

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

**Respuesta del uso interno de fósforo en trigo (*Triticum aestivum* L.)  
a cambios en la disponibilidad fosforada del suelo  
en un Andisol de la décima región de Chile**

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

**Luis Alexi Gómez Bulnes**

VALDIVIA - CHILE

2006

**PROFESOR PATROCINANTE:**

Dante Pinochet T.  
Ing. Agr., M. Sc., Ph. D.

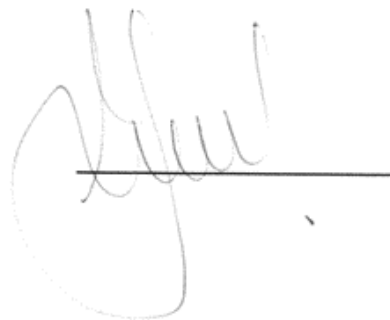
A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Dante Pinochet T.', written over a horizontal line.

**PROFESORES INFORMANTES**

Daniel Calderini R.  
Ing. Agr., Dr. Agro.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Daniel Calderini R.', written over a horizontal line.

Ricardo Fuentes P.  
Ing. Agr., M. Sc.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ricardo Fuentes P.', written over a horizontal line.

**INSTITUTO DE INGENIERIA AGRARIA Y SUELOS**

*Tia Ely, esta tesis te la dedico a ti. Gracias por entregar parte de tu vida para el crecimiento y el desarrollo de la mia. Hoy e logrado una meta muy importante en mi vida y ha sido en gran medida gracias a tu dedicación y esfuerzo. Siempre estare agradecido. Eres lo máximo.*

## ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
2	<b>REVISIÓN BIBLIOGRAFICA</b>	3
2.1	Antecedentes generales del trigo	3
2.1.1	Trigo en Chile	4
2.1.2	Descripción botánica	5
2.1.3	Variedades de trigo	6
2.1.4	Aspecto agroclimatológicos	7
2.1.5	Requerimientos hídricos	7
2.1.6	Requerimientos de suelo	8
2.1.7	Época de siembra	8
2.2	Fertilización	8
2.2.1	Método racional	8
2.2.2	Demanda de fósforo	9
2.2.2.1	Rendimiento a alcanzar	10
2.2.2.2	Requerimiento interno	10
2.2.2.3	Índice de cosecha	11
2.2.3	Suministro de fósforo	11
2.2.3.1	Eficiencia de fertilización fosforada	13
2.2.3.2	Eficiencia de absorción de fósforo	14
2.3	Nutrición fosforada del cultivo de trigo	15
2.3.1	Efecto de la nutrición fosforada en la productividad de materia seca del cultivo	15
2.3.2	Efecto en la distribución de materia seca	16
2.3.3	Efecto de la nutrición fosforada sobre el índice de cosecha	16
2.3.4	Efecto de la nutrición fosforada sobre la tasa de crecimiento	17
2.4	Concentración de fósforo	18
2.4.1	Concentraciones de fósforo en grano	19
2.4.2	Requerimiento interno de fósforo	20

Capítulo		Página
2.5	Absorción de fósforo en cultivos de trigo	20
2.5.1	Tasa de absorción de fósforo	21
2.6	Translocación de fósforo	22
2.7	Índice de extracción de fósforo a cosecha	22
3	<b>MATERIAL Y METODO</b>	23
3.1	Características del sitio	23
3.1.1	Características químicas	23
3.1.2	Características geomorfológicas	24
3.2	Características climáticas de la zona	24
3.3	Características climáticas del periodo de ensayo	25
3.4	Tiempo térmico	26
3.5	Material vegetal	27
3.6	Fertilizantes utilizados	27
3.7	Preparación de suelo	27
3.8	Tratamientos de fertilización fosforada	27
3.9	Diseño del ensayo	28
3.10	Tamaño de las parcelas	29
3.11	Siembra del ensayo	29
3.12	Fertilización del ensayo	29
3.13	Evaluación del ensayo a través de variables de medición directa	29
3.13.1	Muestreo del material vegetal	29
3.13.2	Procesamiento y peso del material vegetal	29
3.13.3	Determinación de la concentración de fósforo a través del método de calcinación y determinación del Fosfo-Vanadomolibdato	30
3.14	Evaluación del ensayo a través de variables derivadas	30
3.14.1	Absorción acumulada de fósforo	31
3.14.2	Tasa de absorción de fósforo	31
3.14.3	Tasa de crecimiento	31
3.14.4	Translocación de fósforo	31

Capítulo	Página	
3.14.5	Parámetros de demanda de fósforo	32
3.14.5.1	Índice de cosecha	32
3.14.5.2	Índice de extracción de fósforo	32
3.14.5.3	Requerimiento interno	32
3.14.6	Tratamiento óptimo de fertilización fosforada	32
3.14.7	Eficiencia de recuperación de fósforo	33
3.14.8	Eficiencia de uso de fósforo	33
3.15	Análisis estadístico	33
3.15.1	Evaluación estadística de los efectos de los tratamientos	33
3.15.2	Ajuste del crecimiento acumulado, absorción de fósforo, tasas de crecimiento y absorción de fósforo y función de respuesta a la fertilización del ensayo	33
3.15.3	Modelos utilizados para la determinación de las tasas de crecimientos y de absorción de P	33
3.15.3.1	Modelo de distribución Gaussiana	34
3.15.3.2	Modelo sigmoideo de Boltzmann	35
3.15.3.3	Modelo de Mitscherlich	36
<b>4</b>	<b>PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>38</b>
4.1	Variable de medición directa	38
4.1.1	Producción de materia seca	38
4.1.1.1	Producción de materia seca en las hojas	38
4.1.1.2	Producción de materia seca de los tallos	40
4.1.1.3	Producción de materia seca de las espigas	42
4.1.1.4	Producción de materia seca de los granos	44
4.1.1.5	Producción de materia seca total	47
4.1.2	Concentración de fósforo	53
4.1.2.1	Concentración de fósforo en las hojas	53
4.1.2.2	Concentraciones de fósforo de los tallos	55
4.1.1.3	Concentraciones de fósforo de las espigas	57

Capítulo	Página	
4.1.2.4	Concentración de fósforo de los granos	59
4.1.2.5	Concentración de fósforo del total aéreo de la planta	60
4.2	Variables derivadas	66
4.2.1	Absorción acumulada de fósforo	66
4.2.1.1	Absorción acumulada de fósforo en las hojas	66
4.2.1.2	Absorción acumulada de fósforo en los tallos	68
4.2.1.3	Absorción acumulada de fósforo en las espigas	71
4.2.1.4	Absorción acumulada de fósforo en los granos	73
4.2.1.5	Absorción de fósforo en la biomasa aérea de la planta	74
4.2.2	Contribución porcentual de cada órgano a la materia seca total producida	80
4.2.2.1	Contribución porcentual de las hojas	80
4.2.2.2	Contribución porcentual de los tallos	81
4.2.2.3	Contribución porcentual de las espigas	84
4.2.2.4	Contribución porcentual de los granos	85
4.2.3	Acumulación porcentual de materia seca y fósforo	91
4.2.4	Tasa de crecimiento	93
4.2.4.1	Tasa de crecimiento de las hojas	94
4.2.4.2	Tasa de crecimiento de los tallos	96
4.2.4.3	Tasa de crecimiento de las espigas	98
4.2.4.4	Tasa de crecimiento de los granos	101
4.2.4.5	Tasa de crecimiento en la biomasa aérea de la planta	102
4.2.5	Tasa de absorción de fósforo	104
4.2.5.1	Tasa de absorción de fósforo de las hojas	105
4.2.5.2	Tasa de absorción de fósforo de los tallos	107
4.2.5.3	Tasa de absorción de fósforo de las espigas	109
4.2.5.4	Tasa de absorción de fósforo de los granos	112
4.2.5.5	Tasa de absorción de fósforo en la biomasa aérea de la planta	113
4.2.6	Translocación de fósforo en la parte aérea de la planta de trigo	115
4.2.7	Tratamiento óptimo de fertilización fosforada	117

Capítulo		Página
4.2.8	Parámetros de fertilización racional del cultivo de trigo	119
4.2.8.1	Índice de cosecha	119
4.2.8.2	Índice de extracción de fósforo	121
4.2.8.3	Requerimiento interno de fósforo	123
4.2.8.4	Factor de demanda de fósforo	124
4.2.9	Eficiencia de recuperación de fósforo	125
4.2.10	Eficiencia interna del uso de fósforo por el cultivo de trigo	127
5	<b>CONCLUSIONES</b>	128
6	<b>RESUMEN</b>	130
	<b>SUMMARY</b>	132
7	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	133
	<b>ANEXOS</b>	139



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Análisis químico del sitio utilizado	23
2	Nivel inicial de fósforo para cada tratamiento	24
3	Relación entre el tiempo cronológico y el tiempo térmico durante el desarrollo del cultivo de trigo	26
4	Composición química de la mezcla Frölich	27
5	Nivel de P alcanzar en el suelo luego de aplicar distintas dosis de fósforo como fertilizante al suelo	28
6	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre el crecimiento de los distintos órganos del cultivo de trigo	50
7	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la concentración de P en los distintos órganos y el total aéreo del cultivo de trigo	63
8	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la absorción de P en los distintos órganos y el total aéreo del cultivo de trigo	77
9	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la contribución % de órganos en la MS total producida en cosecha del cultivo de trigo	88
10	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana del crecimiento de hojas para los distintos tratamientos con fertilización fosforada	94
11	Ecuación y parámetros de ajuste a un modelo sigmoideo de la materia seca de tallos producida en el tiempo para los distintos tratamientos con fertilización fosforada	96
12	Ecuación y parámetros de ajuste a un modelo de distribución Gaussiana del crecimiento de espigas para cuatro tratamientos con fertilización fosforada	99
13	Ecuación y parámetros de ajuste a una regresión lineal del crecimiento de granos para cuatro tratamientos con fertilización fosforada.	101

Cuadro		Página
14	Parámetros de ajuste a un modelo sigmoideo de la biomasa total aéreo producida en el tiempo para los tratamientos con fertilización fosforada	102
15	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en hojas para cuatro tratamientos con fertilización fosforada	105
16	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en tallos para cuatro tratamientos con fertilización fosforada	107
17	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en espigas para cuatro tratamientos con fertilización fosforada	110
18	Ecuación y parámetros del ajuste a una regresión lineal de la absorción de fósforo en granos para cuatro tratamientos con fertilización fosforada	112
19	Parámetros de ajuste a un modelo sigmoideo de la absorción total de fósforo para los tratamientos con fertilización fosforada	113
20	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la translocación de fósforo (kg P/ha) estimada para distintos órganos de la planta hacia el grano	116
21	Participación porcentual en la translocación de fósforo hacia el grano de los distintos órganos del trigo bajo distintas dosis de fertilización fosforada	117
22	Regresión no lineal de tipo Mitscherlich para los rendimientos de grano en trigo	118
23	Variación de los índices de cosechas del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	120
24	Variación en el tiempo de los índices de cosechas del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	121
25	Variación de los índices de extracción de fósforo del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	122

Cuadro		Página
26	Variación en el tiempo de los índices de extracción de fósforo del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada	123
27	Efecto de distintas dosis de fósforo sobre el factor de demanda de P, utilizando el RIP de cada tratamiento y el RIP del tratamiento óptimo	125
28	Efecto de distintas dosis de fósforo sobre el factor de absorción de P (FAPC) y la eficiencia de recuperación de fósforo	126
29	Efecto de distintas dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) en la eficiencia de uso de P (UEP) en tres estados fenológicos distintos	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Precipitación y evaporación promedio mensual (mm) registrada durante el periodo de estudio (julio 2004 a julio del 2005)	25
2	Temperatura mínima y máxima promedio mensual (°C) registrada durante el periodo de estudio ( julio 2004 a julio del 2005)	26
3	Diseño del ensayo	28
4	Modelo de distribución Gaussiana	34
5	Modelo sigmoideo de Boltzmann	35
6	Modelo de Mitscherlich	36
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 las hojas del cultivo de trigo	39
8	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	41
9	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 espigas del cultivo de trigo	44
10	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 granos del cultivo de trigo	46
11	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 biomasa aérea del cultivo de trigo	49
12	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la concentración de fósforo en las hojas del cultivo de trigo	54
13	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la concentración de fósforo en los tallos del cultivo de trigo	56
14	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) sobre la concentración de fósforo en las espigas del cultivo de trigo	58

Figura		Página
15	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la concentración de fósforo en granos del cultivo de trigo	60
16	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la concentración de fósforo total estimada para la biomasa aérea del trigo	61
17	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en hojas de trigo	67
18	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en tallos de trigo	69
19	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en espigas de trigo	71
20	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en granos de trigo	74
21	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo total en la planta de trigo	75
22	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de las hojas en el total de la materia seca producida	81
23	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de tallos en el total de la materia seca producida	83
24	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de espigas en el total de la materia seca producida	84
25	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de los granos en el total de la materia seca producida	86
26	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la acumulación porcentual de materia seca total en el tiempo	91
27	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la acumulación porcentual del fósforo total en el tiempo	92

Figura		Página
28	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de crecimiento en hojas	95
29	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de crecimiento en tallos	98
30	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de crecimiento en espigas	100
31	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de crecimiento en la biomasa aérea de la planta	103
32	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en hojas	106
33	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en tallos	109
34	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en espigas	111
35	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en granos	113
36	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en la biomasa aérea de la planta	115
37	Ajuste a una regresión no lineal de tipo Mitscherlich de los rendimientos del cultivo de trigo bajo cuatro dosis de fertilización fosforada	119
38	Variación del requerimiento interno de fósforo (g/100g) durante el periodo de acumulación de biomasa del trigo bajo cuatro tratamientos de fertilización fosforada	124

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Variación en el tiempo de la producción de materia seca de los granos (kg MS/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	140
2	Variación en el tiempo de la producción de materia seca total (kg MS/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	140
3	Variación en el tiempo de la concentración de fósforo (g/100g) de granos sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	140
4	Variación en el tiempo de la absorción de P de granos (kg P/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	141
5	Variación en el tiempo de la absorción de P total (kg P/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada	141
6	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)	142
7	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)	142
8	Ajuste de la producción de materia seca de las espigas a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	143
9	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)	143
10	Ajuste de la producción total de materia seca a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	144
11	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)	144

Anexo		Página
12	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)	145
13	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)	145
14	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)	146



## 1 INTRODUCCIÓN

El fósforo en las plantas de trigo es de vital importancia, y su disponibilidad en el suelo es variable, haciendo variable el comportamiento del cultivo en su crecimiento y desarrollo. Es por ello, que es de mucha importancia poder ver y analizar las distintas modificaciones que adoptan las plantas de trigo frente a diferentes condiciones de disponibilidad de fósforo en el suelo.

Estudios realizados anteriormente en plantas de trigo muestran el comportamiento positivo que adopta el cultivo de trigo frente a una mayor disposición de fósforo en el suelo, traduciéndose en mayores rendimientos del producto cosechable al final de cultivo. Además, se han estudiado una serie de parámetros relacionados con el rendimiento, como el índice de cosecha, índice de extracción de fósforo, requerimiento interno, eficiencia de absorción de fósforo y eficiencia de uso de fósforo y se han evaluado en relación al nivel de disponibilidad de fósforo en el suelo. Sin embargo, aun se requieren una mejor comprensión de las interacciones suelo-fósforo-cultivo para el diseño de normas eficientes de fertilización, particularmente en los suelos derivados de materiales volcánicos.

En la estación experimental Santa Rosa se realizó un ensayo en trigo, con distintos niveles de fertilización fosforada, presentándose la siguiente hipótesis para estudio:

El uso interno de P del cultivo de trigo no varía bajo las disponibilidades agronómicas usuales de fósforo en el suelo.

El objetivo general de este trabajo de tesis fue determinar el efecto de distintos niveles de disponibilidad de fósforo sobre la economía del fósforo en el cultivo de trigo.

A su vez, los objetivos específicos fueron:

**A** Evaluar la variación de la eficiencia e uso interno de P por parte del cultivo a través de:

- El crecimiento y la partición de biomasa tanto en sus órganos individuales como en el total aéreo de la planta.
- La absorción y distribución de fósforo en el cultivo producida por distintos niveles de fertilidad fosforada.

**B** Determinar la eficiencia de recuperación de 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.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Antecedentes generales del trigo.

El trigo es la planta más cultivada del mundo. El trigo que crece en la Tierra puede incluso superar la cantidad de todas las demás especies productoras de semillas, silvestres o domesticadas. Cada mes del año una cosecha de trigo madura en algún lugar del mundo. Es la cosecha más importante de los Estados Unidos y en Canadá y crece en extensas zonas en casi todos los países de América Latina, Europa y Asia.

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 *Triticum 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 ploidía, entre los trigos diploides, *Triticum monococcum* que se mantiene limitado a ciertas extensiones y su forma salvaje ssp. *aegilopoides* que es altamente utilizado en el medio oriente. Los híbridos resultantes entre estos son completamente fértiles (FAO, 2002).

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

Las especies tetraploides *Triticum turgidum* y *Triticum timopheevii* se encuentran tanto en formas salvajes como cultivadas, los híbridos entre estos son estériles, estableciéndolos como especies biológicas validas. Por su parte, las especies hexaploides sólo se encuentran en forma cultivada, estas son el *Triticum aestivum* y el *Triticum 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 esta área y emparentadas con el trigo.

En Siria se encontraron restos de *Triticum turgidum* ssp. *dicoccum*, los cuales databan de alrededor de 7500 años AC. Al igual que en la región montañosa al sur al sureste de Turquía donde se encontraron restos de *Triticum monococcum* ssp. *aegilopoides*, los cuales databan de alrededor de 7500 a 6200 años AC. (HEUN, *et al.*, 1997).

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

El trigo durante el siglo XX 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 700000 hectáreas. Sin embargo, desde 1971-1981 en adelante la superficie del trigo ha disminuido a un ritmo de 10000 hectáreas anuales, hasta llegar a un promedio de 407000 hectáreas en los últimos seis años (MELLADO, 1998).

La producción anual de trigo en Chile durante el periodo de 1997-2001 alcanzó a 1,59 millones de toneladas, mientras que la superficie promedio sembrada durante el mismo periodo fue de 391000 hectáreas (FIA, 2003).

Según lo escrito anterior el rendimiento promedio durante los últimos años alcanzó los 4066 kg ha<sup>-1</sup>. Los rendimientos promedios van a variar 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 trumaos de valle es de 7000 kg ha<sup>-1</sup>, en secoano costero de 6000 kg ha<sup>-1</sup>, los rojos arcillosos alrededor de 5000 kg ha<sup>-1</sup> y en el secoano interior es sólo de 4000 kg ha<sup>-1</sup> (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

**2.1.2 Descripción botánica.** El trigo es una especie poácea (gramínea). Su sistema radical esta compuesto de dos tipos de raíces, las 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 mesocótilo con el coleoptilo (KIRBY, 1994).

