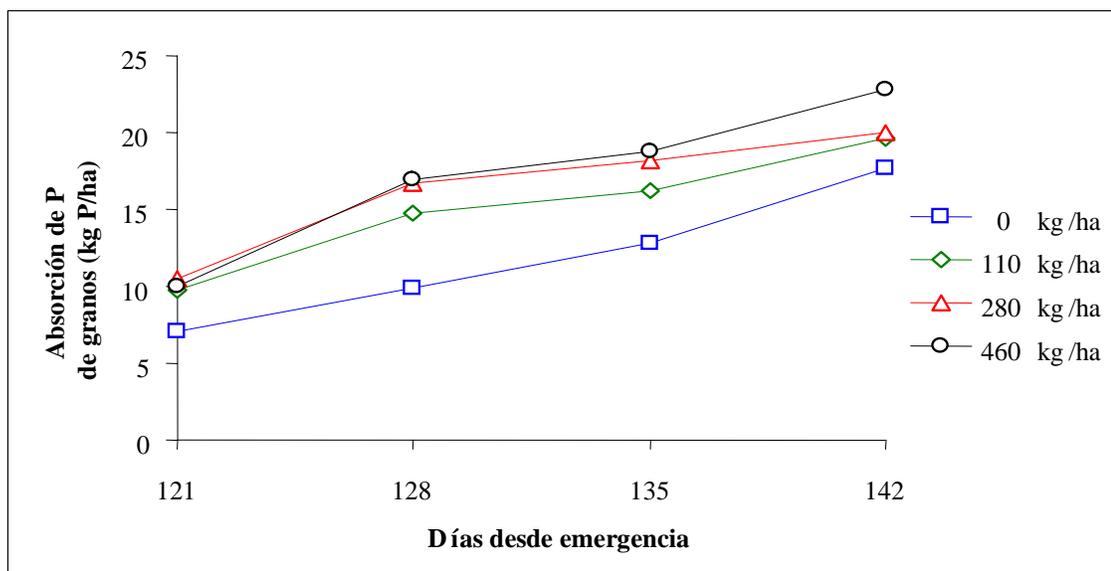


**FIGURA 16 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la absorción de fósforo acumulada en las espigas de trigo.**

En los primeros cuatro muestreos, la absorción de P de espigas presentó diferencias significativas entre los tratamientos. Desde los 121 a 142 días desde emergencia (cosecha) no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, con excepción del muestreo a los 128 días donde sólo existieron diferencias significativas entre los tratamientos de mayor fertilización fosforada y el testigo (Cuadro 6).

4.2.1.4 Absorción acumulada de fósforo de granos. Desde el primer muestreo de granos (121 días desde emergencia) hasta cosecha, hubo un incremento en la absorción de P en todos los tratamientos, el cual puede ser representado por un incremento lineal en función del tiempo (Figura 17).

Si bien al momento de cosecha la cantidad de fósforo absorbido por los granos fluctuó entre 18 y 23 kg P/ha entre el tratamiento testigo y el de mayor fertilización fosforada, estadísticamente no hubo diferencias significativas (Cuadro 6). Se observó que la absorción de P de los granos se incrementó entre 1,9 y 2,5 veces desde el inicio de los muestreos de grano (121 días desde emergencia) hasta la cosecha.

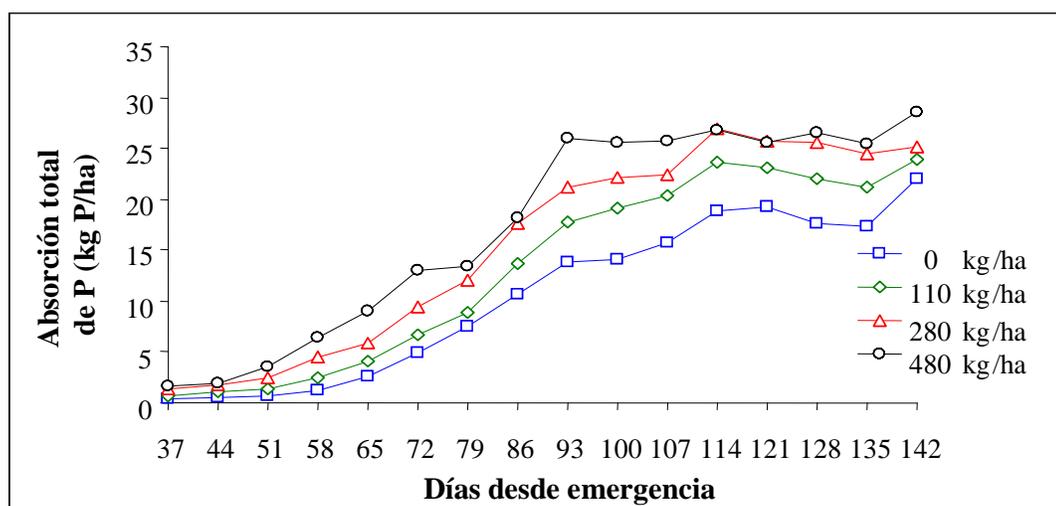


**FIGURA 17 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la absorción de fósforo acumulada en los granos de trigo.**

4.2.1.5 Absorción total de fósforo. La absorción de fósforo total se registró desde los 37 días desde emergencia, esta se caracterizó inicialmente por una lenta absorción de P que se mantuvo hasta los 51 días desde emergencia, a partir de la cual incrementa la absorción total de P hasta alcanzar un máximo a los 114 días desde emergencia. A partir

de este muestreo hasta cosecha la absorción de P se mantuvo relativamente constante (Figura 18).

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos a través de todos los muestreos. Sólo al momento de cosecha (142 días desde emergencia) no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 6).



**FIGURA 18 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) en la absorción de fósforo acumulada total de trigo.**

En el primer muestreo la cantidad de fósforo absorbido varió entre 0,4 y 1,6 kg P/ha entre el tratamiento testigo y el de mayor fertilización fosforada, siendo estos valores similares a lo observado en las hojas, lo cual sugiere que inicialmente estos órganos son los que mayormente contribuyen en la cantidad total de P absorbido.

Por su parte, se observó que la absorción de P de tallos y espigas contribuye entre un 77,4 y 81,4% al total de P absorbido en el momento de máxima absorción de P total. Esta participación de espigas y tallos al total de P absorbido va disminuyendo en función del tiempo, ya que desde el inicio de la colecta de granos (121 días desde emergencia)

este órgano es el que presenta la mayor participación, llegando al momento de cosecha con contribuciones cercanas al 80% del total de fósforo absorbido por la planta (Cuadro 6).

**CUADRO 6 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la absorción de fósforo (kg P/ha) por órgano del cultivo de trigo.**

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia				
		37	44	51	58	65
Hoja	0	0,364 ± 0,02 a	0,497 ± 0,08 a	0,539 ± 0,10 a	0,884 ± 0,22 a	1,672 ± 0,50 a
	110	0,648 ± 0,06 a	0,914 ± 0,20 a	1,132 ± 0,26 a b	1,581 ± 0,05 b	2,510 ± 0,64 a b
	280	1,244 ± 0,20 b	1,475 ± 0,16 b	2,084 ± 0,22 b c	2,919 ± 0,23 c	3,484 ± 0,91 b
	460	1,434 ± 0,24 b	1,671 ± 0,22 b	2,642 ± 0,67 c	4,216 ± 0,29 d	5,370 ± 0,17 c
Tallo	0	0,030 ± 0,011 a	0,09 ± 0,03 a	0,10 ± 0,03 a	0,40 ± 0,13 a	0,87 ± 0,28 a
	110	0,074 ± 0,036 a b	0,15 ± 0,05 a b	0,26 ± 0,09 a b	0,83 ± 0,13 b	1,56 ± 0,33 a
	280	0,126 ± 0,017 b c	0,26 ± 0,02 b c	0,41 ± 0,12 a b	1,59 ± 0,22 c	2,40 ± 0,43 b
	460	0,158 ± 0,033 c	0,30 ± 0,09 c	0,89 ± 0,49 b	2,25 ± 0,04 d	3,70 ± 0,09 c
Espiga	0					
	110					
	280					
	460					
Grano	0					
	110					
	280					
	460					
Total	0	0,394 ± 0,028 a	0,586 ± 0,10 a	0,64 ± 0,12 a	1,28 ± 0,35 a	2,54 ± 0,78 a
	110	0,722 ± 0,089 a	1,064 ± 0,24 a	1,39 ± 0,35 a	2,41 ± 0,18 b	4,07 ± 0,96 a b
	280	1,370 ± 0,219 b	1,737 ± 0,18 b	2,49 ± 0,33 b	4,51 ± 0,43 c	5,89 ± 1,28 b
	460	1,592 ± 0,272 b	1,973 ± 0,30 b	3,53 ± 0,41 c	6,46 ± 0,30 d	9,07 ± 0,22 c

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ; Tukey).

(Continúa)

Continuación Cuadro 6

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia				
		72	79	86	93	100
Hoja	0	2,594 ± 0,54 a	4,452 ± 0,34 a	4,283 ± 0,85 a	5,85 ± 0,64 a	4,51 ± 0,76 a
	110	3,455 ± 0,93 a	5,316 ± 0,43 a	5,172 ± 0,71 a b	6,79 ± 1,24 a	6,11 ± 0,63 a b
	280	4,878 ± 1,24 a b	7,317 ± 0,72 b	7,712 ± 1,47 b	7,92 ± 0,93 a	7,15 ± 1,10 b c
	460	6,634 ± 1,25 b	8,180 ± 0,75 b	7,412 ± 1,63 a b	11,28 ± 0,70 b	8,74 ± 0,59 c
Tallo	0	2,29 ± 0,71 a	3,00 ± 0,84 a	6,40 ± 0,80 a	4,80 ± 0,22 a	5,06 ± 0,45 a
	110	3,23 ± 0,71 a	3,51 ± 0,40 a b	8,46 ± 0,33 b	6,44 ± 1,21 a b	6,34 ± 0,58 a b
	280	4,54 ± 0,52 a b	4,71 ± 0,54 b c	9,93 ± 0,25 b c	7,52 ± 2,11 a b	7,19 ± 0,66 b c
	460	6,29 ± 1,64 b	5,28 ± 0,23 c	10,74 ± 0,97 c	9,01 ± 0,61 b	8,03 ± 0,63 c
Espiga	0				3,13 ± 0,34 a	4,54 ± 1,10 a
	110				4,50 ± 0,68 b	6,71 ± 1,31 a b
	280				5,75 ± 0,22 c	7,74 ± 0,29 b
	460				5,65 ± 0,50 b c	8,86 ± 0,60 b
Grano	0					
	110					
	280					
	460					
Total	0	4,89 ± 1,24 a	7,45 ± 0,99 a	10,68 ± 1,66 a	13,78 ± 0,94 a	14,11 ± 1,77 a
	110	6,69 ± 1,64 a	8,82 ± 0,79 a	13,63 ± 1,03 a b	17,73 ± 2,67 a b	19,16 ± 2,18 b
	280	9,42 ± 1,71 a b	12,02 ± 1,20 b	17,64 ± 1,68 b	21,19 ± 1,23 b	22,09 ± 1,76 b c
	460	12,92 ± 2,69 b	13,46 ± 0,96 b	18,15 ± 2,55 b	25,95 ± 1,04 c	25,62 ± 1,37 c

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p&lt;0,05; Tukey).

(Continúa)

Continuación Cuadro 6.

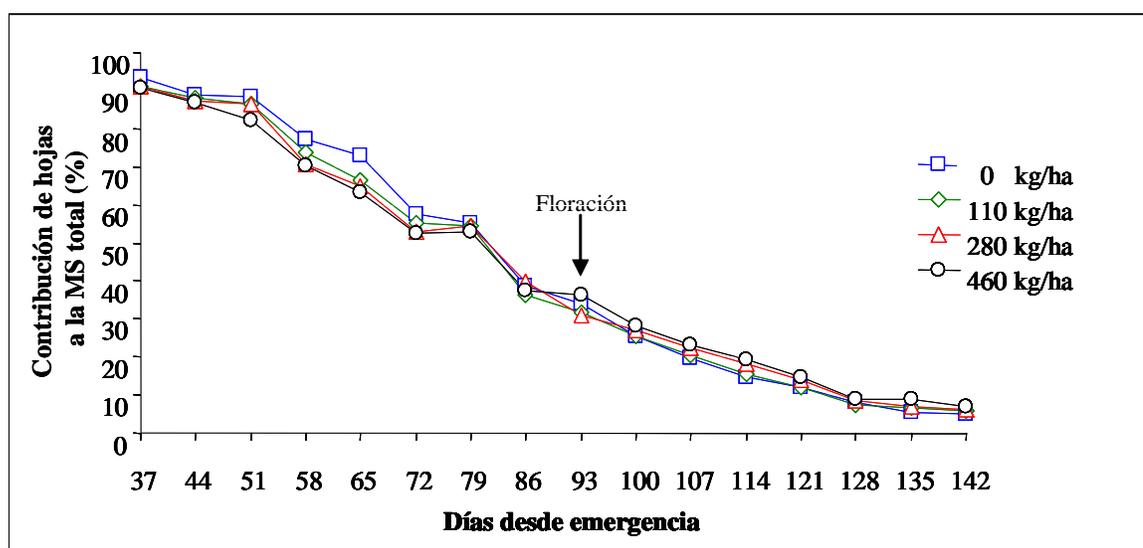
Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia					
		107	114	121	128	135	142
Hoja	0	4,26 ± 0,19 a	3,66 ± 0,50 a	2,35 ± 0,46 a	1,29 ± 0,61 a	0,48 ± 0,04 a	0,46 ± 0,08 a
	110	5,34 ± 0,37 a b	4,41 ± 0,18 a	2,88 ± 0,15 a b	1,12 ± 0,19 a	0,65 ± 0,08 a b	0,56 ± 0,10 a b
	280	6,29 ± 0,73 b c	5,83 ± 0,53 b	3,63 ± 0,29 b	1,57 ± 0,09 a	0,85 ± 0,08 b	0,71 ± 0,06 b c
	460	7,36 ± 0,95 c	6,04 ± 0,48 b	3,66 ± 0,26 b	1,77 ± 0,08 a	1,21 ± 0,10 c	0,91 ± 0,12 c
Tallo	0	6,05 ± 0,55 a	7,95 ± 1,17 a	6,44 ± 1,10 a	4,85 ± 2,05 a	2,54 ± 0,18 a	2,510 ± 0,28 a
	110	6,86 ± 1,06 a b	9,21 ± 0,77 a	6,73 ± 0,88 a	4,27 ± 0,50 a	2,73 ± 0,62 a	2,651 ± 0,28 a
	280	7,66 ± 0,15 a b	10,19 ± 0,64 a	7,83 ± 0,73 a	5,17 ± 0,26 a	3,65 ± 0,35 a	3,050 ± 0,22 a b
	460	9,09 ± 1,68 b	10,50 ± 1,63 a	8,21 ± 0,87 a	5,47 ± 0,09 a	3,68 ± 0,71 a	3,481 ± 0,12 b
Espiga	0	5,37 ± 0,62 a	7,27 ± 0,97 a	3,38 ± 0,38 a	1,57 ± 0,34 a	1,58 ± 0,25 a	1,27 ± 0,13 a
	110	8,22 ± 1,66 b	10,09 ± 0,94 b	3,70 ± 0,33 a	1,91 ± 0,17 a b	1,53 ± 0,12 a	1,13 ± 0,12 a
	280	8,42 ± 0,66 b	10,85 ± 0,56 b	3,86 ± 0,86 a	2,17 ± 0,06 b	1,72 ± 0,13 a	1,33 ± 0,14 a
	460	9,20 ± 1,08 b	10,22 ± 0,25 b	3,59 ± 0,47 a	2,34 ± 0,13 b	1,69 ± 0,13 a	1,43 ± 0,18 a
Grano	0			7,11 ± 1,45 a	9,90 ± 2,37 a	12,80 ± 0,88 a	17,71 ± 2,77 a
	110			9,73 ± 0,99 b	14,74 ± 1,85 b	16,27 ± 3,25 a b	19,62 ± 3,85 a
	280			10,44 ± 0,14 b	16,72 ± 0,93 b	18,21 ± 2,28 a b	20,04 ± 2,41 a
	460			10,05 ± 0,54 b	16,95 ± 0,66 b	18,81 ± 1,85 b	22,77 ± 2,02 a
Total	0	15,68 ± 1,00 a	18,88 ± 2,48 a	19,28 ± 3,07 a	17,61 ± 1,18 a	17,39 ± 1,28 a	21,95 ± 3,10 a
	110	20,42 ± 2,46 a b	23,71 ± 1,73 b	23,04 ± 1,68 a b	22,03 ± 2,55 b	21,18 ± 3,79 a b	23,97 ± 4,18 a
	280	22,37 ± 1,49 b	26,87 ± 0,71 b	25,76 ± 0,63 b	25,62 ± 0,75 b c	24,43 ± 2,75 a b	25,14 ± 2,57 a
	460	25,65 ± 3,50 b	26,77 ± 1,91 b	25,51 ± 0,66 b	26,53 ± 0,78 c	25,38 ± 2,57 b	28,59 ± 2,00 a

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ; Tukey).

#### 4.2.2 Contribución porcentual de cada órgano a la materia seca total producida.

Para cada órgano se determinó la contribución porcentual a la materia seca total producida.

4.2.2.1 Contribución porcentual de las hojas. Al inicio de los muestreos (37 días desde emergencia), la contribución porcentual de las hojas presentó un máximo, luego se observó una continua disminución que se mantuvo hasta la cosecha (Figura 19)



**FIGURA 19** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la contribución de las hojas de trigo en el total de materia seca producida.

Desde el primer muestreo hasta los 72 días desde emergencia se observó que el tratamiento testigo y en general los tratamientos de menor fertilización fosforada presentaron un porcentaje de contribución de hojas mayor, ordenándose sus valores en función inversa a la fertilización fosforada (Cuadro 7). Si bien no existieron diferencias significativas entre tratamientos en los tres muestreos iniciales, se observó que las diferencias en la contribución de las hojas fueron significativas entre los días 58 y 72 después de emergencia. En estos tres muestreos, fue el tratamiento testigo el que

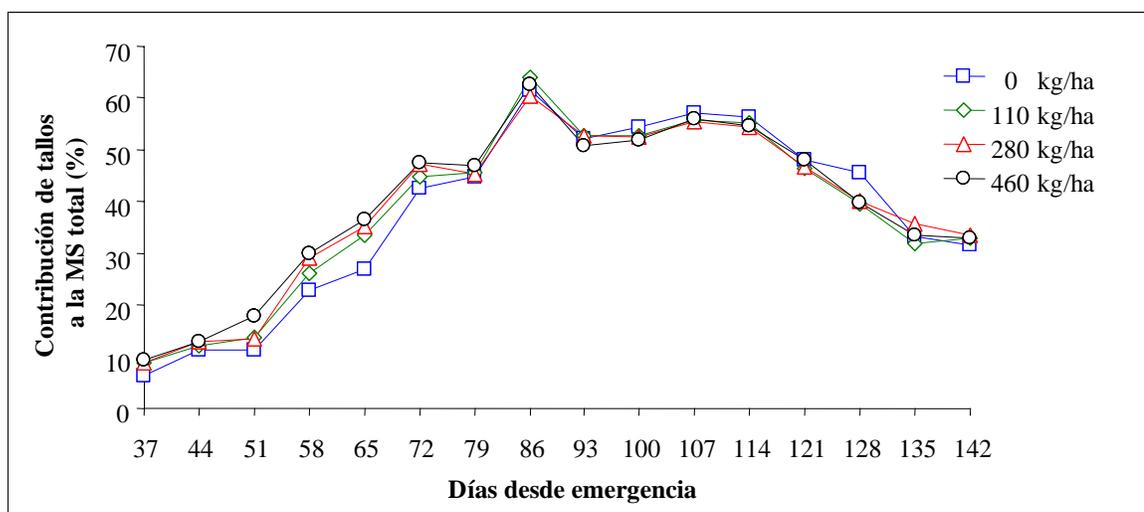
presentó diferencias significativas. Un comportamiento similar fue observado por ELLIOTT *et al.* (1997a), donde plantas de trigo bajo estrés de fósforo presentaban una mayor contribución de las hojas a la materia seca total del cultivo, a diferencia de las plantas tratadas con mayor fertilización fosforada, este comportamiento lo atribuyeron a un tipo de mecanismo adaptativo de la planta que le permitiría mantener una adecuada eficiencia fotosintética.