La parte aérea se compone de una serie de unidades repetidas de 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.

Desde el eje principal, dependiendo de las condiciones de cultivo, pueden originarse varios macollos; estos 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 de suelo, fecha de siembra, densidad de población, competencia ejercida por las malezas y el abastecimiento hídrico (FAIGUENBAUM, 1987).

Las inflorescencias corresponden a espiga, están compuestas de 15 a 25 espiguillas; estas son sésiles y se presentan dispuestas entorno a un raquis. Cada espiguilla presenta externamente dos brácteas denominadas glumas y contienen tres a cinco antecios dispuesto 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 esta compuesta por tres estambres y 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 a ocurrido la antesis (KIRBY, 1994; FAO 2002).

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

**2.1.3 Variedades de trigo.** En general puede distinguirse tres variedades en función de su ciclo.

- Variedades de invierno o de ciclo largo. Poseen crecimiento inicial rastrero y un largo periodo vegetativo. Necesitan vernalización para espigar, es decir, estar sometidos durante algunos periodos a bajas temperaturas (0 a 10° C), entre siembra y macolla, para inducir el espigado (MELLADO, 2001).

- Variedades de primavera o de ciclo corto. Poseen un crecimiento inicial erecto y un corto periodo vegetativo, no requiriendo vernalización (MELLADO, 2001).
- Variedades alternativas. Tiene su origen en el cruzamiento entre trigo de invierno y de primavera. Son de crecimiento inicial semirrecto y de periodo vegetativo intermedio en relación con los invernales y primaverales (MELLADO, 2001).

**2.1.4 Aspecto agroclimatológicos.** El trigo se adapta a una gran gama de climas, pero las condiciones ideales se encuentran en las zonas templadas, con invierno bien marcados y temperaturas en alzas hacia la etapa reproductiva. Una buena germinación se logra con temperaturas iguales o superiores a 3 a 4° C, pudiendo incluso germinar con temperatura de 0° 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 periodo vegetativo, pero no así el periodo reproductivo, por ello en 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 heladas. En las regiones IX y X ninguna variedad debería espigar antes del 15 de noviembre y por lo tanto la variedades de primavera no pueden ser sembradas en otoño (FRIGUENBAUM, 1987).

**2.1.5 Requerimientos hídricos.** Es importante mantener la humedad entre los primeros 30 cm de suelo, ya que entre el 50 a 60 % de sus requerimientos de agua están en esta estrata de suelo, debido a que esta zona se ubica alrededor del 75% de la masa radicular de la planta (MELLADO, 2001). Aunque la frecuencia de riego y la cantidad de agua dependerán de numerosos factores, hay cuatro momentos claves, además de la siembra, en las que el agua no debería ser un factor restrictivo. Estos momentos son: la iniciación de las raíces de la corona cuando se inicia el macollaje, el encañado, la antesis y el estado de grano lechoso. De estas cuatro el macollaje y la antesis son las más sensibles al estrés hídrico (RAWSON y GÓMEZ, 2001).

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

**2.1.6 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 alto contenido 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 de trigo tolera mejor la humedad que otros cultivos como leguminosas de grano que se siembran en la misma época como arveja y lenteja (FAIGUENBAUM, 1987).

RODRÍGUEZ *et al.* (2001). Señala 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 independientemente del tipo de suelo. El trigo se puede adaptar desde pH 5,5 a 7,0 (FAIGUENBAUM, 1987).

**2.1.7 Época de siembra.** 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.**

RODRÍGUEZ (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 nutrición.

**2.2.1 Método racional.** La fertilización racional es una aproximación razonada al establecimiento de las normas de fertilización. Estas normas de fertilización están fundamentadas en los principios de la nutrición de los cultivos y en la dinámica de los nutrientes en el suelo. Esta aproximación postula que con los conocimientos de los procesos relevantes del sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante es posible predecir las normas de fertilización de los cultivos en cada caso en particular (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).



Bajo el concepto del método racional, la fertilización de los cultivos se enmarca dentro de las interacciones del subsistema ecológico con el subsistema de cultivo o pecuario que se encuentra en un determinado ámbito socioeconómico, 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).

Existe 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 el fósforo y el 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.

Las interacciones existentes entre clima-suelo-cultivo-fertilizante han sido modificadas a tres componentes: Demanda del nutriente, suministro del nutriente y eficiencia de la fertilización. Fundamentalmente, las interrelaciones entre el clima y el cultivo están reflejadas en la demanda del nutriente, las interrelaciones entre el suelo y el cultivo en el suministro del nutriente y el efecto de manejo de fertilizantes en las relaciones suelo-cultivo a través de la eficiencia de fertilización. De esta forma la formulación general para la estimación de la dosis de fertilización es la siguiente.

$$\text{Dosis de fertilización} = \frac{\text{Demanda P cultivo} - \text{Suministro P Suelo}}{\text{Eficiencia de fertilización}}$$

**2.2.2 Demanda de fósforo.** Es la cantidad de nutriente requerida para obtener el rendimiento alcanzable económico en un determinado agroecosistema (sistema clima-suelo-cultivo).

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 cómo se exprese este potencial va depender del clima, suelo y nivel tecnológico utilizado. Dicho de otra manera, la demanda, en este caso del fósforo; va depender del rendimiento a alcanzar del cultivo, el índice de cosecha y su requerimiento interno.

2.2.2.1 Rendimiento a alcanzar. La productividad a alcanzar es el rendimiento posible a obtener dependiendo de las condiciones del agroecosistema, considerando un manejo de un alto nivel tecnológico imprescindible en una agricultura competitiva. 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 se refleja en el aumento de peso o volumen en los órganos y en su totalidad. En la tasa de desarrollo se ve la diferenciación entre la etapa vegetativa y la etapa reproductiva a través de la aparición de los distintos órganos.

Es importante definir bien este parámetro ya que una mala estimación del rendimiento alcanzable se traducirá finalmente en una demanda de cultivo que puede estar sub o sobreestimada (RODRIGUEZ *et al.*, 2001).

2.2.2.2 Requerimiento interno. Definida como la concentración mínima óptima de nutriente en la materia, que permite realizar las funciones estructurales y metabólicas requeridas por el cultivo. El requerimiento interno se determina en el momento de cosecha y representa la concentración de nutriente por unidad de materia seca total producida. Según RODRIGUEZ (1993), el requerimiento interno determinado para el trigo en Chile es de 0,17%.

La concentración de fósforo en el tejido de plantas anuales generalmente disminuye a medida que la planta avanza en sus estado de desarrollo, al igual que las concentraciones críticas de nutrientes o requerimiento interno (RACZ, *et al.*, 1965; BELANGER y RICHARDS, 1999).

Las concentraciones de fósforo disminuyen con el tiempo en las plantas anuales porque como la planta madura, una proporción del aumento de su peso seco esta compuesto de fósforo estructural y de tejido de almacenaje (ELLIOT *et al.*, 1997a).

También son importante determinar otros parámetros, como lo son el índice de cosecha y la humedad de cosecha, para una estimación de la absorción total de un cultivo (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).

Teniendo en cuenta todos los parámetros mencionados anteriormente la expresión matemática para la determinación de la demanda de fósforo esta dada por la siguiente ecuación.

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

- DP** = Demanda de fósforo
- PA** = Productividad a alcanzar
- HC** = Humedad de cosecha
- RIP** = Requerimiento interno de fósforo
- IC** = Índice de cosecha

**2.2.3 Suministro de fósforo.** Por suministro se entiende como el aporte de nutriente por parte del suelo, que en este caso es el fósforo. Para entender mejor el aporte que realiza el suelo hacia la planta hay que entender cual es el comportamiento del fósforo en el suelo.

El fósforo se encuentra formando parte de dos fracciones: una fracción pasiva y otra activa. El fósforo de la fracción pasiva es el resultado de reacciones de absorción

en que el fósforo queda retenido en el interior de las arcillas y de óxidos de Fe y Al, de reacciones de precipitación muy insolubles y de reacciones ligadas a la materia orgánica muy estabilizada en el suelo. La fracción pasiva se caracteriza por no estar en equilibrio directo con el fósforo que se encuentra en la solución y por no participar en la disponibilidad de fósforo en la temporada de cultivo. El fósforo de la fracción activa proviene de las mismas reacciones de adsorción y precipitación, principalmente en la superficie de las arcillas y se encuentra en un equilibrio rápido con el fósforo de la solución del suelo. Por ello, el fósforo activo determina la disponibilidad de fósforo en el suelo para los cultivos (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

El fósforo en la solución se encuentra en dos formas disponibles para la planta;  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^-$  y la concentración en la cual estén presentes estos va a depender del pH que presente el suelo, con valores de pH mayor a 7,2 se hace presente la forma  $\text{HPO}_4^-$  y a su vez pH menor a 7,2 incrementa su concentración la forma  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (MENGEL y KIRKBY, 1982).

Para medir el fósforo que esta en la solución y en la fracción activa disponible durante el periodo de cultivo se a utilizado un método de extracción. El fósforo extractable por el método Olsen ( $\text{NaHCO}_3$ , pH 8,5) representa la fracción de fósforo activo que correlaciona con el fósforo absorbido por los cultivos. De este modo el fósforo Olsen es un indicador de la disponibilidad de fósforo en el suelo (RODRIGUEZ *et al.*, 2001).

Aunque a un mismo valor de fósforo Olsen indica la misma disponibilidad 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 no extractable es variable, dependiendo de la capacidad de retención de los distintos suelos (RODRIGUEZ *et al.*, 2001).

El fósforo luego de su aplicación comienza a disminuir a través del tiempo como fósforo Olsen. Esto se debe a una 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

fósforo activo del suelo. La fracción residual de fósforo aplicado que permanece como fósforo extractable Olsen en el tiempo a sido descrita como una función potencial, la cual es dependiente del tiempo y temperatura e independiente del tipo de suelo y de la cantidad de fósforo aplicado (RODRIGUEZ *et al.*, 2001).

La siguiente ecuación refleja el envejecimiento del fósforo aplicado en el tiempo.

$$K = (1 + t)^{-0.149}$$

Según RODRIGUEZ *et al.* (2001) el suministro de fósforo en el suelo depende de dos parámetros del sistema clima-cultivo-suelo-fertilizante; la disponibilidad de fósforo Olsen en el suelo y la eficiencia de absorción radicular de fósforo del cultivo. Si bien existe una mayor o menor eficiencia de absorción por parte de los cultivos, estos no son capaces de recuperar todo el fertilizante agregado, dado que este 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 fertilización fosforada. Sólo una parte de fósforo aplicado en la fertilización fosforada es recuperada por el cultivo. La parte que no es recuperada es equivalente a la fracción de fósforo aplicada no extractable de fósforo Olsen, y corresponde a la reacción rápida inicial de absorción de fósforo en la superficie de la matriz coloidal. El tamaño de la fracción de fósforo aplicada no extractable de fósforo Olsen, depende de la capacidad de retención de fósforo del suelo. A una mayor capacidad de retención del fósforo del suelo, menor será la fracción de fósforo del fertilizante aplicado que quede disponible durante la temporada de cultivo.

La capacidad de retención de fósforo (cp) es un parámetro independiente de la cantidad de fósforo aplicado, está expresado en ppm de fósforo agregado. Este índice esta muy correlacionado con el aluminio extractable del suelo a diferencia del pH (RODRIGUEZ, 1993).

Existe un factor de retención de fósforo en el suelo. Este factor permite estimar la cantidad (kg/ha) de fósforo necesaria aplicar en un suelo para obtener 1 ppm de fósforo extractable Olsen en el suelo. Para poder expresar este factor es necesario conocer la profundidad de muestreo en decímetro y la densidad aparente del suelo. Este factor también refleja la cantidad de fósforo no extractable Olsen del fósforo activo del suelo por ppm de fósforo extractable en distintos grupos de suelo, inmediatamente después de la aplicación de fósforo (RODRIGUEZ *et al.*, 2001).

$$FCO = \frac{Prof * Da}{cp}$$

FCO = Factor conversión Olsen ( kg P/ha/ppm Olsen)

Prof = Profundidad (dm)

Da = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

cp = capacidad de retención de P ( ppm P Olsen/ppm P aplicado)

2.2.3.2 Eficiencia de absorción de fósforo. La eficiencia de absorción de fósforo del cultivo determina la recuperación del fósforo del fertilizante aplicado. Este parámetro va a estar directamente relacionado con el cultivo. Cada cultivo de acuerdo a las características de su sistema radicular, tiene la capacidad de explorar diferentes volúmenes de suelo y por lo tanto, interceptar zonas de alta concentración de fósforo activo dadas por los gránulos de fertilizantes. 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>) (RODRIGUEZ *et al.*, 2001).

En cualquier suelo que 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 a 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.**

Los altos rendimientos a alcanzar por un cultivo llevan a realizar fertilizaciones debido a que el suelo no es capaz de suministrar el total de nutrientes requerido. De esta forma se corrigen deficiencias naturales de ciertos elementos en el suelo, como es 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 fósforo por parte del cultivo de trigo es necesario determinar la absorción de fósforo. La absorción es dependiente de la productividad del cultivo y de la concentración interna de fósforo. Ambos parámetros determinan la eficiencia interna de uso de fósforo, siendo este dependiente de la acumulación y posterior translocación desde los órganos fuente hacia el grano, reflejándose en el requerimiento interno de fósforo.

**2.3.1 Efecto de la nutrición fosforada en la productividad de materia seca del cultivo.** 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 estudio de invernadero y determinaron que al momento en que las raíces han alcanzado la máxima de materia seca, la parte aérea solo 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. También dicen estos autores 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 utilizado para describir los efectos del fósforo absorbido sobre la productividad de materia seca, es la eficiencia de uso de fósforo (UEP) que representa los kg MS/ha producidos por kg P/ha absorbido.

En un estudio realizado por CLARKE *et al.* (1990) midieron la eficiencia de uso de fósforo en dos estados de desarrollo de las plantas (antes de la cosecha 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. En otro estudio realizado por BARRIGA *et al.*

(1998), se vieron las diferencias en eficiencia de uso de fósforo para dos genotipos de hábito de crecimiento primaveral y con dos dosis distintas de fósforo. Los resultados arrojaron diferencias mayores entre genotipos en la eficiencia de uso de fósforo que en el mismo genotipo pero con dosis de fósforo distintas.

**2.3.2 Efecto en la distribución de materia seca.** ELLIOTT *et al.* (1997a) han mostrado que las deficiencias de fósforo parecen afectar la distribución de peso seco dentro de la parte aérea del trigo, al comparar tratamiento en una misma fecha calendario. Estos autores encontraron que las hojas con moderada y severa deficiencia 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 de los 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).

Al parecer no existiría un efecto directo sobre la distribución de la materia seca. Se considera, como descripción general para el cultivo de 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 estado 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.*, 1987b).

**2.3.3 Efecto de la nutrición fosforada sobre el índice de cosecha.** El índice de cosecha es la relación entre la materia seca de la parte cosechada en relación al total de la materia seca de la parte aérea de la planta. 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 el índice de cosecha puede variar con la variedad y con la localidad reflejando situaciones como temperaturas más extremas, fuerte ataques bióticos o sequías extensamente prolongadas.



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

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 Halbert, varió su índice de cosecha sólo de un valor de 0,43 a 0,49 en la localidad de Avon, con un valor modal de 0,45 y que en las localidades Lameroo y Coonalpin, el índice de cosecha del mismo cultivar varió entre 0,31 y 0,37 siendo el valor modal de 0,35. Estos resultados muestran que las distintas disponibilidades de fósforo para el cultivo, no afectan mayormente la variación del índice de cosecha y que la variación se produce por efecto de localidad. Sin embargo, en condiciones muy bajas de niveles de fósforo el índice de cosecha puede ser afectado tal como a sido mostrado por EGLE *et al.* (1999). En el estudio de campo de EGLE *et al.* (1999), en México, se evaluaron trigos de hábito de crecimiento primaveral correspondientes a tres genotipos o líneas modernas respecto a una variedad Mexicana antigua (Curinda) observando índices de cosecha bajos en todos los genotipos para el tratamiento sin aplicación de fertilización fosforada, los cuales tenían un nivel de disponibilidad de fósforo que fluctuaba entre 3,0 a 3,7 ppm de P-Olsen. Según estos resultados los suelos con niveles muy bajos de fósforo afectarían al índice de cosecha.

**2.3.4 Efecto de la nutrición fosforada sobre la tasa de crecimiento.** 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 y 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.

ELLIOTT *et al.* (1997a) determinaron que las tasas de crecimiento, tanto en los órganos como en la parte aérea total del trigo, se vean 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 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 fósforo, ya que disminuiría los requerimientos de fósforo y se ajustarían a la baja disponibilidad presente en los suelos deficientes de fósforo.

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

La relación que existe entre la cantidad de fósforo por hectárea en la parte aérea por la unidad de materia seca producida (kg/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). La formación de proteínas requiere de altos contenidos de nutrientes (en especial N, P, S) al igual que los carbohidratos (celulosa, hemicelulosa y lignina) pero en menores cantidades. En general, independiente de la ontogenia, la concentración de la parte aérea de las plantas aumenta con el aumento de la disponibilidad de fósforo en el suelo (ELLIOTT *et al.*, 1997b). Este comportamiento general de la parte aérea del cultivo, también ocurre en sus órganos utilizados como fuente de asimilados. De este modo al analizar las concentraciones de fósforo en los órganos de manera individual, se ha observado que hojas y tallos disminuyen las concentraciones de fósforo con el aumento de la biomasa, a través del desarrollo del cultivo (BAUER *et al.*, 1987c). 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. Un estudio realizado en Dakota del Norte (USA) muestra lo dicho anteriormente, donde se determinaron las concentraciones de fósforo en trigo primaveral. Las concentraciones que se obtuvieron en tallos fueron mayores a la de las hojas hasta espigadura, posterior a este periodo, las hojas tuvieron concentraciones de fósforo iguales o ligeramente mayor (BAUER *et*

*al.*, 1987c). Mostrando los efectos producidos por la translocación de compuesto carbonados con fósforo desde los órganos fuentes.

**2.4.1 Concentraciones de fósforo en grano.** Las concentraciones de fósforo en el grano de trigo han sido ampliamente estudiadas en numerosas publicaciones, debido a la gran importancia que tiene en la semilla un elevado contenido inicial de fósforo, durante los primeros estado de desarrollo del cultivo. Los granos son el destino de los carbohidratos producidos por el cultivo siendo tejidos privilegiados por el cultivo en su destino reproductivo. En diversos estudios se ha demostrado que las concentraciones de fósforo en grano varía entre 0,23 y 0,42%. Entre los factores que determina esta variación esta la nutrición fosforada del cultivo, el régimen hídrico, la especie de cultivo y el hábito de crecimiento del cultivo. Un estudio realizado en Australia por BATTEN (1994) determinó que las concentraciones variaron entre 0,25 y 0,28%, utilizando las variedades Prime Hard, Australian Hard, Australia 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 superiores a 0,30%. Otro estudio realizado también en Australia (zona sur) por ZUBAIDI *et al.* (1999), se mostraron concentraciones en trigo panadero al momento de madurez de 0,23%.

La importancia de niveles altos al inicio del cultivo fueron mostrado por CLARKE *et al.* (1990) donde las concentraciones de fósforo que se obtuvieron en el grano fluctuaron entre 0,30 y 0,42% relacionándolas directamente a una buena disponibilidad de fósforo en etapas temprana de desarrollo.

CAMPBELL *et al.* (1990) determinaron las concentraciones de fósforo en el grano en un estudio con y sin irrigación, obteniendo concentraciones entre 0,15 y 0,18% sin irrigación y 0,38 y 0,58% con irrigación. Mostrando de esta forma la importancia que tiene el factor hídrico sobre el contenido de fósforo en el grano. A su vez BATTEN (1992) analizó las concentraciones de fósforo en el grano en distintas estaciones de crecimiento y con distintas aplicaciones de fósforo, encontrando que la variación de las concentraciones de fósforo oscilaba entre 0,16 y 0,27%. Este autor

indica que las mayores dosis producen mayores concentraciones en el grano, aunque no necesariamente se traduzcan en mayores rendimientos.

**2.4.2 Requerimiento interno de fósforo.** El requerimiento 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 (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001). En términos generales corresponde a la concentración de fósforo promedio ponderado 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 de fósforo, eligiéndose las dosis de tratamientos más cercanas al óptimo de productividad alcanzado por el cultivo y que no reflejen deficiencia o exceso de nutrición fosforada. Las plantas usualmente disminuyen su requerimiento interno con el tiempo, puesto que avanzan en edad o desarrollo aumentando la biomasa de menor requerimiento de nutrientes, es decir, mayor contenido de carbohidratos estructurales que carbohidratos de contenido celular (ELLIOTT *et al.*, 1997b). En un estudio realizado por ZUBAIDI *et al.* (1999) se determinó la variación de éste parámetro para trigo panadero 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 RODRÍGUEZ (1993) indicó que el requerimiento interno de fósforo al momento de cosecha es de 0,17%, determinando que esta concentración de fósforo 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 requerimiento interno de fósforo más altos. De este modo, en un estudio realizado por OSBORNE y RENGEL (2002), en el cual se analizaron la eficiencia de absorción y la eficiencia de utilización de fósforo 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 en cultivos 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 fósforo del

cultivo. A través de este parámetro derivado se puede determinar la tasa de absorción de fósforo, la translocación de fósforo, la absorción directa hacia los granos y el índice de extracción en la cosecha.

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

**2.5.1 Tasa de absorción de fósforo.** La tasa de absorción de fósforo se refiere a la cantidad de fósforo absorbido en un cultivo por unidad de tiempo. Las plantas, como un todo comienza con una tasa lenta, se alcanza un máximo y luego decrece en los estados finales de su desarrollo.

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 tasa de absorción de un nutriente, tanto a través de su ontogenia y característica de fuente o destino de cada órgano. Así en órganos que funcionan como fuente de tasa de absorción de fósforo como la hoja y las espigas muestran valores negativos cuando la exportación de carbohidratos, asociados al nutriente, son movilizados al órgano destino, que para el caso del trigo es el grano. En el caso del grano por ser un órgano destino, sus tasas de absorción usualmente deberían ser lineales. También se debe considerar que al inicio de su desarrollo, la planta utiliza el fósforo reserva que contiene en la semilla y lo absorbido del suelo adyacente a esta y después a medida que pasa el tiempo, al desarrollar su sistema radical se produce un incremento paulatino en la absorción de 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 es la reutilización de fósforo absorbido por el cultivo. Este proceso se produce a través del floema desde los órganos más viejos hacia los órganos en desarrollo de la parte aérea. Es evidente en condiciones de baja disponibilidad de fósforo para las plantas, cuando las raíces no pueden aportar todo el fósforo requerido por los nuevos órganos en formación, produciéndose una reutilización del fósforo, 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 fósforo a través del quiebre del fósforo orgánico, presente en los órganos más viejos, principalmente las hojas (SCHACHTMAN *et al.*, 1998).

En el trigo, el contenido de fósforo en los granos se debe principalmente a la translocación, ya que la formación de este órgano se produce en las etapas finales del cultivo, cuando la tasa de absorción de fósforo directa desde el suelo está en la fase final, la cual es usualmente baja. Así, CLARKE *et al.* (1990), al medir la translocación de fósforo hacia el grano, encontraron que ésta correspondía de un 75 a un 87% de fósforo contenido en el grano.

También se ha mostrado la influencia que tiene los distintos niveles de fósforo sobre la translocación. A medida que aumentan los niveles de disponibilidad, mayores son las tasas de desacumulación de fósforo desde los órganos fuentes a los órganos destinos.

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

El índice indica la proporción del fósforo absorbido en la parte aérea que se encuentra en el grano. Es utilizado para mostrar la proporción del fósforo exportado desde el cultivo, producto de la cosecha del grano. En Chile, en el estudio de BARRIGA *et al.* (1995), utilizando 15 genotipos nacionales de trigo (entre progenitores e híbridos F<sub>1</sub>) obtuvieron que el índice de extracción de fósforo a cosecha varió entre 69 y 90%, siendo su media de 83%.

### 3 MATERIAL Y MÉTODO

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. Estación ubicada a 4 kilómetros al norte de la ciudad de Valdivia.

#### 3.1 Características del sitio.

El suelo del lugar donde se realizó el ensayo corresponde a un suelo trumao, de la serie Valdivia. En el sistema de la taxonomía de suelo USDA (1975), la mayoría de estos suelos se clasifican como Dystrandeps o Vitrandeps.

**3.1.1 Características Químicas.** El análisis del 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	5,90
pH (1:2,5) CaCl <sub>2</sub> 0,01 M	5,30
Calcio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	2,56
Magnesio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,29
Sodio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,05
Potasio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,72
Suma de bases intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	3,92
Aluminio intercambiable (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,04
Saturación de Aluminio (%)	1,01

El análisis de fósforo se realizó en todas las parcelas y se determinó un promedio para cada tratamiento. Los niveles iniciales se presentan a continuación:

**CUADRO 2 Nivel inicial de fósforo para cada tratamiento.**

<b>Tratamientos</b>	<b>Nivel inicial (ppm)</b>
<b>1</b> = Sin aplicación de fósforo	7,4
<b>2</b> = 75 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	10,4
<b>3</b> = 225 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	10,9
<b>4</b> = 315 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	13,8

**3.1.2 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 toba mas 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).

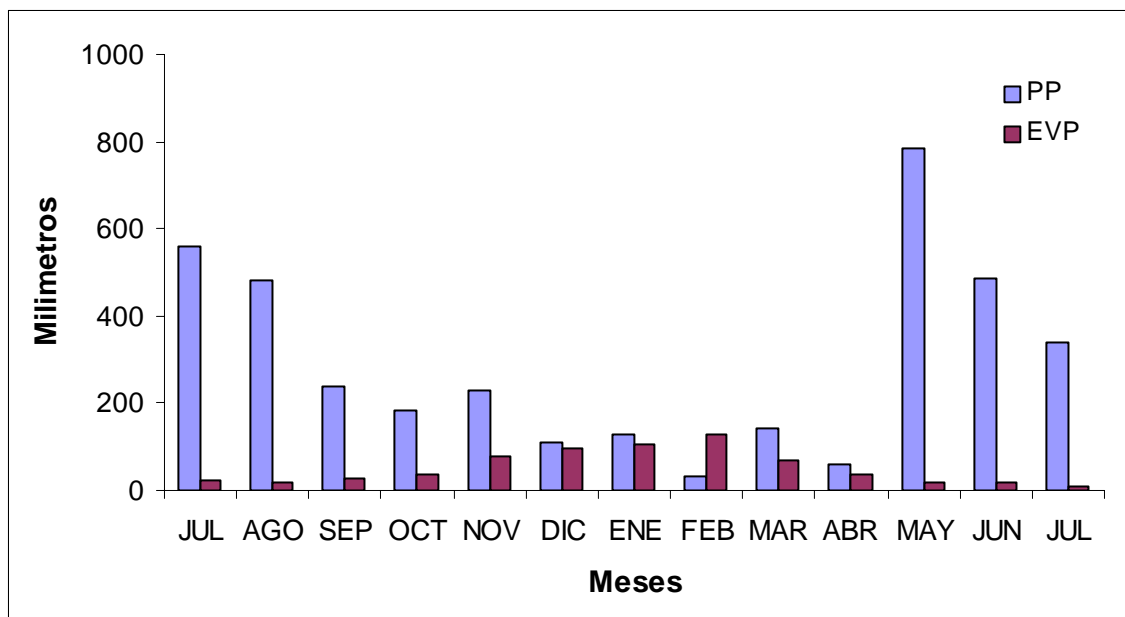
### **3.2 Características climáticas de la zona.**

La influencia que ejerce la cercanía al mar y la hoya hidrográficas de los ríos Valdivia y Cruces hacen que esta zona tenga un clima de características marítimas (HUBER, 1970). Esta Zona se caracteriza por sus altas precipitaciones, las cuales fluctúan entra 1800 y 3100 mm anuales, con promedio de 2500 mm. Estas lluvias, presentan una distribución estacional bien marcadas siendo el invierno la estación más lluviosa. La primavera es de lluvias moderadas con temperaturas que empiezan a subir desde 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 con temperaturas máximas diarias ocasionalmente superiores a los 25° C. La temperatura desciende desde comienzo 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, siendo enero el mes más cálido con 16,7° C y julio el mes más frío con 7,5° C respectivamente (MONTALDO, 1983).

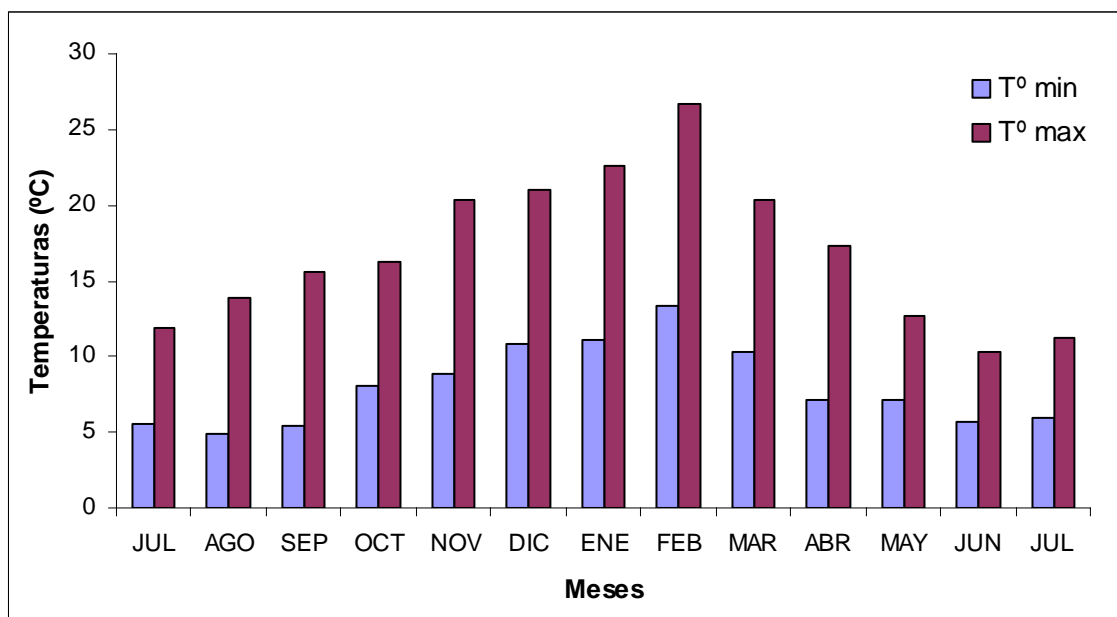


### 3.3 Características climáticas del periodo de ensayo.

Durante los meses en que se realizó el ensayo se registro 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 periodo de estudio (julio 2004 a julio del 2005).



**FIGURA 2** Temperatura mínima y máxima promedio mensual (°C) registrada durante el periodo de estudio (julio 2004 a julio del 2005).

### 3.4 Tiempo Térmico.

Con los datos de las temperaturas medias diarias se calculó el tiempo térmico para el periodo de estudio, utilizando una temperatura base de 0° C, siendo éste relacionado con los momentos de colecta de cada muestreo (Cuadro 3).

**CUADRO 3** Relación entre el tiempo cronológico y el tiempo térmico durante el desarrollo del cultivo de trigo.

<b>Días desde emergencia</b>	<b>51</b>	<b>58</b>	<b>65</b>	<b>72</b>	<b>79</b>	<b>86</b>
<b>Tiempo Térmico (GDA)</b>	666	745	831	923	1020	1131
<b>Días desde emergencia</b>	<b>93</b>	<b>100</b>	<b>107</b>	<b>114</b>	<b>121</b>	<b>128</b>
<b>Tiempo Térmico (GDA)</b>	1245	1349	1461	1564	1681	1814

### 3.5 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 al cual se torna inclinada hacia la madurez (VON BAER, sf).

### 3.6 Fertilizantes utilizados.

Se utilizaron como fertilizantes superfosfato triple (46%  $P_2O_5$ ), el cual fue tamizado entre 3 y 2 mm para su homogenización, KCl (60%  $K_2O$ ), Nitram magnésico (27% N) y Magnesul (27% MgO). Además se adicionó boronatrocalcita (10% B) y mezcla Frölich, cuya composición se muestra en el Cuadro 4.

**CUADRO 4 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 ( $Na_2B_4O_7$ )	25
Trióxido de Molibdeno	1

### 3.7 Preparación de suelo.

La preparación de suelo consistió en el paso de un motocultivador en el mes de julio. Trabajos de aradura no fueron necesarios dado que el suelo presentaba buenas condiciones producto de manejos realizados anteriormente con fines de estudios. En esa fecha se tomaron las muestras para su análisis de suelo en el laboratorio del instituto de la Facultad de Ciencias Agrarias.

### 3.8 Tratamiento de fertilización fosforada.

Se diseñaron cuatro niveles de fósforo como tratamientos. Se aplicaron incorporados en los primeros 12 cm de suelo, mediante un rotovator, tres dosis de fertilización fosforada: 75, 225 y 315 kg  $P_2O_5$ /ha y se mantuvo un tratamiento sin

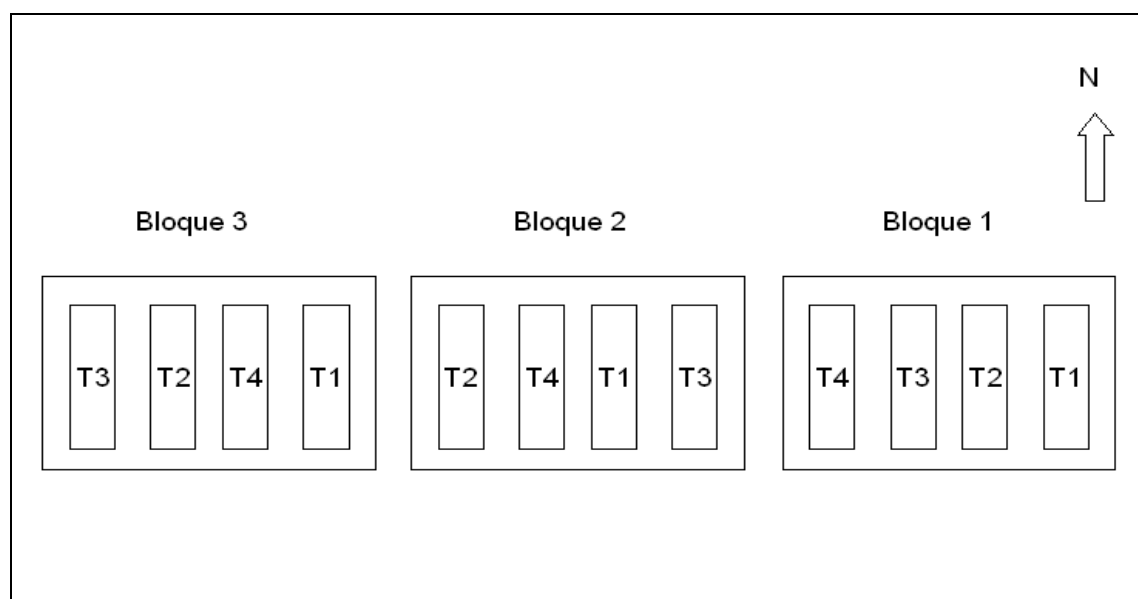
aplicación de fertilizantes fosforados. Las dosis fueron diseñadas para obtener un tratamiento subóptimo de fertilización, un óptimo de fertilización y un tratamiento supraóptimo de fertilización. Los niveles de fósforo alcanzados en el suelo luego de aplicar las distintas dosis de fertilización fosforada se muestran en el Cuadro 5.

**CUADRO 5 Nivel de P alcanzado en el suelo luego de aplicar distintas dosis de fósforo como fertilizante al suelo.**

Tratamientos	Nivel inicial de P (ppm)	Dosis de P aplicada (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Nivel de P alcanzado (ppm)
Sin fósforo	7,40	0	7,40
Subóptimo	10,4	75	13,0
óptimo	10,9	225	19,0
Supraóptimo	13,8	315	26,0

### 3.9 Diseño del ensayo.

El ensayo fue dispuesto en bloques completos al azar con una orientación norte sur, consistiendo en tres tratamientos con fertilización fosforada y un tratamiento sin aplicación de fósforo y con tres repeticiones, obteniendo un total de 12 parcelas (Figura 3).



**FIGURA 3 Diseño del ensayo.**

### **3.10 Tamaño de las parcelas.**

El tamaño de cada parcela fue de 3 m de ancho por 5 m de largo (15 m<sup>2</sup>).

### **3.11 Siembra del ensayo.**

El ensayo fue sembrado el día 21 de agosto del 2004, utilizando 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.

### **3.12 Fertilización del ensayo.**

El ensayo fue fertilizado en la siembra en forma incorporada con dosis equivalente a 80 kg de K<sub>2</sub>O/ha, 30 kg de MgO/ha y 20 kg/ha de mezcla Frölich. La aplicación de N fue de 240 kg N/ha, distribuidos en 30 kg de N/ha en la siembra, incorporados y 210 kg aplicados en cobertera cuando las plantas de todos los tratamientos se encontraban en 4 hojas (inicio de macollo).