Independiente del tratamiento las hojas presentaron dominancia en la contribución de hojas hasta el séptimo muestreo (día 79), del octavo muestreo hasta cosecha (entre espigadura y floración) la contribución de las hojas disminuyó, llegando a valores que oscilaron entre 5,0 y 7,0 % siendo el tratamiento testigo y el de mayor fertilización fosforada, en los cuales se observó diferencias significativas (Cuadro 7).

4.2.2.2 Contribución porcentual de los tallos. Los tallos presentaron una contribución porcentual de materia seca baja en el primer muestreo, la cual incrementa hasta un primer máximo a los 86 días desde emergencia. Luego hubo una disminución en la contribución para llegar a un segundo máximo a los 107 días desde emergencia, de este momento la contribución de los tallos fue disminuyendo hasta cosecha (Figura 20).

Se observó que la contribución de los tallos no fue afectada por los distintos tratamientos, a excepción del muestreo 4, 5 y 6 donde los tratamientos de media y alta fertilización fosforada fueron distintos estadísticamente del testigo (Cuadro 7).

El primer máximo observado a los 86 días desde emergencia estuvo influenciado por la presencia de espigas al momento de determinarlo. En el segundo máximo observado, la contribución promedio entre tratamientos fue de 56,1% siendo 2,5 veces mayor a la contribución presentada por las hojas (Cuadro 7).



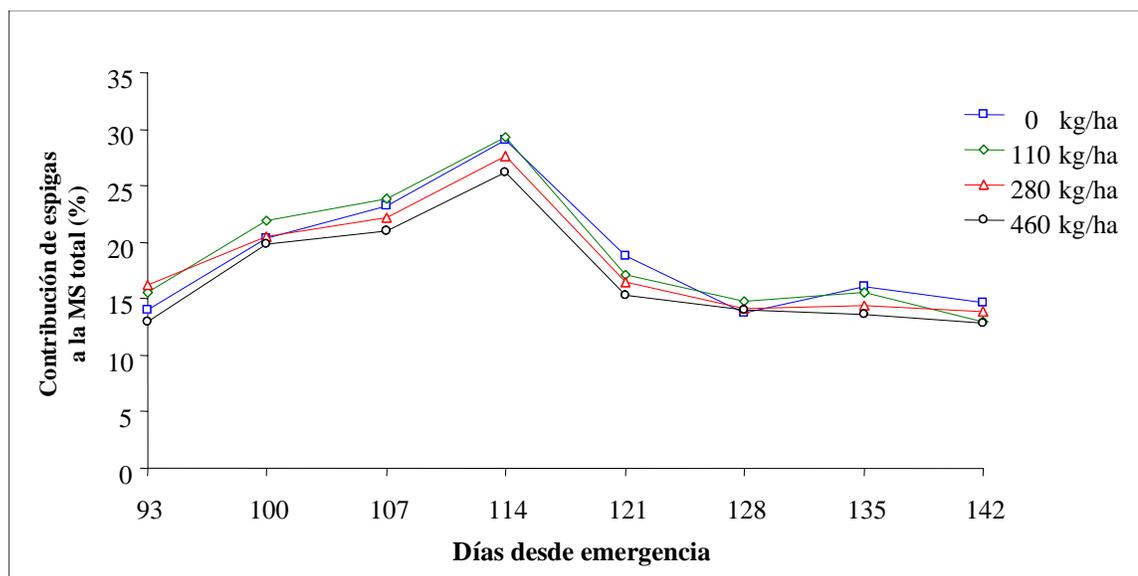
**FIGURA 20 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la contribución de los tallos de trigo en el total de materia seca producida.**

Al comparar las contribuciones de MS de hojas y tallos se observó que a los 37 días desde emergencia las hojas representan sobre un 90% la materia seca total de la planta, este porcentaje fue disminuyendo hasta que los tallos aumentaron su participación. Entre 79 y 93 días desde emergencia se produjo un cambio en la contribución, ya que tallos y hojas presentaron porcentajes de contribución similares (cercano al 50%). Después de este momento (entre espigadura y floración) son los tallos los que presentaron la mayor participación.

4.2.2.3 Contribución porcentual de las espigas. Desde el primer muestreo de espigas (93 días desde emergencia) la contribución de este órgano incrementó hasta un máximo a los 114 días después de emergencia. Después, ésta contribución decreció (día 121) para mantenerse relativamente constante hasta la cosecha (Figura 21).

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos para los primeros 5 muestreos (excepto a los 100 días desde emergencia). Estas diferencias fueron principalmente entre el tratamiento testigo y el de mayor fertilización fosforada, donde

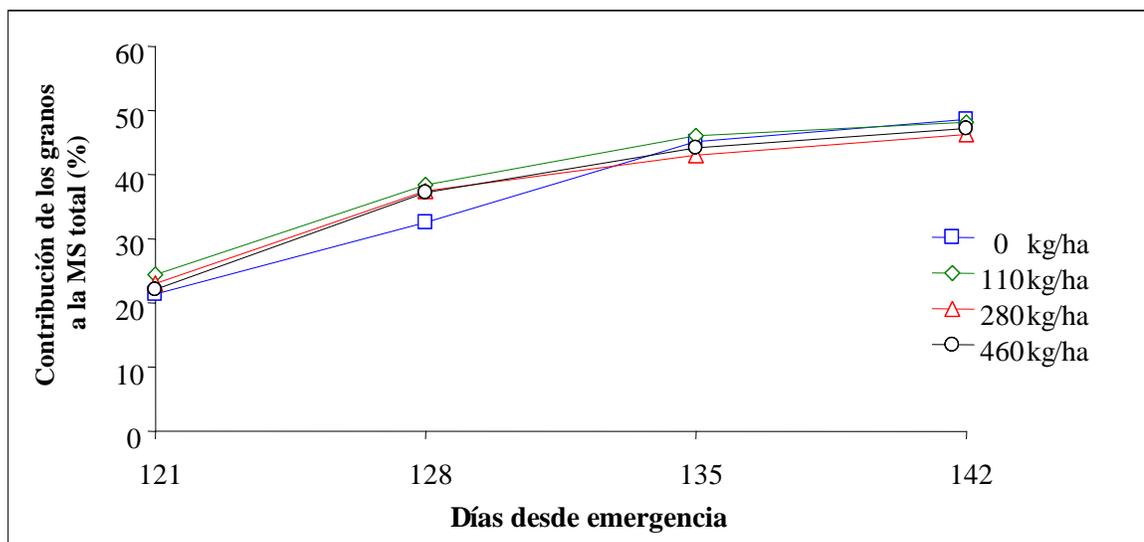
las contribuciones mayores las presentó el tratamiento testigo. Finalmente, entre 128 y 142 días desde emergencia (cosecha) no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 7).



**FIGURA 21 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la contribución de las espigas de trigo en el total de materia seca producida.**

4.2.2.4 Contribución porcentual de los granos. En general, en todos los tratamientos se observó un aumento de la contribución de los granos, desde el inicio de los muestreos de estos (121 días desde emergencia) hasta la cosecha (día 142) (Figura 22).

Inicialmente las contribuciones fluctuaron entre 21 y 25% existiendo diferencias significativas correspondiendo éstas al tratamiento testigo y al de mínima fertilización (Cuadro 7), después de este momento hasta cosecha no existió diferencias significativas en la contribución de los granos a la MS por efecto de los tratamientos (Cuadro 7).



**FIGURA 22 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la contribución de los granos de trigo en el total de materia seca producida.**

Finalmente se observó que al momento de cosecha los órganos que más participación porcentual tuvieron en la MS fueron los granos, seguido por; tallos, espigas y hojas. Siendo en promedio valores de 47,7 32,8 13,6 y 6,0% respectivamente.