### **3.13 Evaluación del ensayo a través de variables de medición directa.**

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

**3.13.1 Muestreo del material vegetal.** La emergencia ocurrió el 30 de agosto, donde el material vegetal aéreo fue cosechado semanalmente, entre el día 19 de octubre, cuando las plantas estaban en el estado de 3 a 4 hojas (previo al inicio de la macolla) hasta el 4 de enero del 2005 (estado de grano maduro), obteniéndose 12 muestreos. La colecta del material se realizó manualmente, cortando con un cuchillo a 1 cm del suelo. Al momento de realizar el corte se descartaban 50 cm a lo largo y a lo ancho de la parcela, evitando así el efecto borde.

**3.13.2 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

rotulado 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 registro el peso total en una balanza electrónica (precisión de 0,1 g). Las muestras secas fueron separadas manualmente en sus órganos componentes: hoja, tallo, espiga y grano y registrado los pesos de cada órgano. Cada material de órganos separados se guardo 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 fresco y seco, para su posterior análisis.

**3.13.3 Determinación de la concentración de fósforo a través del método de calcinación y determinación del Fosfo-Vanadomolibdato.** Para determinar la concentración de fósforo en cada órgano vegetal, de acuerdo al tratamiento y repetición, se tomaron 2 gramos de muestra de materia seca molida y se depositaron en crisoles limpios y se llevaron a la mufla para ser incinerados a 500° C por un tiempo de 4 horas. Las cenizas una vez fría se humectaron con 1 mL de agua destilada y se le agregaron 10 mL de HCl (2 N). Luego los crisoles fueron colocados en un plato caliente a 100° C, hasta que hierva la muestra. Posteriormente, la solución se filtro y se colecto en matraces de 50 mL para su posterior aforo con agua destilada. Desde los matraces se tomaron 1 mL los cuales se mezclaron con 4 mL de la solución Nitrovanadomolibdato, se dejaron reposar por 1 hora. La concentración de fósforo, 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 420 nm.

#### **3.14 Evaluación del ensayo a través de Variables derivadas.**

Las variables derivadas corresponden a aquellas que se determinan a partir de las variables de medición directa (Peso del material vegetal y concentraciones internas de fósforo). Las variables derivadas son: absorción acumulada de fósforo para cada órgano y para el total de la planta, la tasa de crecimiento y tasa de absorción de fósforo en cada órgano y el total de la planta y la translocación de fósforo entre los órganos.

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

**3.14.2 Tasa de absorción de fósforo.** Una vez obtenida la absorción acumulada de fósforo se determinó la tasa de absorción para cada órgano y para el total de la planta; para esto se dividió la absorción de fósforo acumulada de cada corte por siete, de tal manera de expresar la tasa de absorción de fósforo por el día en cada órgano y para el total del cultivo. Para poder determinar la tasa al inicio de desarrollo, la absorción acumulada en el primer corte se dividió por el número de días desde emergencia (tasa de absorción en hojas, tallos y el total de la planta), en el caso de las espigas se dividió la absorción de fósforo acumulada hasta el primer muestreo por 36 (se asumió como inicio de desarrollo el día 50 desde emergencia).

**3.14.3 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 fósforo acumulada y el crecimiento de la biomasa aérea foliar acumulada por órgano y total 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 fósforo y crecimiento, ajustándose a una regresión lineal. Luego de ajustar la absorción de P acumulada y la producción acumulada de materia seca a los distintos modelos (modelos de distribución Gaussianas, sigmoideos y lineal), se determinaron las tasas para cada órgano y para el total de la planta.

**3.14.4 Translocación de fósforo.** Para evaluar la translocación de fósforo se determinó la cantidad de fósforo movilizado desde los órganos fuente al órgano destino (grano); para ello, se restó el valor máximo de fósforo presente en cada órgano del cultivo con la cantidad de fósforo presente en el mismo órgano al momento de cosecha, considerándose esa cantidad la translocación del órgano. Al sumar las

cantidades de fósforo movilizadas desde los órganos fuentes hacia el grano y teniendo la cantidad de fósforo presente en el grano se determinó la translocación total hacia el grano. Finalmente la absorción de fósforo directa desde el suelo se obtuvo por diferencia entre cantidad total de fósforo translocado hacia el grano y el fósforo total presente en el órgano.

**3.14.5 Parámetros de 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 fósforo a la cosecha y el requerimiento interno de fósforo.

3.14.5.1 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.

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

3.14.5.3 Requerimiento interno. El requerimiento interno fue calculado en base al último corte, donde se determinó la concentración total de fósforo en el organismo en relación al total de materia seca producido por la planta.

**3.14.6 Tratamiento óptimo de fertilización fosforada.** La determinación del tratamiento óptimo de fertilización se realizó en base al último muestreo realizado el 4 enero del 2005. La materia seca producida en granos al momento de cosecha fue ajustada al modelo de Mitscherlich, el cual es utilizado para determinar la respuesta del cultivo a la fertilización fosforada. Luego se derivó la curva dada y se determinó el punto de mayor inflexión, obteniendo finalmente la dosis óptima económica.



**3.14.7 Eficiencia de recuperación de fósforo.** La eficiencia de recuperación de fósforo se determinó para todos los tratamientos y se expresó como la cantidad de P absorbido por el cultivo en función del contenido total de P disponible en el suelo.

**3.14.8 Eficiencia de uso de fósforo.** La eficiencia de uso de fósforo se determinó para todos los tratamientos en tres momentos de desarrollo del cultivo (inicio de desarrollo, floración y cosecha) y se expresó como los kg MS/ha producidos por la parte aérea en relación a la cantidad kg P/ha absorbidos.

### **3.15 Análisis estadístico.**

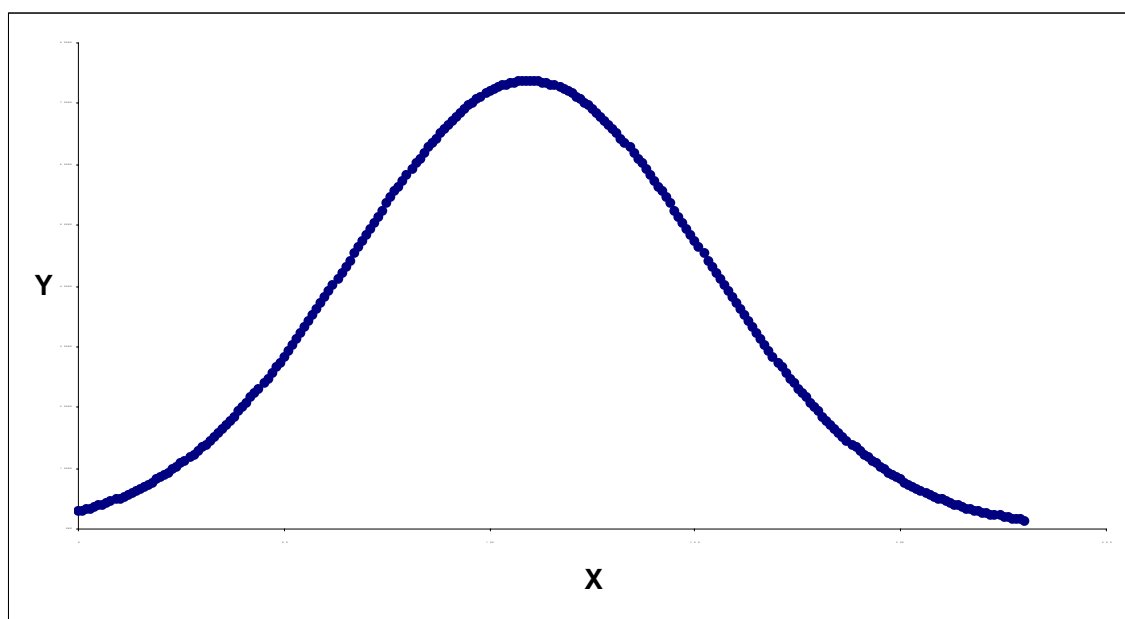
A continuación se detalla los análisis utilizados en este trabajo.

**3.15.1 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 periodos 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.

**3.15.2 Ajuste del crecimiento acumulado, absorción de fósforo, tasas de crecimiento y absorción de fósforo 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 una serie de parámetros de evaluación de las curvas. El ajuste de la función de respuesta a la fertilización se realizó a través de un modelo tipo Mitscherlich utilizando el mismo programa estadístico.

**3.15.3 Modelos utilizados para la determinación de las tasas de crecimientos y de absorción de P.** Para poder determinar las distintas tasas, fue necesario realizar ajustes en las curvas de crecimientos y absorción de fósforo de los distintos órganos a evaluar (hojas, tallos y espigas) y para el total de la planta. Los modelos utilizados se describen a continuación:

3.15.3.1 Modelo de distribución Gaussiana. Este modelo fue utilizado para determinar las tasas de crecimiento en hojas, espigas, las tasas de absorción de P en hojas, tallos, y las tasas de absorción de P en espigas. En el modelo  $Y$  al inicio representa un valor bajo, aumentando luego, hasta llegar a un máximo hacia la mitad de desarrollo de  $X$ . Luego de alcanzar un máximo,  $Y$  tiende a cero durante las últimas etapas de  $X$  (Figura 4).



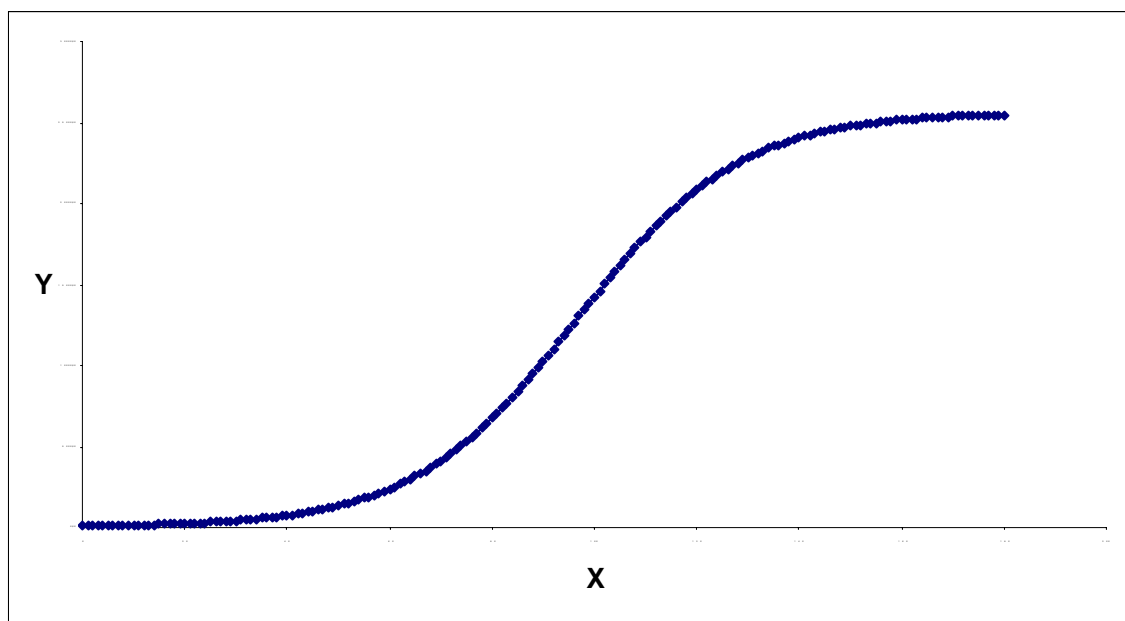
**FIGURA 4 Modelo de distribución Gaussiana.**

La ecuación de la curva de distribución Gaussiana es presentada a continuación:

$$Y = \left( \frac{\text{Area}}{\text{SD} (2 * \text{Pi})^{0,5}} \right) * \exp \left[ -0,5 * \left( \frac{X - \text{Mean}}{\text{SD}} \right)^2 \right]$$

Los parámetros de esta ecuación son: **Área**: área bajo la curva; **SD**: desviación estándar; **Pi** al valor 3,14159 y **Mean** es el valor en el tiempo **X**, donde se produce la mayor producción de **Y**.

3.15.3.2 Modelo sigmoideo de Boltzmann. Este modelo fue utilizado para determinar las tasas de crecimiento en los tallos y el total de la planta, y para determinar las tasas de absorción P en el total de la planta.



**FIGURA 5** Modelo sigmoideo de Boltzmann.

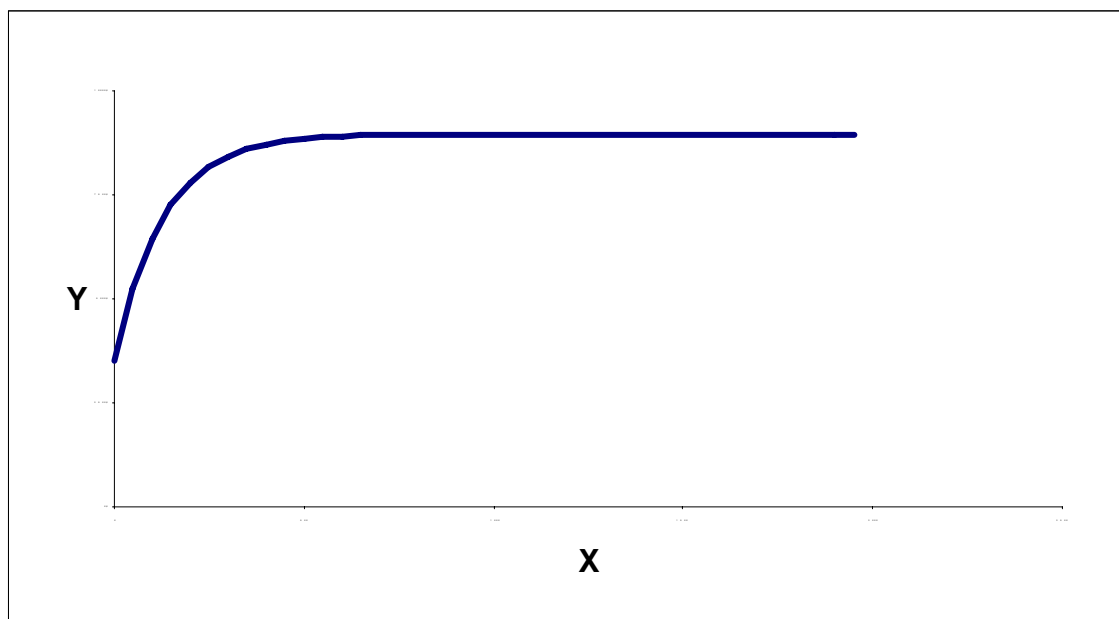
En general en el primer tercio de la curva, **Y** presenta un incremento muy leve, el cual va aumentando a medida que **X** es mayor. Luego, al llegar al tercio medio de **X**, **Y** presenta un crecimiento con tendencia lineal, hasta el comienzo del último tercio de desarrollo de la curva, donde **Y** es indiferente al los cambios de **X**, manteniéndose relativamente constante hacia final de la curva (Figura 5).

La ecuación de la curva de distribución sigmoidea se muestra a continuación:

$$Y = \text{Bottom} + \left( \frac{\text{Top} - \text{Bottom}}{1 + \exp\left(\frac{V50 - X}{\text{Slope}}\right)} \right)$$

Los parámetros de la curva son: **Bottom** es el valor más bajo que puede presentar **Y** cuando **X** tiende al menos infinito; **Top** es la máxima producción de materia seca (kg MS/ha); **V50** corresponde al valor en el tiempo **X** donde se encuentra el punto de inflexión de la curva y **Slope** es un modificador de la pendiente de la curva.

3.15.3.3 Modelo de Mitscherlich. Este modelo fue utilizado para determinar la respuesta del cultivo a la fertilización fosforada. Al inicio de la curva, pequeños cambios de **X** determinan grandes cambios en **Y**, luego este aumento de **Y** empieza a declinar, hasta llegar a un punto donde **Y** es indiferente a los cambios de **X**, manteniéndose relativamente constante (Figura 6).



**FIGURA 6** Modelo de Mitscherlich.

La ecuación de la curva se muestra a continuación:

$$Y = \text{Span} * (1 - \exp (-k * X)) + \text{Bottom}$$

En la ecuación del modelo de Mitscherlich, **Bottom** es el valor de **Y** cuando **X** es cero, el valor de **Span** más **Bottom** da el valor de **Y** máximo ajustado por el modelo y por último **K** es el coeficiente de curvatura de la relación.

## 4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

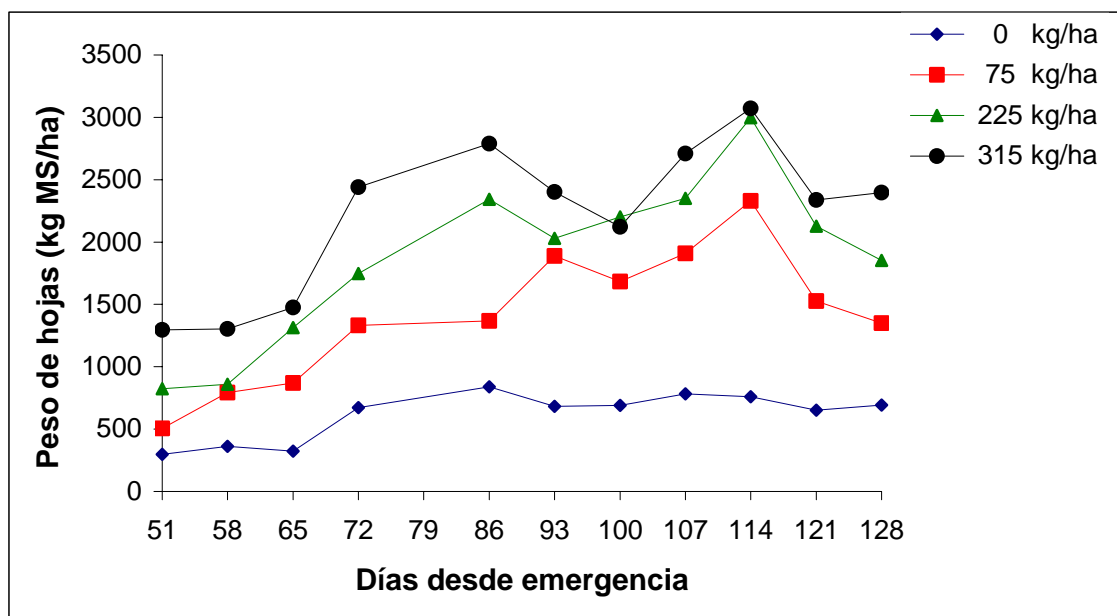
### 4.1 Variable de medición directa.

Las variables de medición directa fueron la producción de la materia seca y la concentración de fósforo. En general, por diseño de este experimento se esperaba que el tratamiento óptimo de fertilización tenga una productividad de materia seca similar al tratamiento supraóptimo de fertilización, quedando el tratamiento subóptimo en una situación intermedia entre el tratamiento sin fertilización fosforada y el tratamiento óptimo. Por su parte, en la concentración de P en los tejidos, el experimento se diseñó para que esta siempre fuera mayor en el tratamiento de mayor fertilización fosforada, dado que el tratamiento supraóptimo debería presentar un consumo de lujo del nutriente P.