**CUADRO 7 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la contribución de órganos (%) en la materia seca total producida por el cultivo del trigo.**

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia					
		37	44	51	58	65	72
Hoja	0	93,6 ± 1,7 a	88,6 ± 3,9 a	88,6 ± 3,0 a	77,3 ± 2,1 b	73,0 ± 2,5 b	57,4 ± 3,2 b
	110	91,2 ± 3,5 a	87,9 ± 3,5 a	86,3 ± 2,4 a	73,8 ± 2,7 a b	66,6 ± 2,3 a b	55,2 ± 1,3 a b
	280	91,3 ± 0,4 a	87,1 ± 0,6 a	86,6 ± 2,6 a	70,8 ± 0,6 a	64,8 ± 3,4 a	52,7 ± 1,3 a
	460	90,8 ± 0,9 a	87,0 ± 2,0 a	82,1 ± 7,8 a	70,2 ± 0,9 a	63,4 ± 0,9 a	52,5 ± 0,4 a
Tallo	0	6,4 ± 1,7 a	11,4 ± 3,9 a	11,4 ± 3,0 a	22,7 ± 2,1 a	27,0 ± 2,5 a	42,6 ± 3,2 a
	110	8,8 ± 3,5 a	12,1 ± 3,5 a	13,7 ± 2,4 a	26,2 ± 2,7 a b	33,4 ± 2,3 a b	44,8 ± 1,3 a b
	280	8,7 ± 0,4 a	12,9 ± 0,6 a	13,4 ± 2,6 a	29,2 ± 0,6 b	35,2 ± 3,4 b	47,3 ± 1,3 b
	460	9,2 ± 0,9 a	13,0 ± 2,0 a	17,9 ± 7,8 a	29,8 ± 0,9 b	36,6 ± 0,9 b	47,5 ± 0,4 b
Espiga	0						
	110						
	280						
	460						
Grano	0						
	110						
	280						
	460						

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p<0,05; Tukey).

(Continúa)

Continuación Cuadro 7.

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia					
		79	86	93	100	107	114
Hoja	0	55,2 ± 3,8 a	38,4 ± 0,9 a	33,9 ± 1,9 a	25,4 ± 2,1 a	19,6 ± 1,2 a	14,8 ± 0,2 a
	110	54,4 ± 0,5 a	36,1 ± 1,8 a	31,8 ± 1,9 a	25,4 ± 0,4 a	20,5 ± 1,4 a	15,5 ± 0,2 a
	280	54,6 ± 0,9 a	39,6 ± 3,4 a	31,0 ± 3,7 a	27,2 ± 1,6 a	22,3 ± 1,1 a	18,0 ± 0,5 b
	460	53,0 ± 0,8 a	37,3 ± 3,0 a	36,3 ± 0,5 a	28,2 ± 0,9 a	23,0 ± 1,5 a	19,4 ± 0,9 c
Tallo	0	44,8 ± 3,8 a	61,6 ± 0,9 a	52,1 ± 1,3 a	54,3 ± 1,7 a	57,2 ± 1,8 a	56,2 ± 0,6 a
	110	45,6 ± 0,5 a	63,9 ± 1,8 a	52,7 ± 1,3 a	52,7 ± 1,0 a	55,7 ± 1,5 a	55,2 ± 0,3 a
	280	45,4 ± 0,9 a	60,4 ± 3,4 a	52,8 ± 3,9 a	52,3 ± 0,8 a	55,6 ± 1,2 a	54,3 ± 1,0 a
	460	47,0 ± 0,8 a	62,7 ± 3,0 a	50,6 ± 1,0 a	51,9 ± 0,5 a	55,9 ± 1,3 a	54,5 ± 1,2 a
Espiga	0			14,0 ± 0,8 a b	20,3 ± 3,4 a	23,2 ± 1,2 a b	29,0 ± 0,6 b
	110			15,6 ± 0,8 b c	21,9 ± 1,1 a	23,9 ± 0,8 b	29,3 ± 0,1 b
	280			16,2 ± 0,2 c	20,5 ± 1,4 a	22,2 ± 0,6 a b	27,7 ± 1,0 a b
	460			13,0 ± 0,7 a	19,9 ± 1,2 a	21,0 ± 1,0 a	26,1 ± 0,7 a
Grano	0						
	110						
	280						
	460						

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p&lt;0,05; Tukey).

(Continúa)

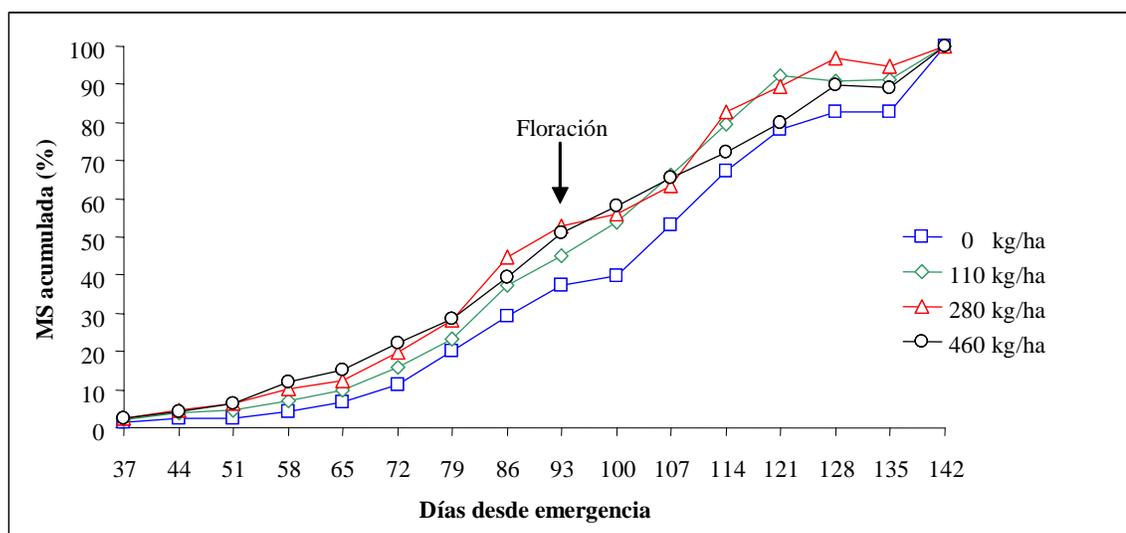
Continuación Cuadro 7.

Parte vegetal	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Días desde emergencia			
		121	128	135	142
Hoja	0	11,8 ± 0,9 a	8,0 ± 2,0 a	5,4 ± 0,4 a	5,0 ± 0,3 a
	110	12,1 ± 0,3 a	7,5 ± 0,5 a	6,5 ± 1,6 a b	5,7 ± 0,3 a b
	280	13,7 ± 0,2 b	8,4 ± 0,3 a	7,0 ± 0,5 a b	6,3 ± 0,2 a b
	460	14,6 ± 0,7 b	9,0 ± 0,1 a	8,7 ± 1,3 b	6,9 ± 0,8 b
Tallo	0	48,0 ± 1,3 a	45,6 ± 10,9 a	33,3 ± 1,1 a	31,7 ± 1,1 a
	110	46,4 ± 1,8 a	39,4 ± 1,6 a	31,9 ± 0,8 a	33,1 ± 2,5 a
	280	46,7 ± 1,4 a	40,1 ± 1,6 a	35,6 ± 2,6 a	33,5 ± 1,2 a
	460	48,0 ± 0,7 a	39,7 ± 0,1 a	33,4 ± 1,1 a	33,0 ± 1,2 a
Espiga	0	18,8 ± 1,1 b	13,7 ± 3,4 a	16,1 ± 1,2 a	14,7 ± 0,5 a
	110	17,1 ± 0,9 a b	14,8 ± 0,9 a	15,5 ± 1,7 a	13,0 ± 0,8 a
	280	16,5 ± 1,5 a b	14,1 ± 0,3 a	14,4 ± 0,8 a	13,8 ± 1,4 a
	460	15,3 ± 0,2 a	14,0 ± 0,4 a	13,6 ± 0,3 a	12,8 ± 0,2 a
Grano	0	21,3 ± 1,8 a	32,6 ± 9,4 a	45,2 ± 0,3 a	48,7 ± 1,0 a
	110	24,4 ± 0,7 b	38,3 ± 0,8 a	46,1 ± 3,3 a	48,2 ± 1,8 a
	280	23,1 ± 0,4 a b	37,4 ± 1,5 a	43,1 ± 3,5 a	46,4 ± 1,0 a
	460	22,1 ± 0,2 a b	37,3 ± 0,3 a	44,3 ± 0,7 a	47,3 ± 1,6 a

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ; Tukey).

**4.2.3 Acumulación porcentual de MS y P.** Para calcular la acumulación porcentual de MS, se tomo como máxima producción la producida al momento de cosecha (día 142). En general los tratamientos presentaron un comportamiento similar en la materia seca acumulada. Se observó que la acumulación porcentual de la MS fue inicialmente baja, desde los 37 a los 79 días desde emergencia. Luego hay un incremento que se mantiene hasta la cosecha (Figura 23).