**4.1.1 Producción de materia seca.** La producción de materia seca se determinó separadamente en cada órgano de la parte aérea del trigo y la suma se estimó como el total de materia seca aérea producida.

4.1.1.1 Producción de materia seca de las hojas. La producción de materia seca de las hojas varió con la adición de P en los tratamientos. En general, en todos los tratamientos, se presentó una curva que alcanza un máximo de producción de hojas hacia el 60% del período de crecimiento, para luego decrecer hacia la cosecha. El tratamiento sin adición de P, presentó la menor producción de hojas durante todo el periodo de desarrollo, mientras que el tratamiento con mayor disponibilidad de fósforo (debido a la adición de P fertilizante), obtuvo los mayores rendimientos en hojas, particularmente hasta el día 79 desde la emergencia, en que se diferenció estadísticamente del tratamiento óptimo de fertilización. A partir del muestreo del día 86 desde la emergencia, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas con el tratamiento de fertilización óptima. En la Figura 7 de la producción de materia seca de hojas, no se incluye los datos de la colecta del día 79 desde emergencia, dado que se detectó presencia de tallo en la materia seca colectada, lo que alteró el peso de las hojas. Ello produce una distorsión de la forma de la curva de producción de materia

seca de hojas, al ser considerados toda la materia seca colectada en este estado como parte de las hojas (Figura 7).



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

La máxima acumulación de materia seca en las hojas se presentó a los 86 días desde emergencia en el tratamiento sin aplicación de P (momento de floración), mientras que el resto de los tratamientos fertilizados con P presentaron el máximo de acumulación de materia seca a los 114 días desde emergencia. El tratamiento de fertilización fosforada óptima alcanzó una producción de 2996 kg MS/ha, siendo esta 3,6 veces mayor a la productividad máxima presentada en el tratamiento sin aplicación de P. La máxima producción presentada en hojas del tratamiento óptimo de fertilización fosforada, fue similar a la máxima acumulación de materia seca de hojas presentada en el tratamiento supraóptimo.

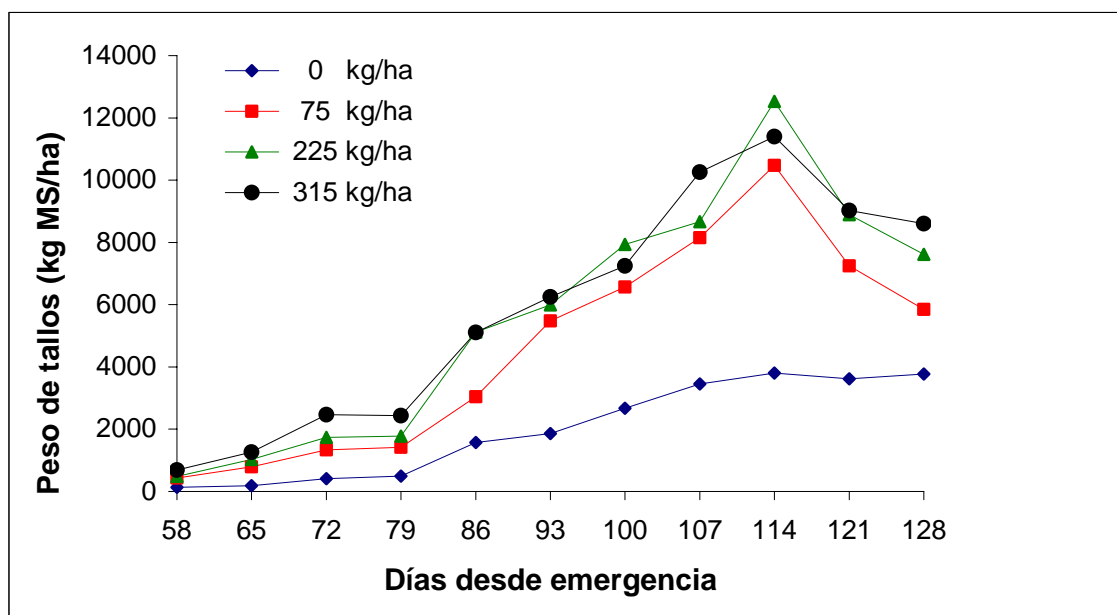
En el primer muestreo (día 51 desde emergencia) la productividad de materia seca varió significativamente entre tratamientos (Cuadro 6), siendo 2,8 veces mayor la

productividad en el tratamiento de fertilización óptimo en comparación con el tratamiento sin aplicación de P (824 kg MS/ha versus 297 kg MS/ha, respectivamente). Por su parte, DASSE (2005) en un experimento similar realizado el año 2001, obtuvo menores diferencias entre el tratamiento de fertilización fosforada óptima y el tratamiento sin aplicación de P. Sin embargo, los valores del tratamiento sin aplicación de P entre ambos experimentos fueron similares, aunque existió una variación en el nivel de P-Olsen inicial, el cual en el experimento de DASSE (2005) fue de 9,0 ppm y en este experimento fue de 7,4 ppm P-Olsen.

La materia seca de las hojas luego de alcanzar un máximo de productividad disminuye hasta cosecha entre un 14 y un 28 %, en los distintos tratamientos. Al momento de cosecha el tratamiento que presentó una menor disminución de materia seca en hojas, en relación al máximo producido, fue el tratamiento con mayor aplicación de P (315 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Efectos similares de disminución de materia seca a partir de un máximo de acumulación en las hojas, han sido mostrados en trigo alternativo por DASSE (2005) y GREGORY *et al.* (1979b). Este efecto ha sido atribuido al proceso de translocación de carbohidratos desde las hojas hacia los granos GREGORY *et al.* (1979b). Por su parte, BOATWRIGHT y HASS (1961) ya habían establecido que la pérdida del peso seco de las hojas, desde el estado de floración a madurez, se atribuía 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 los tallos. En general, se observó para todos los tratamientos fertilizados con P un incremento de la materia seca en tallos desde el inicio de los muestreos (día 58 desde emergencia), llegando a un máximo a los 114 días desde emergencia (Figura 8). Luego de los 114 días desde emergencia, la productividad de la materia seca de tallos en los tratamientos fertilizados disminuye hasta cosecha. Un comportamiento similar fue descrito por DASSE (2005) y BOATWRIGHT y HAAS (1961), en cuyos experimentos, un mes antes de la madurez de cosecha, se presentó un máximo relativo de acumulación de materia seca de los tallos para todos los tratamientos realizados.





**FIGURA 8** 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.

El comportamiento que adopta la materia seca en el tratamiento sin fertilización fosforada fue similar a la descrita en los tratamientos con aplicación de P, a excepción que en las últimas semanas de desarrollo del cultivo en el tratamiento sin fertilización, el cual no muestra la declinación observada en los otros tratamientos con fertilización fosforada.

En general, la materia seca producida en los tallos de los tratamientos con fertilización fosforada, fue estadísticamente distinta a la materia seca producida en tallos del tratamiento sin fertilización fosforada. Por su parte, el tratamiento de fertilización fosforada óptima presentó diferencias significativas con el tratamiento de mayor aplicación de P en la producción de materia seca de tallos, hasta los 79 días desde emergencia, presentándose posteriormente una productividad similar entre tratamientos, hasta final de cosecha (Cuadro 6).

La mayor producción de materia seca en tallos fue determinada en el tratamiento de fertilización fosforada óptima (12533 kg MS/ha), siendo esta 3,3 veces mayor a la máxima productividad de tallos presentada en el tratamiento sin aplicación de P (3800 kg MS/ha). Sin embargo, al momento de cosecha el mayor rendimiento en tallos se observó en el tratamiento de mayor aplicación de P, no presentando diferencias significativas con el tratamiento de fertilización fosforada óptima. La productividad de materia seca en tallos del tratamiento óptimo fue de 7617 kg MS/ha, a diferencia de los 3767 kg MS/ha de tallos producido en el tratamiento sin aplicación de P.

La cantidad máxima de materia seca producida en los tallos fue 4,1 a 5,5 veces mayor al máximo de materia seca producido en las hojas. Una menor relación entre la productividad de materia seca de tallos y hojas fue descrita por DASSE (2005), donde la máxima productividad de materia seca en tallos fue 3,0 veces mayor a la máxima productividad de la materia seca de las hojas.

4.1.1.3 Producción de materia seca de las espigas. Como se observa en la Figura 9, la materia seca acumulada en espigas de los tratamientos fertilizados, tuvo un aumento en la producción desde el inicio de muestreo, llegando a una máxima productividad el día 114 desde emergencia, para luego disminuir hasta madurez fisiológica. En cambio el tratamiento sin adición de fósforo, luego de la primera semana de muestreo (86 días desde emergencia), mantiene la productividad de materia seca en espigas, sin mostrar un claro crecimiento durante las siguientes semanas de desarrollo del cultivo. Por su parte, DASSE (2005) determinó un crecimiento de espigas similar entre el tratamiento sin fertilización fosforada y los tratamientos con aplicación de P, presentándose un máximo de acumulación de materia seca a los 114 días desde emergencia, para luego disminuir hacia cosecha. Sin embargo, en las últimas dos semanas de cultivo, el tratamiento sin adición de P presentó un aumento de materia seca en espigas, mientras que los tratamientos fertilizados se mantuvieron sin mayores cambios (DASSE, 2005).

Durante todo el desarrollo del cultivo el tratamiento óptimo y el tratamiento supraóptimo no presentaron diferencias significativas en la producción de materia seca

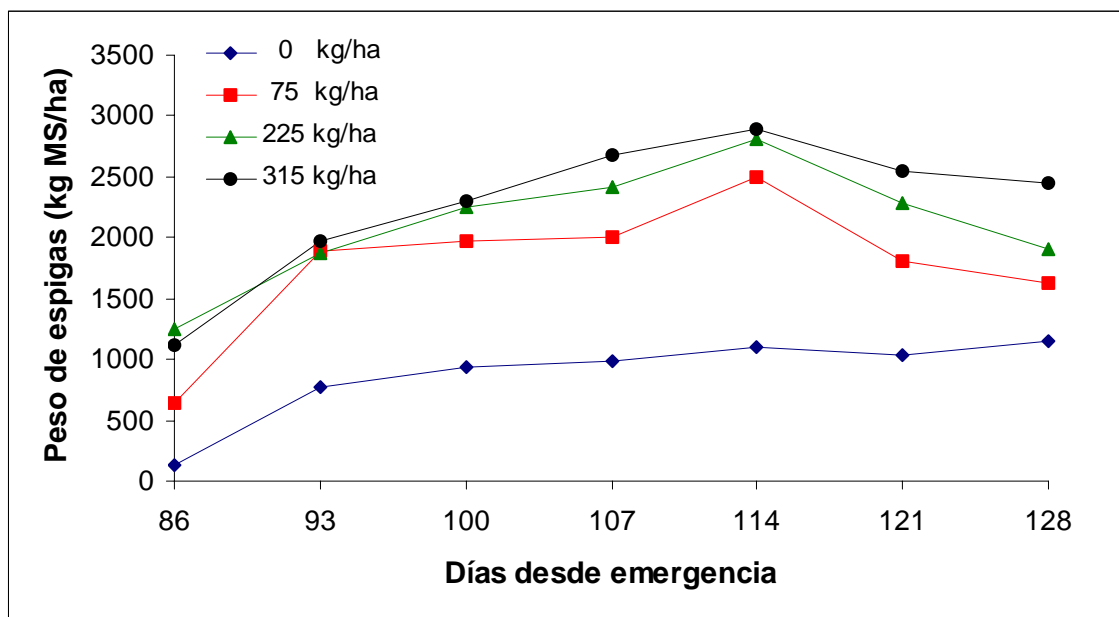
de espigas. A diferencia del tratamiento sin aplicación de P, quien presentó diferencias estadísticamente significativas en la productividad de materia seca de espigas con los tratamientos de mayor aplicación de P. Sin embargo, al momento de cosecha se determinó una menor diferencia en la productividad de materia seca de espigas entre los tratamientos y sólo se observaron diferencias estadísticas entre el tratamiento con mayor aplicación de P y el tratamiento sin adición de P, presentando una situación intermedia el tratamiento subóptimo y el tratamiento óptimo de fertilización fosforada (Cuadro 6).

La máxima producción de materia seca de espigas se obtuvo en el tratamiento con mayor aplicación de fósforo al suelo (2900 kg MS/ha). Por su parte, el tratamiento óptimo presentó una productividad máxima de espigas de 2808 kg MS/ha, siendo esta 2,4 veces mayor a la máxima productividad de materia seca de espigas obtenida en el tratamiento sin fertilización fosforada (1153 kg MS/ha). Una mayor producción de espigas fue determinada por DASSE (2005), donde el tratamiento que presentó la producción máxima más baja de espigas (tratamiento sin adición de P), fue superior a la máxima más alta de espigas determinada en el tratamiento supraóptimo, en este estudio.

La mayor diferencia de producción de materia seca de espigas entre los tratamientos se logra apreciar en la primera colecta de espigas, donde las diferencias de productividad de materia seca fue 9,6 veces mayor en el tratamiento de fertilización fosforada óptima (225 kg  $P_2O_5$ /ha) en relación al tratamiento sin adición de P. El tratamiento óptimo presentó una producción de espigas en el primer muestreo de 1251 kg MS/ha, mientras que el tratamiento de sin aplicación de P, durante el primer muestro de espigas presentó una productividad de 130 kg MS/ha.

La menor productividad de espigas en cosecha se determinó en el tratamiento sin fertilización fosforada, alcanzando los 1153 kg MS/ha, mientras que el tratamiento de óptima fertilización fosforada alcanzó una productividad de 1913 kg MS/ha, al momento de cosecha. Los tratamientos subóptimo y supraóptimo presentaron una productividad de espigas en cosecha de 1630 y 2448 kg MS/ha. Una situación totalmente distinta al momento de cosecha, fue descrita por DASSE (2005), donde el

tratamiento subóptimo, presentó el menor crecimiento de espigas, a diferencia del tratamiento óptimo y el supraóptimo de fertilización fosforada, quienes presentaron la mayor producción de espigas al momento de cosecha.



**FIGURA 9** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en espigas del cultivo de trigo.

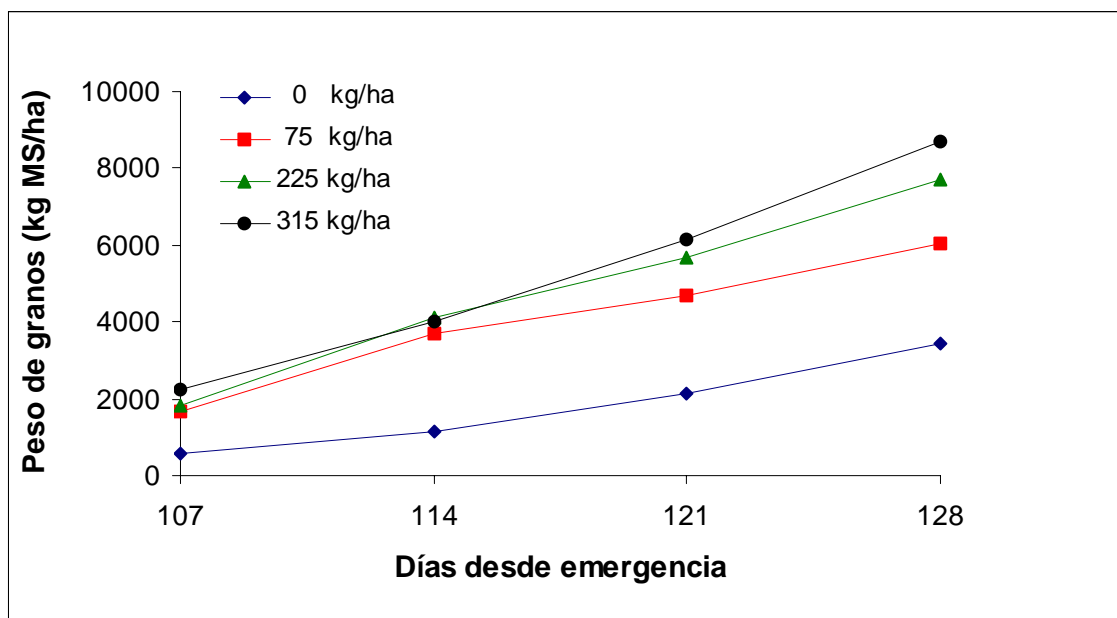
4.1.1.4 Producción de materia seca de los granos. La producción acumulada de materia seca en los granos del total de los tratamientos estudiados, tuvo un comportamiento lineal, existiendo una influencia de la fertilización fosforada sobre el rendimiento, durante todo el desarrollo (Figura 10). En el tratamiento sin fertilización fosforada (7,4 ppm de P-Olsen), se determinó la menor producción de granos durante todo su desarrollo, presentando una gran diferencia en relación a los rendimientos presentados por los demás tratamientos. Por su parte, los tratamientos óptimo y supraóptimo, presentaron un rendimiento similar de granos, en todas las colectas realizadas.

La productividad de materia seca de granos de trigo en los tratamientos fertilizados con P fue estadísticamente distinta a la productividad de materia seca de granos de trigo, determinada en el tratamiento sin fertilización fosforada, hasta los 121 días desde emergencia. A diferencia de la última semana de muestreo, donde sólo presentaron diferencias significativas los tratamientos de mayor fertilización fosforada (óptimo y supraóptimo) con el tratamiento sin adición de P (Cuadro 6).

Al inicio de los muestreos de granos, el tratamiento de fertilización fosforada óptima, presentó una productividad de 1813 kg MS/ha, a diferencia de los 574,6 kg MS/ha presentados en el tratamiento sin fertilización fosforada. En cosecha, se observó que la materia seca producida en granos de trigo fue mayor a medida que las dosis de fósforo aplicadas como fertilizante eran más altas. Sin embargo, el rendimiento de granos presentado en el tratamiento con mayor aplicación de P fue levemente superior al rendimiento obtenido en el tratamiento de óptima fertilización fosforada, sin diferenciarse estadísticamente. El rendimiento de materia seca en granos, alcanzado en el tratamiento óptimo fue de 7709 kg MS/ha, a diferencia de los 3449 kg MS/ha obtenidos en el tratamiento sin fertilización fosforada. Ósea el rendimiento de granos presentado en el tratamiento de fertilización óptima fue 2,2 veces mayor al rendimiento de grano obtenido por el cultivo sin fertilización fosforada. Por su parte DASSE (2005), determino un rendimiento de 7291 kg MS/ha para el tratamiento sin fertilización fosforada, y una productividad de 7973 kg MS/ha para el tratamiento de óptima fertilización fosforada, siendo esta última, levemente superior a la productividad determinada en el tratamiento óptimo de este estudio (7709 kg MS/ha).

Al comparar los rendimientos de granos de trigo obtenido en los tratamientos sin fertilización fosforada entre el estudio realizado por DASSE (2005), y el obtenido en el presente ensayo, se determinó diferencias de productividad entre tratamientos. Donde el rendimiento del cultivo de trigo reportado por DASSE (2005), alcanzó una productividad de 72 qqm/ha, mientras que el rendimiento alcanzado en granos de trigo del tratamiento sin aplicación de P en este estudio, fue sólo de 34 qqm/ha. Si bien los dos tratamientos presentan las mismas condiciones de fertilización (sin aplicación de P), la diferencia radica principalmente del nivel inicial de P en el suelo. El nivel inicial de P en el suelo de las parcelas del tratamiento sin fertilización fosforada fue de 7,4 ppm

de P-Olsen. A diferencia de los 9,0 ppm de P-Olsen reportados por DASSE (2005) como P inicial en el suelo del tratamiento sin fertilización fosforada.



**FIGURA 10 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en granos del cultivo de trigo.**

La productividad de la materia seca en granos al momento de cosecha fue 3,5 a 6,0 veces mayor a la productividad de materia seca en granos obtenida a inicio de muestreos. La mayor diferencia de materia seca producida en granos desde inicio de muestreos a cosecha, fue determinada en el tratamiento sin aplicación de fósforo, mientras que la menor diferencia se observó en el tratamiento subóptimo.

El grano fue el órgano que presentó una mayor participación en la materia seca total al momento de cosecha, en todos los tratamientos fertilizados con P, a diferencia del tratamiento sin aplicación de fósforo, donde el tallo fue el órgano de mayor participación en la materia seca total. La participación porcentual de los granos en la planta varió de un 38,1 a un 40,4%, presentando el tratamiento sin fertilización

fosforada la menor participación de granos en la biomasa aérea total producido por las plantas de trigo.

4.1.1.5 Producción de materia seca total. La producción de materia seca total de la planta de trigo en los tratamientos fertilizados presentó un crecimiento lento durante las primeras tres semanas de muestreos (72 días desde emergencia), luego la producción de materia seca aumentó y presentó un comportamiento lineal, hasta las últimas dos semanas, donde la acumulación de materia seca disminuyó en los tratamientos de fertilización subóptima y de fertilización fosforada óptima. Por su parte, el tratamiento con fertilización supraóptima mantiene su producción sin mayores cambios durante las últimas dos semanas de cultivo. A diferencia del tratamiento sin fertilización fosforada, quien mantuvo un comportamiento lineal en la producción de materia seca hasta final de cosecha (Figura 11). El comportamiento obtenido en los tratamientos con mayor fertilización fosforada fue similar a los reportados por GREGORY *et al.* (1979a), quienes definieron el crecimiento total de la materia seca en tres fases de desarrollo: fase de lento crecimiento, fase lineal y una fase constante en donde la materia seca no presentó incrementos significativos.

Durante todo el desarrollo del cultivo el tratamiento sin aplicación de P presentó la menor producción de materia seca, siendo esta estadísticamente distinta a la productividad presentada en los tratamientos fertilizados con P. Por su parte, el tratamiento de mayor fertilización fosforada presentó diferencias significativas con los tratamientos óptimo y subóptimo, hasta los 79 días desde emergencia, encontrándose durante la última semana el tratamiento subóptimo en una situación intermedia entre los tratamientos de mayor aplicación de P y el tratamiento sin fertilización fosforada (Cuadro 6).

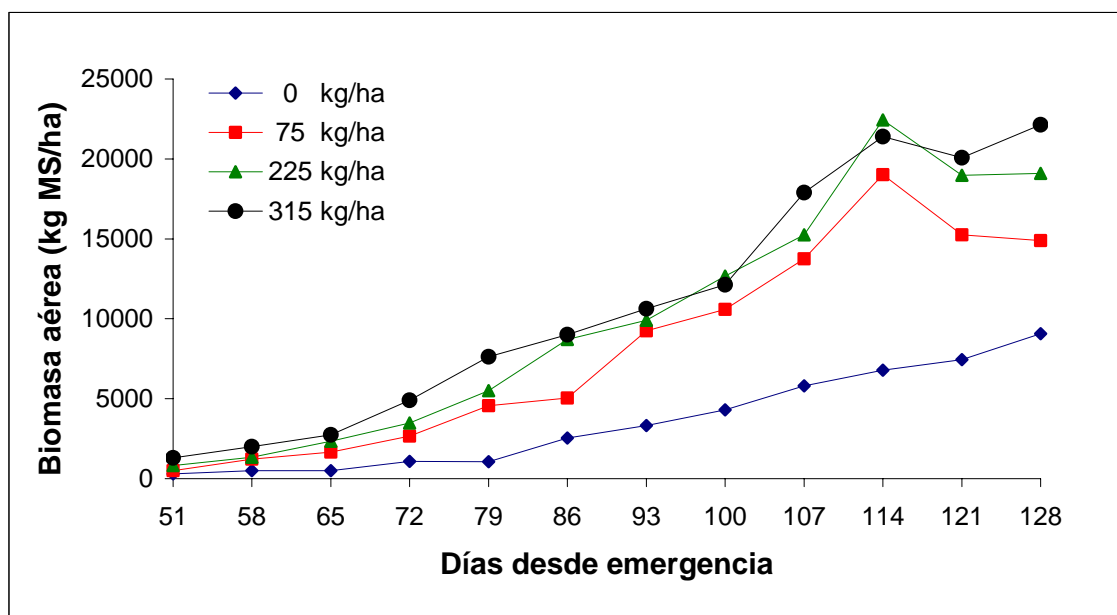
La materia seca producida por el total aéreo del cultivo al momento de cosecha varió entre 9064 y 22142 kg MS/ha. El cultivo de trigo en el tratamiento con mayor fertilización fosforada, produjo más del doble de materia seca que la producida en el cultivo del tratamiento sin fertilización fosforada. A su vez, el tratamiento de mayor adición de P no presentó diferencias significativas con el tratamiento de óptima fertilización, quien alcanzó un rendimiento total en la planta de 19093 kg MS/ha, al final

de cosecha. La producción determinada al momento de cosecha en el tratamiento de subóptimo fue de 14890 kg MS/ha, presentando un crecimiento intermedio entre el tratamiento sin fertilización fosforada y el tratamiento de fertilización fosforada óptima.

El bajo rendimiento en la materia seca total en el tratamiento sin fertilización fosforada, se atribuyó a la baja disponibilidad de P-Olsen en el suelo (7,4 ppm P-Olsen), no logrando satisfacer de forma óptima los requerimientos de fósforo en la planta de trigo, impidiendo un normal funcionamiento interno y provocando así un atraso en su desarrollo fisiológico. Así, OZANNE (1980) mostró que cuando los niveles de fósforo disponible en el suelo no son adecuados para la nutrición fosforada del cultivo de trigo, en los primeros estados de desarrollo del cultivo, se puede disminuir el crecimiento y los rendimientos al final de su desarrollo. Este mismo efecto fue observado anteriormente, en el estudio de DASSE (2005), donde la productividad de la biomasa aérea total en el tratamiento sin fertilización fosforada fue de 14967 kg MS/ha, mientras que el tratamiento de fertilización fosforada óptimo alcanzó una productividad de 17183 kg MS/ha.

Según DASSE (2005), el cultivo de trigo del tratamiento óptimo de fertilización fue 1,2 veces mayor a la productividad obtenida en el cultivo de trigo del tratamiento sin fertilización fosforada, al momento de cosecha. A diferencia del presente estudio, donde la productividad del total aéreo obtenida en el tratamiento óptimo al momento de cosecha (19093 kg MS/ha) fue 2,1 veces mayor al rendimiento obtenido en el total aéreo del tratamiento sin adición de P (9064 kg MS/ha). Por último, la materia seca total determinada en tratamiento sin adición de P, por DASSE (2005), fue similar a la determinada en el tratamiento subóptimo de este estudio.





**FIGURA 11** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la producción de materia seca acumulada en biomasa aérea del cultivo de trigo.

**CUADRO 6 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre el crecimiento de los distintos órganos del cultivo de trigo.**

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia			
		51	58	65	72
Hojas	0	297,1 ± 60 a	362,3 ± 106 a	323,2 ± 70 a	672,8 ± 285 a
	75	504,8 ± 114 ab	793,0 ± 118 ab	869,1 ± 315 ab	1331,5 ± 170 b
	225	824,3 ± 146 b	858,8 ± 75 bc	1314,2 ± 321 b	1746,3 ± 293 b
	315	1296,5 ± 172 c	1330,1 ± 320 c	1476,1 ± 178 b	2441,1 ± 206 c
Tallos	0		132,3 ± 45 a	183,9 ± 19 a	413,4 ± 220 a
	75		431,3 ± 59 b	795,7 ± 350 ab	1337,5 ± 239 b
	225		483,1 ± 41 bc	1031,1 ± 167 b	1732,5 ± 156 b
	315		689,9 ± 151 c	1267,9 ± 414 b	2471,4 ± 273 c
Espigas	0				
	75				
	225				
	315				
Granos	0				
	75				
	225				
	315				
Total	0	297,1 ± 60 a	494,6 ± 150 a	507,2 ± 87 a	1086,2 ± 505 a
	75	504,8 ± 114 ab	1224,3 ± 176 b	1664,8 ± 663 ab	2668,9 ± 384 b
	225	824,3 ± 146 b	1341,9 ± 113 bc	2345,3 ± 445 b	3478,8 ± 447 b
	315	1296,5 ± 172 c	1993,0 ± 461 c	2744,0 ± 591 b	4912,5 ± 458 c

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

Continuación Cuadro 6

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia											
		79		86		93		100					
Hojas	0	565,7	± 53	a	840,1	± 44	a	683,5	± 60	a	691,1	± 215	a
	75	3149,0	± 401	b	1368,8	± 176	a	1889,2	± 188	ab	1684,3	± 592	b
	225	3741,0	± 439	b	2342,2	± 453	b	2030,6	± 684	ab	2201,9	± 128	b
	315	5183,0	± 886	c	2790,1	± 258	b	2401,0	± 790	b	2121,3	± 372	b
Tallos	0	491,7	± 52	a	1573,7	± 61	a	1861,5	± 495	a	2673,7	± 937	a
	75	1418,5	± 203	b	3039,2	± 187	b	5478,2	± 483	b	6572,6	± 1919	b
	225	1773,1	± 135	b	5120,9	± 513	c	5995,5	± 1530	b	7934,6	± 743	b
	315	2438,6	± 359	c	5105,5	± 109	c	6253,2	± 668	b	7246,7	± 365	b
Espigas	0				130,8	± 51	a	779,1	± 162	a	936,7	± 221	a
	75				637,0	± 121	b	1881,9	± 115	b	1976,9	± 643	b
	225				1251,8	± 154	c	1880,0	± 439	b	2245,4	± 87	b
	315				1118,5	± 140	c	1970,8	± 480	b	2297,5	± 161	b
Granos	0												
	75												
	225												
	315												
Total	0	1057,4	± 35	a	2544,7	± 52	a	3324,1	± 703	a	4301,5	± 1364	a
	75	4567,5	± 580	b	5045,0	± 423	b	9249,3	± 754	b	10592,2	± 3386	b
	225	5514,2	± 510	b	8715,1	± 1065	c	9906,1	± 2652	b	12675,6	± 881	b
	315	7621,6	± 1237	c	9014,1	± 246	c	10624,9	± 1878	b	12135,4	± 806	b

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

Continuación Cuadro 6

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia			
		107	114	121	128
Hojas	0	783 ± 190 a	759,7 ± 68 a	651,4 ± 106 a	693,6 ± 126 a
	75	1909,5 ± 453 ab	2329,8 ± 240 b	1526,5 ± 390 ab	1349,4 ± 366 ab
	225	2351,3 ± 346 b	2996,9 ± 592 b	2126,1 ± 444 b	1852,4 ± 232 bc
	315	2708,5 ± 991 b	3071,8 ± 579 b	2336,9 ± 331 b	2397,1 ± 354 c
Tallos	0	3455,8 ± 649 a	3800,6 ± 458 a	3616,2 ± 760 a	3767,9 ± 437 a
	75	8149,2 ± 1615 b	10473,5 ± 699 b	7249,4 ± 1499 b	5845,3 ± 781 ab
	225	8666,3 ± 648 b	12533,2 ± 1092 b	8887,3 ± 1439 b	7617,4 ± 821 bc
	315	10259,4 ± 1875 b	11400,2 ± 1798 b	9023,8 ± 677 b	8606,4 ± 1657 c
Espigas	0	992,9 ± 236 a	1100,3 ± 188 a	1029,9 ± 237 a	1153,2 ± 119 a
	75	2002,5 ± 424 b	2503,9 ± 69 b	1804,2 ± 470 ab	1630,8 ± 316 ab
	225	2414,7 ± 272 b	2808,4 ± 355 b	2278,6 ± 389 b	1913,7 ± 439 ab
	315	2685,2 ± 441 b	2900,0 ± 388 b	2546,2 ± 361 b	2448,1 ± 591 b
Granos	0	574,6 ± 169 a	1130,0 ± 233 a	2140,7 ± 495 a	3449,6 ± 312 a
	75	1687,7 ± 489 b	3704,6 ± 110 b	4670,4 ± 879 b	6064,8 ± 1504 ab
	225	1813,2 ± 299 b	4103,0 ± 270 b	5690,8 ± 827 b	7709,5 ± 841 b
	315	2239,4 ± 329 b	4024,13 ± 520 b	6170,4 ± 749 b	8690,8 ± 2253 b
Total	0	5806,47 ± 1232 a	6790,67 ± 938 a	7438,23 ± 1590 a	9064,47 ± 936 a
	75	13749 ± 2971 b	19011,9 ± 1111 b	15250,5 ± 3194 b	14890,3 ± 2902 ab
	225	15245,6 ± 1261 b	22441,5 ± 2279 b	18982,9 ± 3089 b	19093,1 ± 2088 b
	315	17892,5 ± 3553 b	21396,2 ± 3270 b	20077,4 ± 2115 b	22142,4 ± 4796 b

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

**4.1.2 Concentración de fósforo.** La concentración de fósforo fue determinada para cada órgano de la parte aérea del cultivo y se expresó como porcentaje de fósforo en relación a la materia seca producida. La concentración de P total de la parte aérea de la planta de trigo se calculó a través de la materia seca producida y el total de P absorbido por la planta al momento de cosecha.

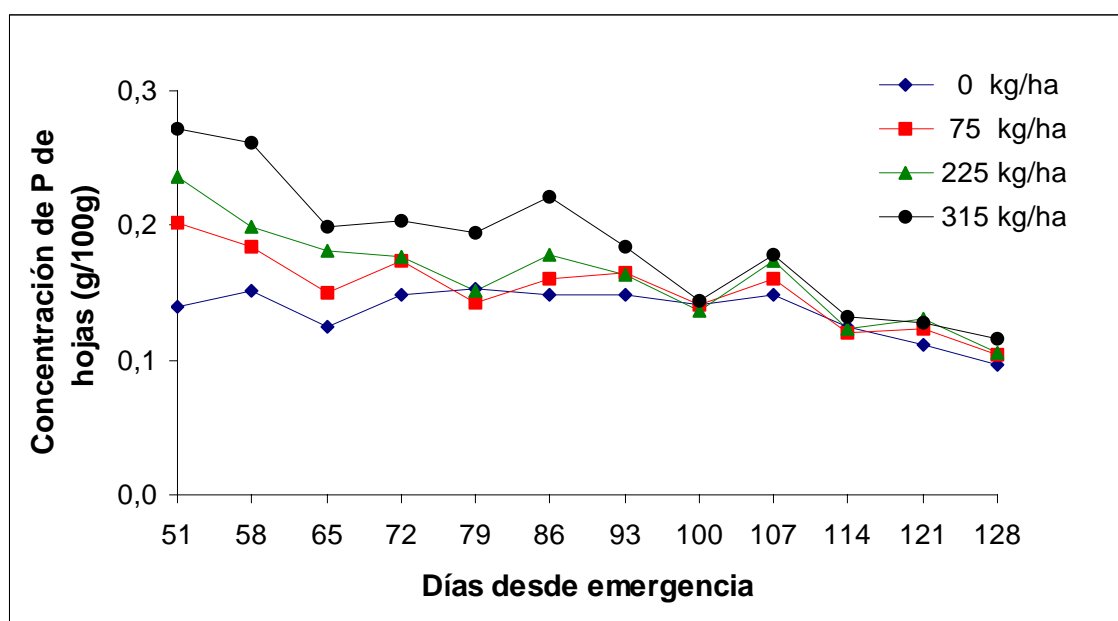
4.1.2.1 Concentración de fósforo en las hojas. En general, la concentración de P en la hoja de trigo de los tratamientos con fertilización fosforada fue disminuyendo durante todo el periodo de desarrollo del cultivo (Figura 12). Las mayores diferencias debidas a la fertilización fosforada se presentaron entre el período de inicio de muestreo (día 51 desde la emergencia) hasta los 100 días desde la emergencia, lo cual correspondió a dos semanas después de la floración. A partir de esa colecta, las diferencias en concentración de P disminuyen entre los tratamientos. Por su parte, DASSE (2005) después de la primera semana de muestreo (37 desde la emergencia) observó un aumento de las concentraciones de fósforo en hojas, hasta floración y luego una disminución de la concentración de P en hojas, hasta final de cosecha. Este comportamiento fue diferente del observado en este experimento, pero se mantuvo que las diferencias estadísticas entre la concentración de P en las hojas debido a los tratamientos de fertilización fosforada, se determinaron en los muestreos antes de floración.

El tratamiento sin fertilización fosforada, en general, mostró la menor concentración de P en las hojas, la cual se mantiene relativamente constante hasta el día 100 desde la emergencia, disminuyendo a partir de esa colecta hasta el término del cultivo.

Desde inicio de muestreo hasta los 100 días desde emergencia las concentraciones de P en hojas se ordenaron en relación a los niveles de disponibilidad de P en el suelo, encontrándose las mayores concentraciones de P en el tratamiento con mayor fertilización fosforada. Luego de los 100 días desde emergencia (dos semanas después de floración) no existió una influencia de la fertilización fosforada sobre la concentración de P en las hojas. Un comportamiento similar fue descrito por DASSE (2005), donde existieron diferencias de concentraciones

de P entre tratamientos, hasta los 86 días desde emergencia (una semana antes de floración), mientras que en las siguientes semanas de desarrollo del cultivo (hasta término de cultivo) no se observaron mayores diferencias en las concentraciones de P entre tratamientos.

Los tratamientos fertilizados con P presentaron diferencias estadística con el tratamiento sin adición de P, hasta los 65 días desde emergencia. Durante las siguientes semanas sólo se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos de mayor aplicación de P y el tratamiento sin fertilización fosforada (Cuadro 7).