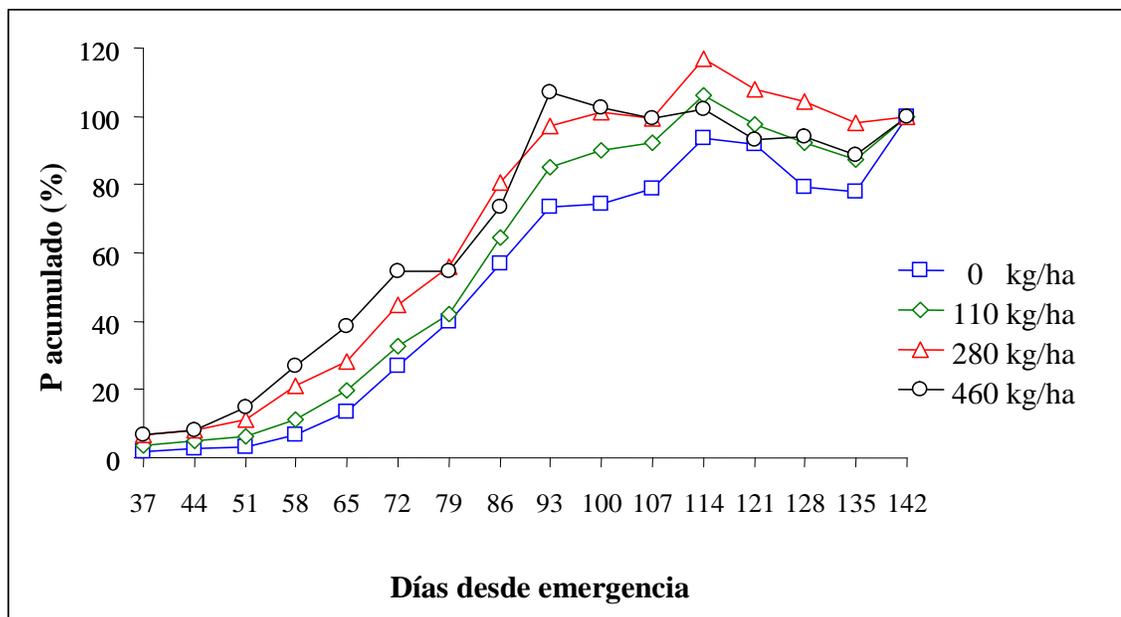
Desde los 93 días desde emergencia se acumuló alrededor de los 40 a 50% de la materia seca para todos los tratamientos fertilizados, momento que es coincidente con la floración del cultivo. A su vez en el tratamiento testigo se observó un desfase de alrededor de dos semanas, ya que alcanzó el 50% de la MS acumulada a los 107 días desde emergencia.



**FIGURA 23 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la acumulación porcentual de materia seca total en el tiempo.**

Al analizar el comportamiento de la MS con la absorción de fósforo (Figura 24) se observó que, independiente de los tratamientos, al momento de floración (día 93), hubo un máximo de acumulación de fósforo, manteniéndose relativamente constante

hasta cosecha. Similarmente, en el estudio de GREGORY *et al.* (1979b) encontraron que la absorción de P llega a un máximo después del período de espigadura. Estos autores relacionaron este comportamiento debido a un efecto radical, puesto que de la etapa de floración en adelante la tasa de crecimiento de las raíces es baja y aumenta la senescencia de raíces más viejas.



**FIGURA 24** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) en la acumulación porcentual de fósforo total en el tiempo.

**4.2.4 Tasa de crecimiento.** La tasa de crecimiento en materia seca se determinó para cada órgano vegetal y para la materia seca aérea total producida. La tasa de crecimiento corresponde al delta de crecimiento diario (kg MS/ha/día). Se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de crecimiento} = \frac{\text{kgMS acumulada}_{t_2} - \text{kgMS acumulada}_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (4.7)$$

donde  $t_2$  y  $t_1$ , representan el tiempo posterior y el tiempo inmediatamente anterior. El de tiempo en este estudio fue de 7 días.

La estimación de las tasas se realizó a partir de regresiones ajustadas entre la producción de materia seca acumulada en función del tiempo cronológico (conversión a grados días en el punto 3.1.4). Esta decisión se tomó dado que al calcular las tasas de crecimiento directamente de los datos promedio para cada tratamiento, se obtienen valores erráticos, debido a que los valores reales son tomados desde muestras independientes en las condiciones de campo. Para el ajuste de todos los datos de producción de materia seca acumulada a las ecuaciones de regresión solo se dejaron dos muestreos sin considerar: uno en la producción de tallos y otro en la producción de espigas. En el caso de tallos, no se consideró el muestreo del día 86, ya que los datos sugieren la presencia de espiga embuchada, que no pudo ser separada físicamente de los tallos. Del mismo modo, en espigas, no se consideró el muestreo del día 114, ya que existió presencia de grano, el cual no se pudo separar de la espiga en ese momento, influyendo en el valor determinado.

4.2.4.1 Tasa de crecimiento de hojas. Las tasas de crecimiento de hojas en cada tratamiento se derivaron desde el ajuste a una ecuación de regresión que representa la distribución Gaussiana, entre la materia seca acumulada de las hojas y el tiempo transcurrido desde la emergencia (Anexo 4). Los parámetros de esta ecuación se presentan en el Cuadro 8, donde Y: corresponde a la producción de materia seca acumulada de las hojas expresadas en kg MS/ha; Area: al área bajo la curva; SD: a la desviación estándar; Pi: al valor de 3,14159; X: al tiempo en días desde la emergencia; Sy.x al error estándar y Mean: al valor en el tiempo X, donde se produce la mayor producción Y.

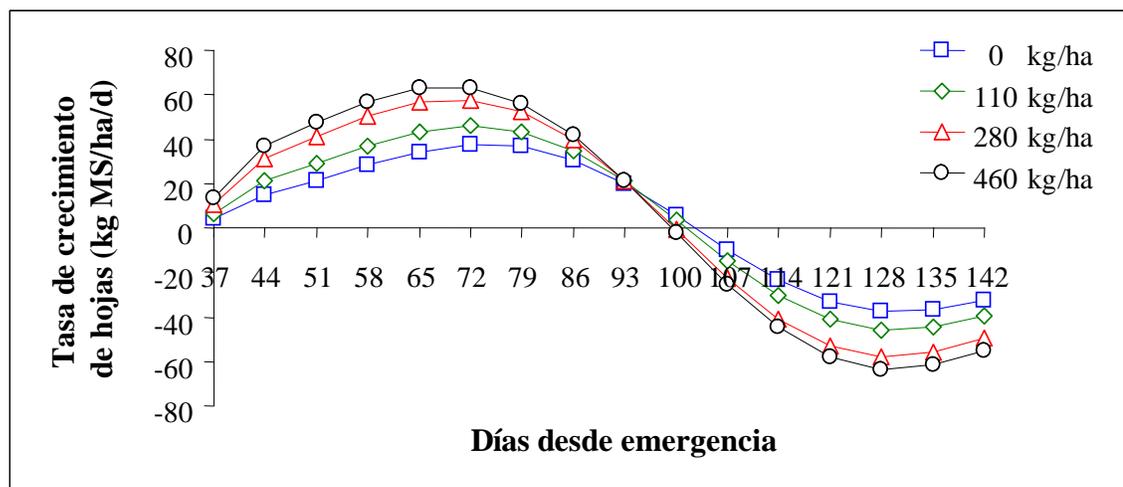
**CUADRO 8 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana del crecimiento de las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.**

Ecuación	$Y=(Area/(SD*(2*Pi)^{0.5}))*exp(-0.5*((X-Mean)/SD)^2)$			
Tratamiento	T1	T2	T3	T4
kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	0	110	280	460
Area	123453	159159	211051	244644
SD	28,05	28,86	29,64	30,44
Mean	98,94	97,86	96,17	95,84
Sy.x	208,3	206,3	282,5	257,7
R <sup>2</sup>	0,87	0,91	0,89	0,93

Las tasas de crecimiento de las hojas, obtenidas a partir de las regresiones, se presentan en la Figura 25, donde se observa que, todos los tratamientos comienzan con tasas de crecimiento bajas que alcanzan un máximo a los 72 días de emergencia. Luego las tasas de crecimiento de las hojas decrecen hasta los 100 días desde emergencia, donde las tasas son cercanas a cero. A partir de este momento, las tasas son negativas sugiriendo una translocación de carbohidratos hacia otros órganos. Sin embargo, debe considerarse que no hay mas expansión foliar, ya que el número de hojas quedó fijo al expandirse la hoja bandera. La tasa de crecimiento de las hojas continúa disminuyendo hasta el día 128 desde la emergencia, manteniéndose en una entrega de carbohidratos prácticamente constante hasta la cosecha.

La tasa máxima de crecimiento de hojas observada a los 72 días fluctúa entre 37,5 y 62,9 kg MS/ha/día, correspondiendo al tratamiento testigo y al de mayor fertilización fosforada y ordenándose en función de la fertilización fosforada aplicada. De los 100 días desde emergencia la tasa de crecimiento de las hojas comenzó a hacerse negativa, lo cual indicaría una desacumulación de MS producto de una translocación de carbohidratos, en estos momentos, se observa que las mayores desacumulaciones de MS se ordenan en función de la fertilización fosforada, donde, los tratamientos de mayor fertilización fosforada presentan la mayor desacumulación. En el mínimo observado a los 128 días, las tasas de crecimiento de hojas fluctuaron entre -37,5 y -63,4 kg

MS/ha/día, también en función de la fertilización fosforada, siendo más negativa en la mayor dosis de P aplicada. Este mínimo fue alcanzado una semana después de que se determinó la presencia de granos.



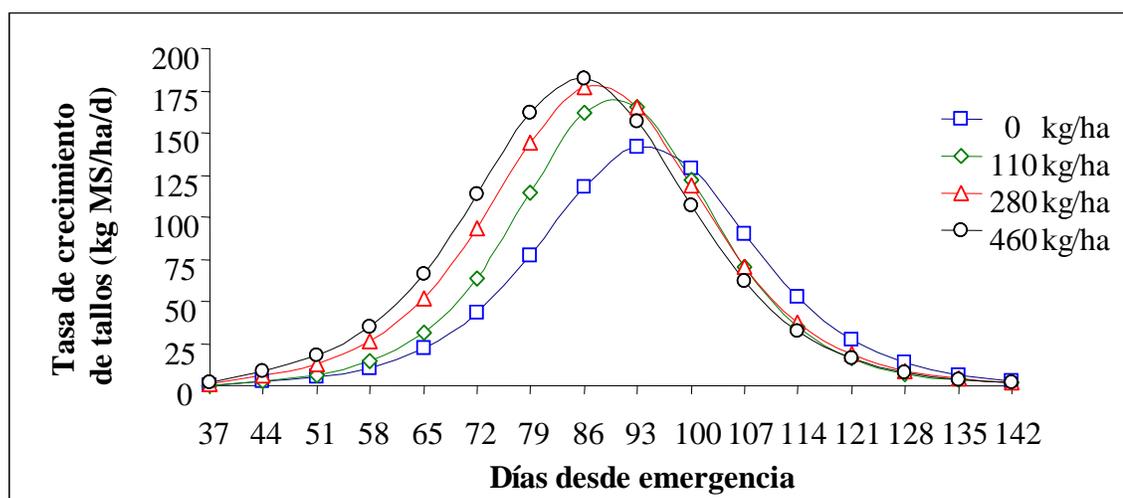
**FIGURA 25** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la tasa de crecimiento de las hojas.

4.2.4.2 Tasa de crecimiento de tallos. De igual forma que para las hojas, se ajustaron los datos a una regresión no lineal en base a la producción de MS acumulada de los tallos en función del tiempo. En este caso se utilizó un modelo sigmoideo (Anexo 5). Los parámetros de la ecuación ajustada se muestran en el Cuadro 9, donde, Y: corresponde a la producción de materia seca acumulada de los tallos (kg MS/ha); X: al tiempo, en días desde emergencia;  $Y_{m\acute{a}x}$ : representa la producción máxima de MS acumulada de los tallos; B: corresponde al valor en el tiempo (X) donde se encuentra el punto de inflexión de la curva; C: es un modificador de la pendiente de la curva y  $S_{y.x}$ : corresponde al error estándar de la ecuación.

**CUADRO 9** Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo [ $Y=Y_{\max}/(1+\exp((B-X)/C))$ ] de la materia seca de tallos producida en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Y <sub>max</sub>	B	C	R <sup>2</sup>	Sy.x
0	5216	90,59	9,061	0,92	692,1
110	5717	86,49	8,238	0,93	708,6
280	6591	84,27	9,119	0,96	612,9
460	6867	82,05	9,297	0,96	582,9

Las tasas de crecimiento de los tallos comenzaron con valores muy bajos en todos los tratamientos (37 días desde emergencia). Luego estas tasas de crecimiento de tallos incrementan llegando a un máximo entre 86 y 93 días desde emergencia (floración del cultivo). Desde este momento comienza una disminución en la tasa de crecimiento de los tallos, para llegar a cosecha con valores cercanos a cero (Figura 26).



**FIGURA 26** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) en la tasa de crecimiento de los tallos.

Al relacionar las tasas de crecimiento con las dosis fosforadas de cada tratamiento se observó que a medida que se aumentó la disponibilidad de fósforo, mayores fueron las tasas de crecimiento. De igual forma, se observó que existió un retraso en el tiempo pero alcanza la tasa máxima, en función de la dosis fosforada. Así

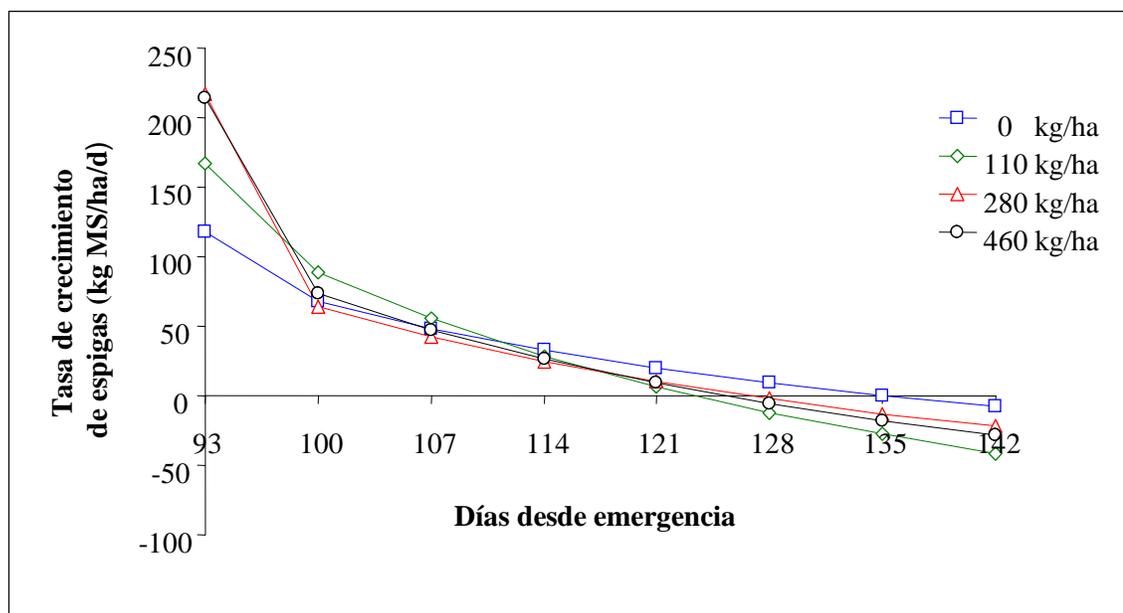
los tratamientos testigo y de menor fertilización fosforada presentaron su máxima tasa de crecimiento a los 93 días desde emergencia, una semana después que los tratamientos con mayor fertilización fosforada.

4.2.4.3 Tasa de crecimiento de espigas. La materia seca acumulada en el tiempo para las espigas se ajustó a una regresión de una ecuación lineal extendida (Anexo 6). El ajuste a esta regresión no lineal, a pesar de ser el mejor encontrado, no presentó un buen coeficiente de determinación, lo cual puede influir en el comportamiento de la tasa de crecimiento de espigas y se requiere de otros estudios para evaluar nuevamente el comportamiento de esta tasa de crecimiento. Los parámetros de esta ecuación se muestran en el Cuadro 10; donde, A: corresponde al intercepto en Y; B: a la pendiente lineal de la curva; C: un modificador de la pendiente lineal y  $S_{y.x}$ : al error estándar.

**CUADRO 10 Parámetros del ajuste a una regresión no lineal de una ecuación de tipo lineal extendida ( $Y=A+B*X+C/X$ ) de la materia seca de las espigas en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.**

kg $P_2O_5$	A	B	C	$R^2$	$S_{y.x}$
0	22840	-79	-1364000	0,71	306
110	41512	-163,2	-2340000	0,74	250
280	27811	-102,8	-1556000	0,78	187
460	32745	-123,9	-1834000	0,63	294

En la Figura 27 se observa para todos los tratamientos, que la tasa de crecimiento de las espigas comienzan en un máximo (93 días desde emergencia) y luego decrecer en función del tiempo. Entre los 121 y 128 días desde emergencia independiente de los tratamientos, las espigas empiezan a tener tasas de crecimiento negativas, lo cual parece indicar que estos órganos translocarían parcialmente carbohidratos a los granos, aunque en cantidades bajas.



**FIGURA 27 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la tasa de crecimiento de las espigas.**

4.2.4.4 Tasa de crecimiento de granos. La materia seca acumulada de los granos en el tiempo se ajustó a una regresión lineal (Anexo 7), de esta se obtuvieron los parámetros; Y que corresponde a la producción de materia seca expresada en kg MS/ha y X que es el tiempo en días desde emergencia, a su vez se puede observar (Cuadro 11) el valor de las constantes “A” y “B” para cada tratamiento e “intercepto en X” que representa el día donde la MS de los granos es cero. Para el caso de una regresión lineal, “B” equivale a la pendiente, por ende, es la tasa de crecimiento de los granos, expresada en kg MS/ha/día.

**CUADRO 11** Parámetros del ajuste a una regresión lineal ( $Y=A+B*X$ ) de la materia seca de los granos en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	A	B	intercepto en X	R <sup>2</sup>	Sy.x
0	-25110	227,8	110	0,88	708
110	-18830	186,5	101	0,80	810
280	-20300	201,6	101	0,79	889
460	-27670	260,7	106	0,93	619

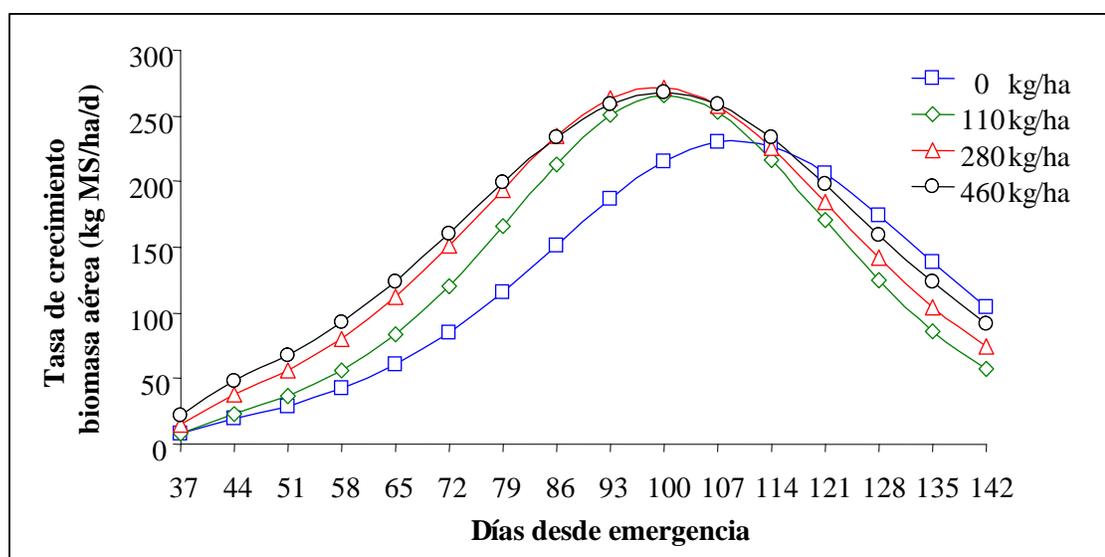
4.2.4.5 Tasa de crecimiento del total de la parte aérea. Las tasas de crecimiento total aéreo se calcularon a partir de la suma de la producción de materia seca acumulada para cada órgano vegetal. Este total se ajustó a una regresión no lineal de tipo sigmoideo (Anexo 8), ya explicada anteriormente en la materia seca acumulada de tallos.