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

Al momento de floración las concentraciones de P de hojas variaron entre 0,15 y 0,22%, ordenándose en relación al nivel de fertilización de P en el suelo. A diferencia de lo descrito por DASSE (2005), quien determinó concentraciones de P entre 0,28 y 0,32%, al momento de floración. Donde según DASSE (2005), el tratamiento que

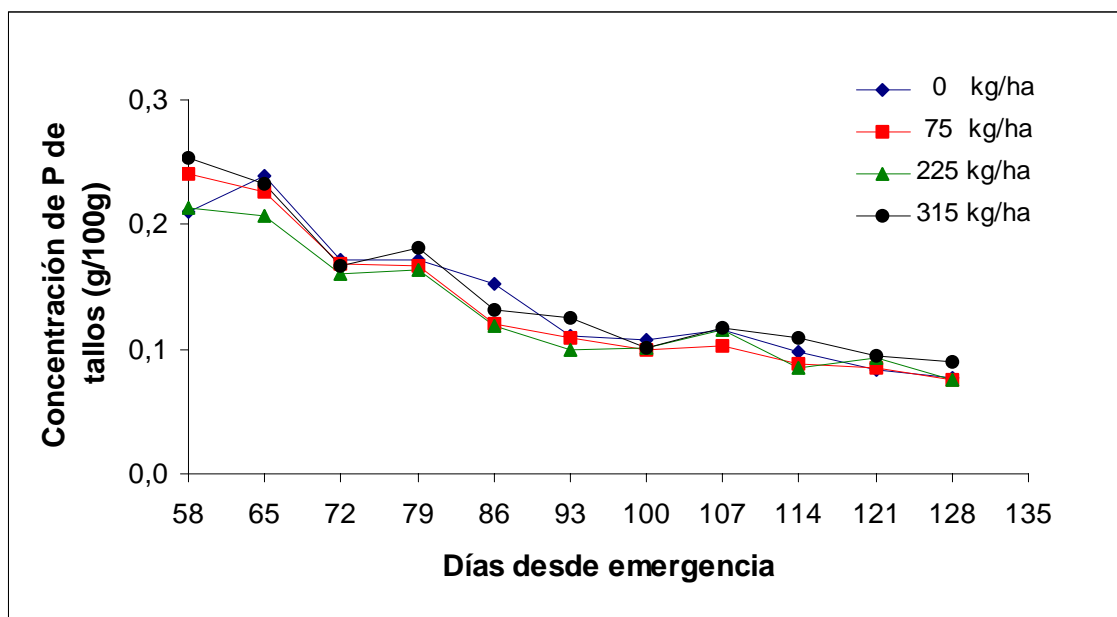
presentó la menor concentración fue el óptimo, a diferencia del supraóptimo quien presentó la concentración de P más alta en floración.

Las mayores diferencias de concentraciones de P en hojas entre los tratamientos se observaron al inicio de los muestreos (día 51 desde emergencia), existiendo diferencias entre 0,14 y 0,27%, mientras que las menores diferencias de concentraciones de P entre tratamientos, fueron determinadas en los últimos estados de desarrollo del cultivo.

Las concentraciones de P en hojas al momento de cosecha variaron de 0,10 a 0,12%, presentándose la mayor concentración en el tratamiento de mayor fertilización con P. Concentraciones de P en hojas más bajas al momento de cosecha fueron determinadas por DASSE (2005), donde la concentración de P más alta presentada en el tratamiento de mayor fertilización fosforada (0,068 %) fue menor que la concentración de P más baja presentada en el tratamiento sin aplicación de P del presente estudio (0,097%).

4.1.2.2 Concentraciones de fósforo de los tallos. En la Figura 13 se muestra que en general las concentraciones de P de los tallos de todos los tratamientos fueron disminuyendo hasta el final del cultivo, no existiendo mayores diferencias entre tratamientos. Este comportamiento fue diferente a lo descrito por DASSE (2005), quien determinó durante las primeras semanas de muestreos, diferencias significativas de las concentraciones de P entre los tratamientos de mayor fertilización fosforada (óptimo y supraóptimo) y el tratamiento sin aplicación de P.

Durante todo el desarrollo de cultivo, sólo presentaron diferencias estadísticas el tratamiento sin fertilización fosforada y el tratamiento de mayor aplicación de P (Cuadro 7).



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

Las concentraciones de P determinadas por DASSE (2005), al momento de floración fueron superiores a las determinadas en este estudio. DASSE (2005), determinó concentraciones en floración desde 0,15 a 0,18%, presentando la mayor concentración el supraóptimo y la menor concentración el óptimo. Las concentraciones en este experimento, variaron entre 0,12 y 0,15% al momento de floración, encontrándose el valor más alto en el tratamiento sin adición de P. A diferencia de los tratamientos subóptimo y óptimo, quienes presentaron concentraciones más bajas de P en floración.

Al comparar las concentraciones de P en tallos con las concentraciones de P presentadas en las hojas, se determinó que en hojas, el tratamiento que presentó la mayor concentración de fósforo (tratamiento supraóptimo), fue 1,9 veces superior a la concentración de P de hojas presentada por el tratamiento sin aplicación de P, al inicio de colecta. Mientras que en los tallos las mayores diferencias de las concentraciones de P no superaron el 4,3%. Otra diferencia observada en las concentraciones de P



entre tallos y hojas fue que en las concentraciones de P en hojas existió una influencia de la cantidad de P aplicada en los tratamientos sobre la concentración de fósforo, durante las primeras semanas de muestreos, mientras que en los tallos no se logra apreciar de forma clara, una influencia de las distintas dosis de fertilización fosforada aplicada a los tratamientos, sobre las concentraciones de P.

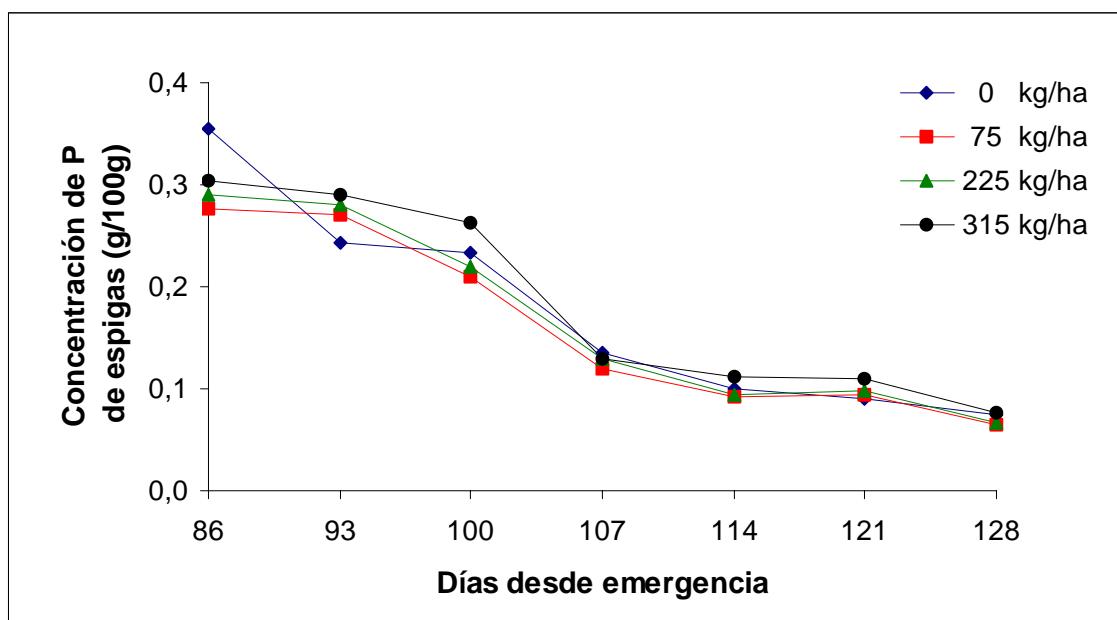
La concentración promedio de P en los tallos, al inicio de los muestreos de los distintos tratamientos, fue en promedio de 0,23%, mientras que la concentración promedio de fósforo en tallos, al final de cosecha no superó el 0,08%.

4.1.2.3 Concentraciones de fósforo de las espigas. Las concentraciones de P de las espigas durante todo el periodo de cultivo tuvieron un comportamiento similar al determinado en las concentraciones de los tallos. Se determinó una disminución en las concentraciones de P de las espigas desde el inicio de los muestreos hasta cosecha final (Figura 14). Las mayores diferencia entre tratamientos se determinó hasta los 107 días desde emergencia, siendo similares las concentraciones entre tratamientos durante las últimas tres semanas de desarrollo del cultivo. Un comportamiento similar fue descrito por DASSE (2005), donde las mayores diferencias entre tratamientos se presentaron durante las primeras etapas de desarrollo de espigas.

En la primera semana de muestreo el tratamiento sin adición de P fue el que presentó la mayor concentración de P de espigas, del total de los tratamientos. Después de la primera semana de muestreo de espigas, el tratamiento de mayor fertilización fosforada fue el que presentó la mayor concentración de P en las espigas, hasta final de cosecha.

El tratamiento supraóptimo presentó diferencias estadísticas en las concentraciones de P con el tratamiento sin fertilización fosforada, hasta los 121 días desde emergencia, encontrándose en una situación intermedia los tratamientos óptimo y subóptimo. Mientras que en la última colecta no se presentaron mayores diferencias entre tratamientos (Cuadro 7).

La máxima concentración de P observado en espigas va desde 0,28 a 0,35% (floración), concentraciones de P más altas que las máximas concentraciones de P determinadas en las hojas y los tallos. Las concentraciones de P más altas presentadas al inicio de los muestreos en espigas fueron 4,0 a 4,7 veces mayores a las concentraciones de P en espigas presentadas al momento de la cosecha. De este modo, las mayores diferencias de concentraciones de P desde inicio de muestreo a cosecha fueron observadas en las espigas, seguidas por los tallos (entre 2,7 y 3,9 veces la productividad desde inicio de muestreo a cosecha) y por último las hojas. Las mayores diferencias de concentraciones de P en las hojas se determinó en el tratamiento de mayor fertilización fosforada, donde la concentración inicial fue 2,4 veces mayor a la concentración presentada al momento de cosecha. Mientras que la menor diferencia de concentraciones de P en hojas fue observada en el tratamiento sin fertilización fosforada (concentración de P al inicio fue 1,4 veces mayor a la presentada en cosecha).



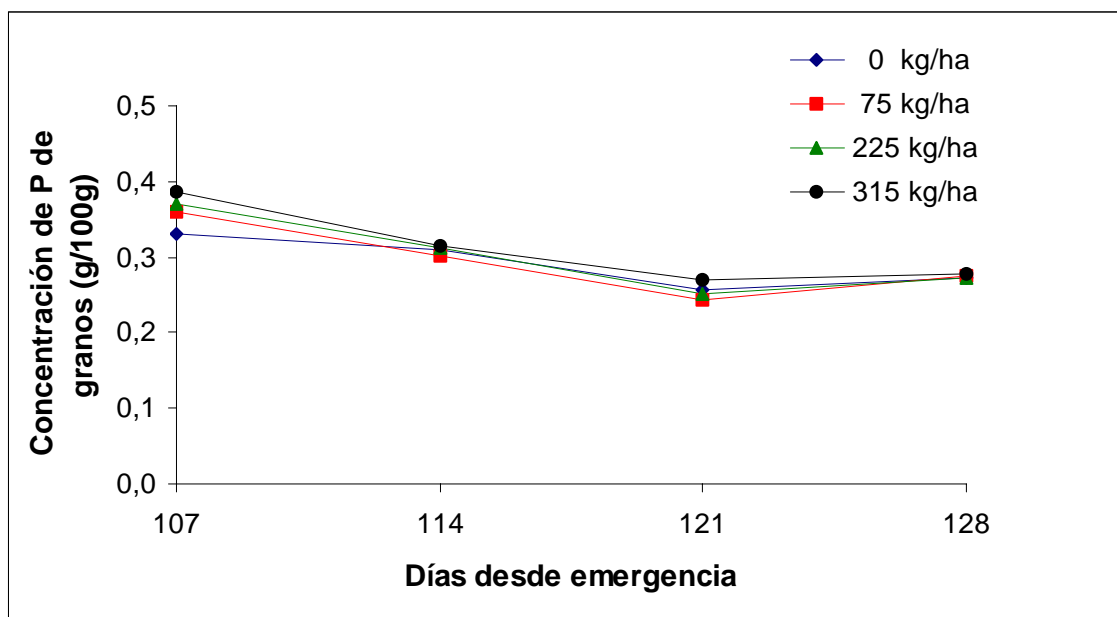
**FIGURA 14** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la concentración de fósforo en las espigas del cultivo de trigo.

Al momento de cosecha el tratamiento subóptimo fue el que presentó la menor concentración de P en espigas (0,065%), mientras que el tratamiento de mayor fertilización fosforada fue el que presentó la mayor concentración de P (0,076%).

4.1.2.4 Concentración de fósforo de los granos. En general, la concentración de P en los granos de trigo presentó una disminución desde inicio de muestreo hasta los 121 desde emergencia, aumentando en la última semana de desarrollo del cultivo (Figura 15). Un comportamiento similar en las concentraciones de P en granos, fue reportado por DASSE (2005), quien determinó una disminución de las concentraciones de P en granos, hasta los 135 días desde emergencia, aumentando la concentración de P en los granos durante la última semana de desarrollo del cultivo.

Existieron diferencias significativas de las concentraciones de P en la primera semana de muestreo de granos, entre el tratamiento sin fertilización fosforada y el tratamiento con mayor aplicación de P, quedando los tratamientos subóptimo y óptimo en una situación intermedia. Sin embargo, después de los 107 días desde emergencia no se presentaron mayores diferencias, entre los distintos tratamientos (Cuadro 7)

Al comparar las concentraciones finales de P de todos los órganos estudiados, para los distintos tratamientos, se determinó que los granos fueron los que presentaron en promedio la mayor concentración de fósforo. Estos fueron seguidos por la concentración de P en las hojas, en los tallos y por último, en las espigas. Las concentraciones de P en grano de los distintos tratamientos fueron en promedio 2,6 a 3,9 veces mayores al resto de los órganos (hojas, tallos y espigas). La concentración final de fósforo en los granos de los distintos tratamientos fue en promedio de 0,27%. Estos valores fueron similares a los descritos por DASSE (2005), quien determinó concentraciones de P en granos al final de cosecha entre 0,24 y 0,26%.

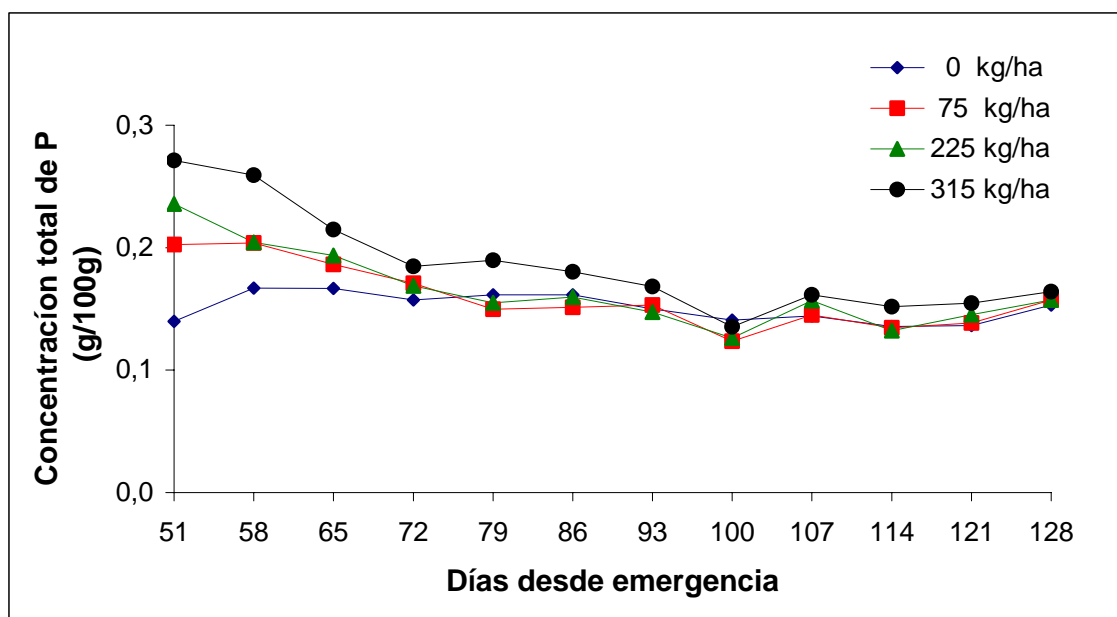


**FIGURA 15 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la concentración de fósforo en granos del cultivo de trigo.**

4.1.2.5 Concentración de fósforo del total aéreo de la planta. En general, la concentración total de P en la planta fue disminuyendo, hasta el día 100 desde emergencia en todos los tratamientos con fertilización fosforada, para luego mantenerse relativamente constante hasta cosecha (Figura 16). Existieron ciertas variaciones a este comportamiento general de acuerdo a los tratamientos. El tratamiento sin adición de P, fue el que presentó la menor variación en la concentración de P. Se observó un aumento de la concentración P en la planta sólo durante la primera semana de muestreo, manteniendo luego hasta cosecha, un valor relativamente constante de la concentración de P total de la planta. Este menor valor de concentración fue similar al resto de los tratamientos a partir de la floración, en donde todos los tratamientos tienden a ser similares en al concentración de P.

La disminución general de la concentración de P en el tiempo, también fue observada en el estudio realizado por ELLIOTT *et al.* (1997 a, b, c) quienes lo atribuyeron a un efecto de dilución del elemento debido a un aumento de la biomasa aérea del cultivo. Las mayores diferencias entre tratamientos se presentaron durante

las primeras tres semanas de muestreos (hasta los 72 días desde emergencia), presentándose menores diferencias entre tratamientos durante las siguientes semanas de desarrollo del cultivo. Las concentraciones P se ordenaron en relación al nivel de fertilización fosforada, donde el tratamiento de mayor fertilización fue el que presentó las mayores concentraciones de P en la biomasa aérea del cultivo, durante todo el desarrollo del cultivo. Por su parte, DASSE (2005) también observó mayores diferencias al inicio de los muestreos. Sin embargo, las concentraciones de P, luego de la primera semana de colecta, presentaron un aumento en todos los tratamientos, hasta los 93 días desde emergencia (floración), para finalmente disminuir hacia cosecha (DASSE, 2005).



**FIGURA 16 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la concentración de fósforo total estimada para la biomasa aérea del trigo.**

Las concentraciones de P presentada en los tratamientos al momento de floración variaron entre 0,15 y 0,18%, presentándose la menor concentración en el tratamiento subóptimo y la mayor concentración en el tratamiento supraóptimo. A diferencia de lo descrito por DASSE (2005), quien determinó concentraciones más

altas en floración. Según DASSE (2005), las concentraciones de P variaron desde 0,23 a 0,27%, presentándose la mayor concentración de P en el tratamiento supraóptimo, mientras que la menor concentración de P en floración, fue determinada en el tratamiento óptimo.