**CUADRO 12** Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo [ $Y=Y_{max}/(1+exp((B-X)/C))$ ] de la materia seca total producida en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Y <sub>max</sub>	B	C	R <sup>2</sup>	Sy.x
0	15899	105,8	17,13	0,97	892
110	15861	96,8	14,85	0,97	930
280	18358	95,72	16,82	0,98	885
460	20000	96,43	18,61	0,99	722

Una vez realizado el ajuste y posterior a la desacumulación de la materia seca en los periodos de tiempo, se graficaron las tasas total de crecimiento (Figura 28). En estas se observa que todos los tratamientos comenzaron con una baja tasa de crecimiento que continuó en un incremento hasta llegar a un máximo entre los 100 y 107 días desde emergencia. Luego estas decrecen hasta el momento de cosecha (142 días desde emergencia). Se observó un efecto de los tratamientos de fertilización fosforada sobre las tasas de crecimiento total, ya que a mayores dosis, mayores fueron las tasas de

crecimiento, siendo en el máximo de los tratamientos fertilizados entre 266 y 272 kg MS/ha/día, y para el tratamiento testigo 230 kg MS/ha/día. Otro efecto fue el desfase observado en la tasa de crecimiento total del tratamiento testigo, donde este tratamiento alcanza el máximo una semana después (107 días desde emergencia) a los tratamientos fertilizados (100 días desde emergencia). Estos resultados concuerdan con el estudio de ELLIOTT *et al.* (1997a) donde demostraron que deficiencias de fósforo reducen claramente el crecimiento del trigo y retrasan las fases de desarrollo. Esta deficiencia de fósforo resultaría de modificaciones tempranas en los procesos fisiológicos del cultivo, los cuales tendrían como objetivo principal generar al menos una espiga fértil por planta. Finalmente, este autor sugiere que la tasa fotosintética del cultivo es gobernada por el nivel de fósforo de ésta y que las tasas de crecimiento subóptimas son un mecanismo adaptativo que disminuye los requerimientos de fósforo permitiendo, de esta manera, que el cultivo pueda obtener el fósforo necesario desde suelos que presentan deficiencia de fósforo disponible.



**FIGURA 28 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la tasa de crecimiento total de materia seca.**

**4.2.5 Tasas de absorción de fósforo.** Las tasas de absorción se determinaron para cada órgano vegetal y para el total absorbido en la parte aérea. Estas fueron estimadas en forma similar a las tasas de crecimiento, es decir, a partir de regresiones ajustadas a los valores reales promedio de la absorción de fósforo acumulada en el tiempo, para cada órgano vegetal evaluado. Similarmente que para la acumulación de materia seca en el ajuste de los datos no se consideró el muestreo del día 86 para la absorción acumulada de fósforo de los tallos y el día 114 para la acumulación del P absorbido en las espigas.

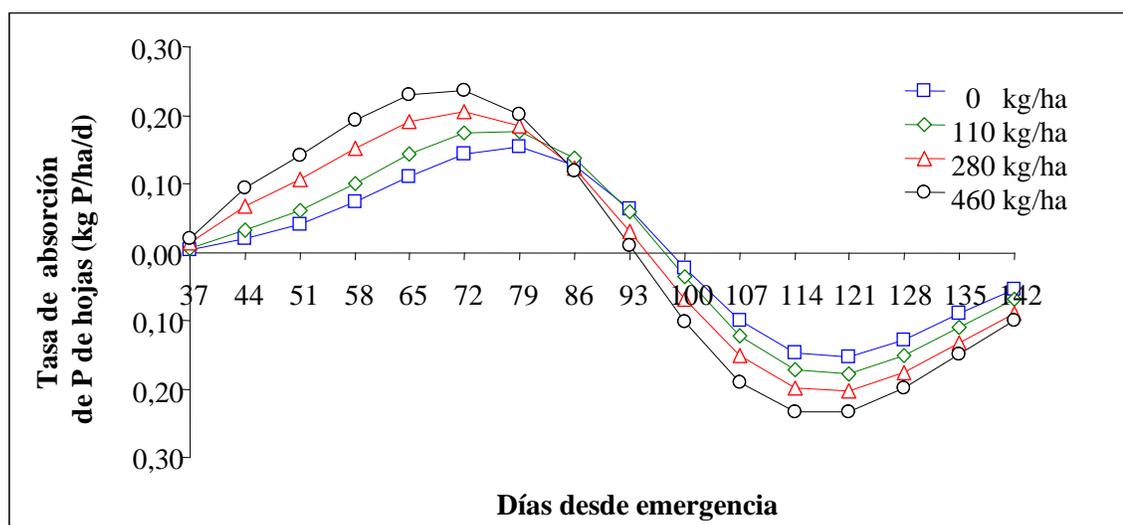
4.2.5.1 Tasa de absorción de P de hojas. Los datos de absorción de P acumulado de las hojas fueron ajustados a una regresión de distribución Gaussiana (Cuadro 13), donde; Y corresponde a la absorción de fósforo en kg P/ha y X al tiempo en días desde la emergencia.

**CUADRO 13 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.**

<b>Ecuación</b>	<b><math>Y=(Area/(SD*(2*Pi)^{0.5}))*exp(-0.5*((X-Mean)/SD)^2)</math></b>			
<b>Tratamiento</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
<b>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha</b>	0	110	280	460
<b>Area</b>	267	339	459	557
<b>SD</b>	20,31	21,21	23,14	23,66
<b>Mean</b>	94,66	93,84	91,61	90,08
<b>Sy.x</b>	0,510	0,579	0,781	0,979
<b>R<sup>2</sup></b>	0,93	0,93	0,92	0,91

En base a las regresiones ajustadas (Anexo 9) se calcularon las tasas de absorción de P de las hojas para los cuatro tratamientos (Figura 29). Se observa que desde los 37 días desde emergencia, todos los tratamientos comenzaron a aumentar sus tasas de absorción hasta un máximo a los 72 días desde la emergencia. Desde este momento las tasas de absorción de P de hojas decrecieron para llegar entre los 93 y 100 días desde emergencia a tasas de absorción de P cercanas a cero. Luego las tasas de absorción de P

se hicieron negativas (mostrando una translocación de P) para llegar a un mínimo a los 121 días desde emergencia, disminuyendo la desacumulación de P hacia la cosecha (142 días desde emergencia).



**FIGURA 29 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la tasa de absorción de fósforo de las hojas.**

Se observó que en el máximo alcanzado, las tasas de absorción de P de hojas se ordenaron en función de las dosis fosforadas, siendo los tratamientos de mayor fertilización fosforada, los que presentaron mayores tasas de absorción de P. Entre los 93 y 100 días en adelante ya no ocurre absorción neta de P por las hojas en ningún tratamiento y predominaría la translocación de fósforo hacia otros órganos, momento coincidente entre las etapas de floración y anthesis del cultivo.

El momento de mayor desacumulación del P en las hojas, ocurrió cercano al inicio del muestreo de los granos (114-121 días de emergencia), observándose que las tasas de absorción de P negativas se ordenan en función de la dosis fosforada, ya que tratamientos de mayor fertilización fosforada presentaron las mayores desacumulaciones de P. Del mínimo descrito en la curva, en adelante, la desacumulación de fósforo entre tratamientos comienza a ser menor hasta el momento de cosecha, donde el tratamiento

testigo presentó una desacumulación de 0,05 kg P/ha/día, y el tratamiento de mayor fertilización fosforada 0,10 kg P/ha/día. Estos resultados sugieren que una vez alcanzada la tasa máxima de desacumulación (el mínimo en la curva) la translocación de P se restringe, probablemente debido a que disminuyen los compuestos orgánicos fosforados degradables en las hojas, quedando solo fracciones no translocables.

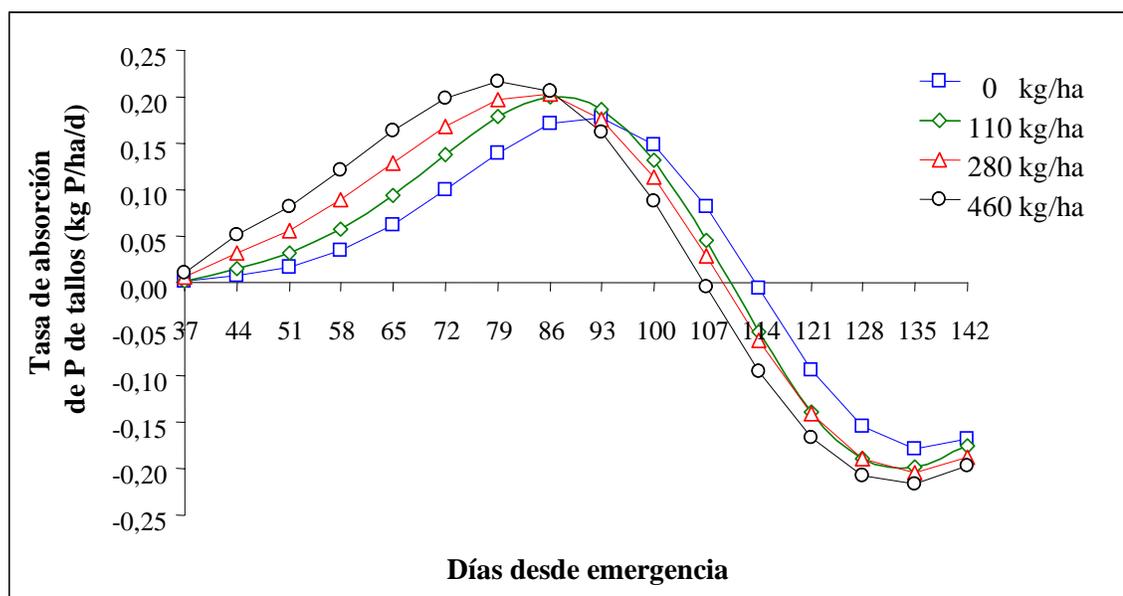
4.2.5.2 Tasa de absorción de P de tallos. La absorción de P acumulada en los tallos, se ajustó a una regresión de la distribución Gaussiana (Anexo 10). Los parámetros y la ecuación se observan en el Cuadro 14, donde Y corresponde a la absorción de P acumulado en los tallos y X al tiempo en días desde emergencia.

**CUADRO 14 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en los tallos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.**

Ecuación	$Y=(Area/(SD*(2*Pi)^{0.5}))*exp(-0.5*((X-Mean)/SD)^2)$			
	T1	T2	T3	T4
<b>Tratamiento</b>				
<b>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha</b>	0	110	280	460
<b>Area</b>	375,2	438,7	542,9	629,2
<b>SD</b>	22,41	22,94	25,3	26,41
<b>Mean</b>	110	106,7	105,7	103,2
<b>R<sup>2</sup></b>	0,89	0,91	0,90	0,89

Las tasas de absorción de P calculadas para los tallos en los cuatro tratamientos (Figura 30) presentan un aumento desde los 37 días desde emergencia hasta un máximo a los 79 días en los tratamientos de media y alta fertilización fosforada, diferenciándose de los tratamientos de menor fertilización fosforada. La tasa máxima se alcanzó el día 86 para el tratamiento de baja fertilización fosforada y una semana después (93 días desde emergencia) para el tratamiento testigo, sin fertilización fosforada. Las tasas de absorción de P disminuyeron para hacerse prácticamente cero entre 107 y 114 días desde emergencia, manteniéndose negativas hasta la cosecha (142 días desde emergencia), mostrando que existe translocación de P desde los tallos.

En los máximos y en los mínimos descritos por la curva se muestra que, a medida que aumentó la dosis de fertilización fosforada mayores fueron las tasas de absorción de P y mayores las translocaciones del P acumulado. Similarmente a lo observado para las tasas de crecimiento, las tasas de absorción de P de los tallos para cada órgano, presentaron desfases similares en el tiempo en los tratamientos con menor fertilización fosforada (Figura 26), lo cual sugiere que el tratamiento testigo y el de baja fertilización no alcanzarían a suplir las necesidades de fósforo óptimas del cultivo y de esta manera, las plantas en estos tratamientos podrían estar modificando su ontogenia, retrasando sus periodos fenológicos, tal como ha sido sugerido por ELLIOTT *et al.* (1997a).



**FIGURA 30 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) en la tasa de absorción de fósforo de los tallos.**

Los datos calculados de tasas de absorción de P para hojas y tallos sugieren un comportamiento similar entre ambos órganos, los cuales a partir de los 100 y 107 días desde emergencia, en este estudio, mantienen tasa de translocación hasta la cosecha (día 142). De este análisis se desprende que los tallos en forma similar a las tasas de

absorción de P de las hojas, en la medida que se acerca la cosecha del cultivo las diferencias entre las tasas de desacumulación entre tratamientos se hacen menores, llegando a valores entre 0,17 y 0,20 kg P/ha/día para el tratamiento testigo y el de mayor fertilización P, respectivamente.

4.2.5.3 Tasa de absorción de P de espigas. La regresión para la absorción de P acumulada a través del tiempo en cada tratamiento (Anexo 11) se ajustó al modelo de distribución Gaussiana. La ecuación y parámetros se presentan en el Cuadro 15, donde Y corresponde a la absorción de P acumulada expresada en kg P/ha y X al tiempo en días desde emergencia.

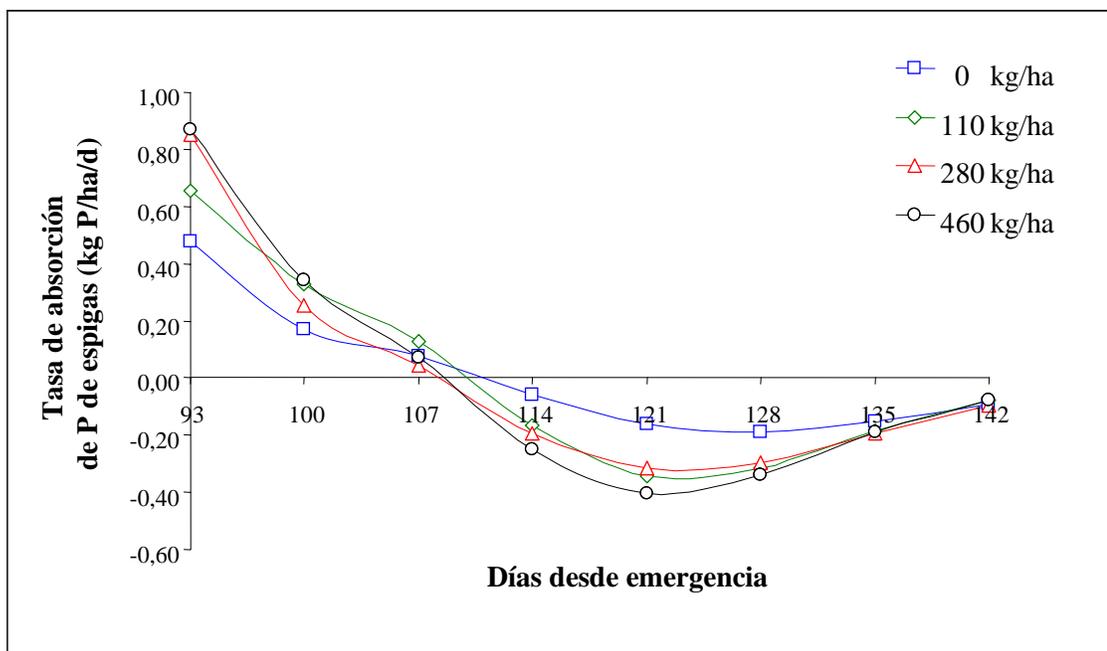
**CUADRO 15 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en espigas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.**

<b>Ecuación</b>	<b><math>Y=(AREA/(SD*(2*\pi)^{0.5}))*exp(-0.5*((X-Mean)/SD)^2)</math></b>			
<b>Tratamiento</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
<b>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha</b>	0	110	280	460
<b>Area</b>	201,7	256	302,9	304,8
<b>SD</b>	15,95	13,1	14,88	13,35
<b>Mean</b>	107,5	106,5	104,7	105
<b>Sy.x</b>	0,678	0,951	0,701	0,911
<b>R<sup>2</sup></b>	0,83	0,89	0,94	0,92

Las tasas de absorción de P de las espigas (Figura 31) presentaron un comportamiento similar entre tratamientos, comenzando con un máximo de tasa de absorción de P a los 93 días desde emergencia en todos los tratamientos. Luego, estas tasas de absorción de P decrecen para empezar la translocación neta o la desacumulación de P, entre 107 y 114 días desde emergencia.

Este comportamiento difirió del observado en hojas y tallos. Hojas y tallos presentan una fase inicial de incremento en la tasa de acumulación de P, en cambio las

espigas parten con una alta tasa, la cual posteriormente decrece. Esto se puede deber a que éste órgano tiene su formación antes de que se haga evidentemente visible (emergencia de la espiga), lo cual sugiere que podría presentar una fase incremental de absorción de P, cuando la espiga esta embuchada. Para evaluar esta hipótesis se requeriría de una separación más temprana de la espiga del tallo.



**FIGURA 31 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) en la tasa de absorción de fósforo de las espigas.**

Por otra parte, se observó que desde el momento en que los tratamientos llegan a la máxima desacumulación de P (121 días desde emergencia) hasta la cosecha (día 142) cada vez las desacumulaciones son menores, coincidiendo con lo descrito para hojas y tallos, lo cual pudiera estar indicando que existe una fracción del P acumulado que no participaría del proceso de translocación.

4.2.5.4 Tasa de absorción de P de granos. Los datos de la absorción de fósforo acumulada en granos se ajustaron a una regresión lineal para cada tratamiento, donde Y

corresponde a la absorción acumulada de fósforo en granos expresada en kg P/ha y X al tiempo expresados en días desde emergencia. Los parámetros de esta ecuación se presentan en el Cuadro 16.

**CUADRO 16 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de regresión lineal ( $Y = A + B \cdot X$ ) de la absorción de fósforo en granos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.**

kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	A	B	intercepto en X	R <sup>2</sup>	Sy.x
0	-53,31	0,50	108	0,82	1,90
110	-43,52	0,45	98	0,66	2,57
280	-40,54	0,43	94	0,74	2,06
460	-58,05	0,57	102	0,87	1,75

Al ser ajustados los datos a una regresión lineal, las pendientes (B) de cada tratamiento, las tasas de absorción de P son constantes en el tiempo. En la Figura 32 se observa que los tratamientos de mayor fertilización fosforada son los que presentan las mayores tasas de absorción de P en los granos, aunque las diferencias son pequeñas, siendo la mayor tasa (0,57 kg P/ha/día) en el tratamiento de mayor fertilización P y la menor en el tratamiento testigo que presentó un valor de 0,50 kg P/ha/día.

































