Las diferencias entre las concentraciones iniciales y las concentraciones finales de P en la parte aérea de la planta variaron en valores absolutos entre 0,01 a 0,11% de delta de la concentración de P. El tratamiento sin fertilización fosforada presentó un aumento en la concentración de P (delta de P de 0,01%), a diferencia del tratamiento con mayor fertilización fosforada, el cual presentó un delta de P de 0,11% en la concentración de P del total aéreo de la planta, entre el primer muestreo y el muestreo realizado al momento de cosecha.

**CUADRO 7 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la concentración de P en los distintos órganos y el total aéreo del cultivo de trigo.**

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia							
		51		58		65		72	
Hojas	0	0,14 ± 0,009	a	0,15 ± 0,012	a	0,12 ± 0,005	a	0,15 ± 0,016	a
	75	0,20 ± 0,019	b	0,18 ± 0,002	ab	0,15 ± 0,004	b	0,17 ± 0,009	a
	225	0,24 ± 0,003	bc	0,20 ± 0,014	b	0,18 ± 0,010	c	0,18 ± 0,012	ab
	315	0,27 ± 0,028	c	0,26 ± 0,029	c	0,20 ± 0,013	c	0,20 ± 0,005	b
Tallos	0			0,21 ± 0,023	a	0,24 ± 0,017	a	0,17 ± 0,013	a
	75			0,24 ± 0,015	a	0,23 ± 0,008	a	0,17 ± 0,003	a
	225			0,21 ± 0,018	a	0,21 ± 0,017	a	0,16 ± 0,014	a
	315			0,25 ± 0,033	a	0,23 ± 0,017	a	0,17 ± 0,017	a
Espigas	0								
	75								
	225								
	315								
Granos	0								
	75								
	225								
	315								
Total	0	0,14 ± 0,009	a	0,17 ± 0,011	a	0,17 ± 0,009	a	0,16 ± 0,008	a
	75	0,20 ± 0,019	b	0,20 ± 0,006	a	0,19 ± 0,006	b	0,17 ± 0,003	ab
	225	0,24 ± 0,003	bc	0,20 ± 0,007	a	0,19 ± 0,005	b	0,17 ± 0,010	ab
	315	0,27 ± 0,028	c	0,26 ± 0,027	b	0,22 ± 0,005	c	0,19 ± 0,006	b

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

Continuación Cuadro 7

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia							
		79		86		93		100	
Hojas	0	0,15 ± 0,016	a	0,15 ± 0,019	a	0,15 ± 0,010	a	0,14 ± 0,008	a
	75	0,14 ± 0,011	a	0,16 ± 0,010	a	0,17 ± 0,002	ab	0,14 ± 0,009	a
	225	0,15 ± 0,001	a	0,18 ± 0,009	a	0,16 ± 0,011	ab	0,14 ± 0,001	a
	315	0,19 ± 0,005	b	0,22 ± 0,010	b	0,18 ± 0,014	b	0,14 ± 0,008	a
Tallos	0	0,17 ± 0,019	a	0,15 ± 0,008	b	0,11 ± 0,007	ab	0,12 ± 0,006	a
	75	0,17 ± 0,003	a	0,12 ± 0,009	a	0,11 ± 0,006	ab	0,10 ± 0,007	a
	225	0,16 ± 0,005	a	0,12 ± 0,001	a	0,10 ± 0,006	a	0,17 ± 0,010	a
	315	0,18 ± 0,008	a	0,13 ± 0,015	ab	0,13 ± 0,010	b	0,18 ± 0,004	a
Espigas	0			0,35 ± 0,018	a	0,24 ± 0,004	a	0,23 ± 0,013	ab
	75			0,28 ± 0,012	b	0,27 ± 0,015	ab	0,21 ± 0,011	a
	225			0,29 ± 0,017	b	0,28 ± 0,009	b	0,22 ± 0,018	ab
	315			0,30 ± 0,017	b	0,29 ± 0,013	b	0,26 ± 0,022	b
Granos	0								
	75								
	225								
	315								
Total	0	0,16 ± 0,016	a	0,16 ± 0,015	a	0,15 ± 0,008	a	0,14 ± 0,008	b
	75	0,15 ± 0,008	a	0,15 ± 0,006	ab	0,15 ± 0,006	a	0,12 ± 0,002	a
	225	0,16 ± 0,001	a	0,16 ± 0,006	ab	0,15 ± 0,007	a	0,13 ± 0,007	ab
	315	0,19 ± 0,005	b	0,18 ± 0,012	b	0,17 ± 0,011	a	0,14 ± 0,006	ab

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



Continuación Cuadro 7

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia							
		107		114		121		128	
Hojas	0	0,15 ± 0,020	a	0,13 ± 0,014	a	0,11 ± 0,007	a	0,10 ± 0,005	a
	75	0,16 ± 0,010	a	0,12 ± 0,017	a	0,12 ± 0,006	ab	0,10 ± 0,010	ab
	225	0,17 ± 0,009	a	0,12 ± 0,008	a	0,13 ± 0,005	b	0,11 ± 0,006	ab
	315	0,18 ± 0,003	a	0,13 ± 0,009	a	0,13 ± 0,005	b	0,12 ± 0,003	b
Tallos	0	0,10 ± 0,017	a	0,08 ± 0,009	a	0,08 ± 0,003	a	0,08 ± 0,005	a
	75	0,09 ± 0,006	a	0,09 ± 0,005	ab	0,08 ± 0,003	a	0,08 ± 0,002	a
	225	0,09 ± 0,007	a	0,10 ± 0,006	ab	0,09 ± 0,003	a	0,08 ± 0,005	a
	315	0,11 ± 0,009	a	0,11 ± 0,011	b	0,10 ± 0,008	a	0,09 ± 0,009	a
Espigas	0	0,14 ± 0,008	a	0,10 ± 0,003	ab	0,09 ± 0,007	a	0,07 ± 0,003	a
	75	0,12 ± 0,004	ab	0,09 ± 0,004	a	0,09 ± 0,005	ab	0,06 ± 0,007	a
	225	0,13 ± 0,001	ab	0,09 ± 0,003	a	0,10 ± 0,005	ab	0,07 ± 0,003	a
	315	0,13 ± 0,006	b	0,11 ± 0,011	b	0,11 ± 0,009	b	0,08 ± 0,006	a
Granos	0	0,33 ± 0,022	a	0,31 ± 0,021	a	0,26 ± 0,013	a	0,27 ± 0,034	a
	75	0,36 ± 0,021	ab	0,30 ± 0,011	a	0,24 ± 0,009	a	0,27 ± 0,008	a
	225	0,37 ± 0,016	ab	0,31 ± 0,021	a	0,25 ± 0,010	a	0,27 ± 0,017	a
	315	0,39 ± 0,012	b	0,31 ± 0,003	a	0,27 ± 0,039	a	0,28 ± 0,017	a
Total	0	0,14 ± 0,017	a	0,14 ± 0,010	ab	0,14 ± 0,005	a	0,15 ± 0,011	a
	75	0,15 ± 0,007	a	0,14 ± 0,003	ab	0,14 ± 0,004	a	0,16 ± 0,007	a
	225	0,16 ± 0,006	a	0,13 ± 0,006	a	0,15 ± 0,003	ab	0,16 ± 0,008	a
	315	0,11 ± 0,005	a	0,15 ± 0,007	b	0,15 ± 0,008	b	0,16 ± 0,008	a

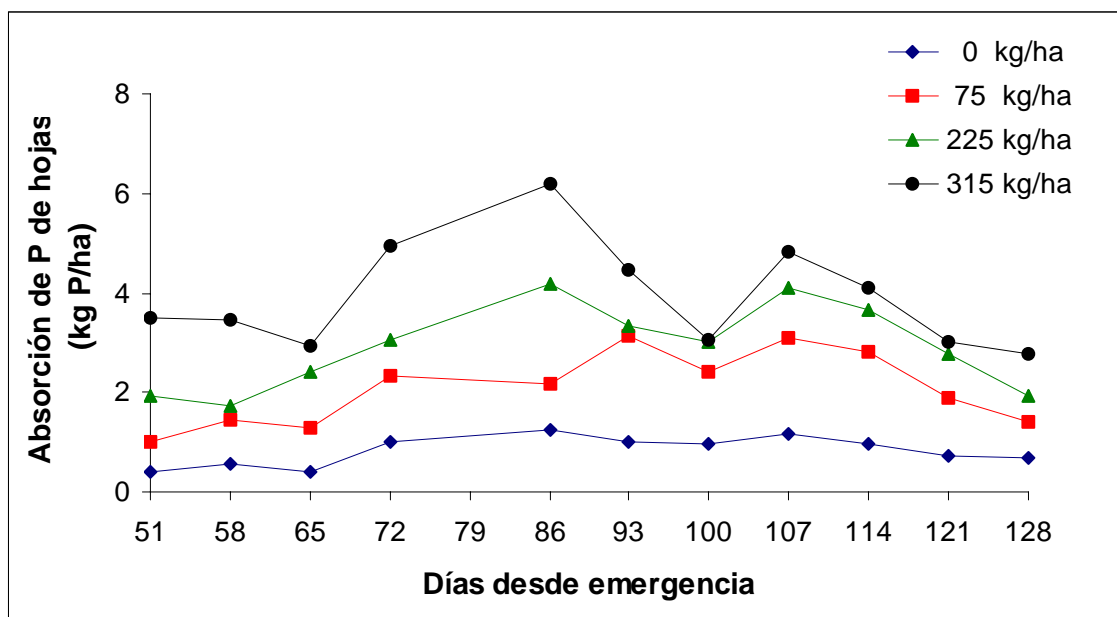
Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p<0,05; Tukey)

## 4.2 Variables derivadas.

Estas variables corresponden aquellas que se derivan a partir de los parámetros de medición directa. En este trabajo corresponden a la absorción de P, contribución de los órganos en la materia seca total producidas, la tasa de crecimiento, la tasa de absorción de P, translocación de P, tratamiento óptimo de fertilización fosforada, parámetros de demanda de fósforo (índice de cosecha, requerimiento interno, índice de extracción de P y factor de demanda de P), eficiencia de recuperación de P y eficiencia de uso de fósforo por el cultivo de trigo.

**4.2.1 Absorción acumulada de fósforo.** La absorción de P en la planta de trigo se calculó para cada órgano, a través de la materia seca acumulada y la concentración de P determinada en cada muestreo. Se determinó la absorción de P por órgano y la suma de ellos, representó el contenido total de P en la parte aérea del cultivo de trigo.

4.2.1.1 Absorción acumulada de fósforo en las hojas. En general, la absorción de fósforo en las hojas aumentó alcanzando un máximo entre los 86 y 93 días desde emergencia (alrededor de floración) y decae hacia la madurez fisiológica del cultivo (Figura 17). La absorción de P en las hojas se ordenó de acuerdo a los tratamientos, teniendo la mayor absorción en el tratamiento de mayor aplicación de P y la menor en el tratamiento sin absorción de P. Estos resultados, son similares a lo determinado por DASSE (2005), quien detectó un máximo de absorción de P en hojas para todos los tratamientos al momento de floración (día 93 desde emergencia), seguido por una disminución de la absorción de P en hojas hasta final de cultivo.



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

Durante todo el desarrollo del cultivo el tratamiento supraóptimo presentó diferencias significativas de la absorción de P con el tratamiento sin aplicación de P. A su vez, la absorción de P presentada en el tratamiento supraóptimo, fue estadísticamente distinta al tratamiento óptimo, hasta los 86 días desde emergencia (momento de floración). Durante las siguientes semanas de desarrollo, los tratamientos óptimo y supraóptimo no presentaron mayores diferencias en la absorción de P. Por su parte, el tratamiento subóptimo, en la mayor parte de desarrollo del cultivo, presentó una situación intermedia en la absorción de P entre el tratamiento sin fertilización fosforada y los tratamientos con mayor adición de fósforo (Cuadro 8).

El contenido P presente en las hojas durante la primera semana de muestreo varió desde 0,4 a 3,5 kg P/ha. El tratamiento sin adición de P fue el que presentó el menor contenido de P, mientras que el tratamiento supraóptimo en la primera semana de muestreo, fue el que presentó el nivel de P más alto en hojas. En los tratamientos subóptimo y óptimo de fertilización se determinaron contenidos de P de 1,0 y 1,9 kg P/ha, en la primera colecta realizada.

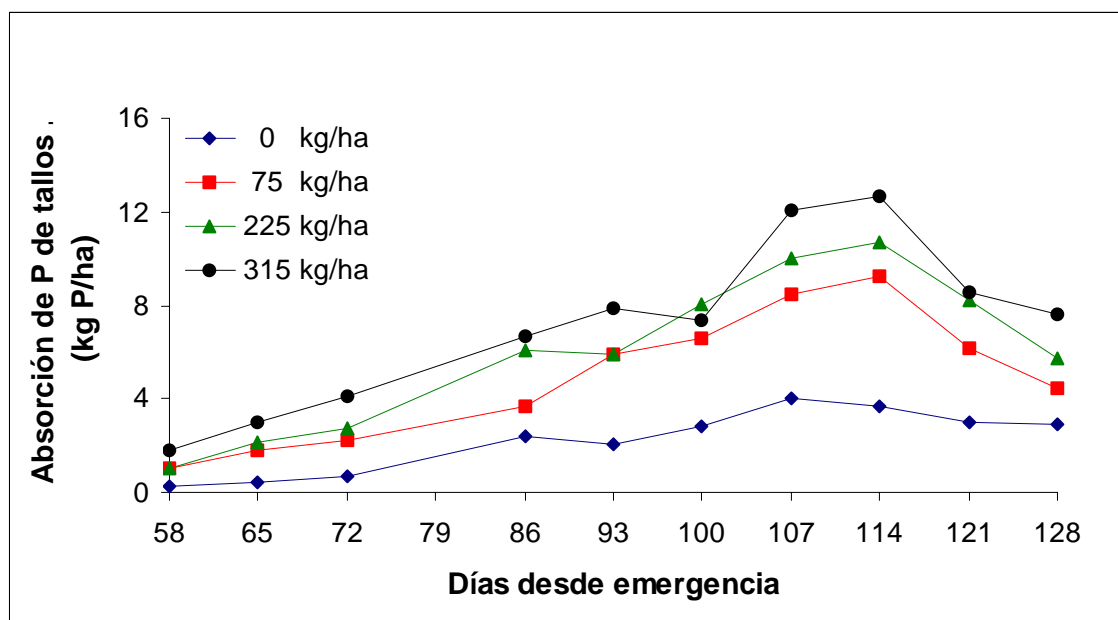
La máxima absorción de P de las hojas presentado en los distintos tratamientos, varió desde 1,2 a 6,2 kg P/ha. El tratamiento sin adición de P fue el que presentó la absorción máxima más bajo de P en hojas, mientras que el tratamiento supraóptimo fue el que presentó la máxima más alta de P en hojas. Por su parte, el tratamiento óptimo presentó un contenido máximo de P en hojas de 4,2 kg P/ha, siendo este 1,4 veces mayor al contenido máximo de P determinado en el tratamiento subóptimo (3,1 kg P/ha). Máximos más altos de P en hojas fueron determinados por DASSE (2005), cuyos niveles variaron desde 5,8 a 11,3 kg P/ha. El tratamiento sin adición de P, fue el que presentó el máximo más bajo de P en hojas, mientras que el tratamiento supraóptimo fue el que presentó el máximo más alto de P en hojas (DASSE, 2005). En el presente estudio, el tratamiento supraóptimo presentó un máximo de absorción de P, 5 veces mayor que el máximo presentado en el tratamiento sin adición de P. A diferencia de lo determinados por DASSE (2005), donde el máximo contenido de P en hojas presentado en el tratamiento supraóptimo, fue 1,9 veces mayor al máximo contenido de P en hojas, presentado en el tratamiento sin fertilización fosforada.

Los contenidos más altos de P presentados en hojas de los distintos tratamientos, disminuyeron hasta cosecha entre un 46,3 y un 55,3%. La menor disminución de P en las hojas, se determinó en el tratamiento subóptimo, cuya absorción final de P fue de 0,7 kg P/ha. Mientras que el tratamiento supraóptimo fue quien presentó la mayor disminución del contenido de P en las hojas, alcanzando un nivel final de 2,8 kg P/ha. Por su parte, los tratamientos subóptimo y óptimo presentaron contenidos de P en hojas de 1,4 y 1,9 kg P/ha, al momento de cosecha.

4.2.1.2 Absorción acumulada de fósforo en los tallos. En la Figura 18 se muestra la absorción de P en tallos. Al inicio la absorción de P en los tallos es lenta, aumentando durante las siguientes semanas de desarrollo, hasta llegar a un máximo de absorción entre los 107 y los 114 días desde emergencia. Luego de alcanzar un máximo, la absorción de P en tallos de los distintos tratamientos, disminuye hasta cosecha. Este comportamiento también fue descrito por DASSE (2005), quien determinó una baja absorción de P en tallos al inicio de los muestreos, y un máximo de absorción un mes antes del término de cultivo.

El tratamiento supraóptimo presentó diferencias significativas en la absorción de P de tallos con el tratamiento sin adición de P, durante todo el desarrollo del cultivo. Por su parte, los tratamientos subóptimo y óptimo no presentaron mayores diferencia en la absorción de fósforo de tallos, siendo esta significativamente distinta a la absorción presentada en el tratamiento supraóptimo al inicio y durante la última semana de desarrollo de cultivo. A su vez, los tratamientos subóptimo y óptimo presentaron diferencias estadísticas con el tratamiento sin fertilización fosforada, hasta los 121 días desde emergencia (Cuadro 8).

Durante la primera semana de muestreo de tallos, la absorción de P varió desde 0,3 a 1,8 kg P/ha. El tratamiento sin fertilización con fósforo fue el que presentó la menor absorción, mientras que el tratamiento supraóptimo fue el que presentó el nivel más alto de P en tallos, al inicio de muestreo. Por su parte, los tratamientos óptimo y subóptimo presentaron una absorción de 1 kg P/ha, en la primera colecta de tallos.



**FIGURA 18** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en tallos de trigo.

Los máximos contenido de P en tallos variaron entre los 3,7 kg P/ha determinados en el tratamiento sin fertilización fosforada y los 12,6 kg P/ha determinados en el tratamiento con mayor adición de P. Por su parte, el tratamiento óptimo presentó un máximo de 10,6 kg P/ha, mientras que en el tratamiento subóptimo se determinó una absorción máxima de P, levemente inferior al tratamiento óptimo (9,27 kg P/ha). Diferencias más ajustadas de los contenidos más altos de P de tallos, fueron determinadas por DASSE (2005), donde nivel más alto de P de tallos (10,85 kg P/ha, tratamiento óptimo), fue 1,5 veces mayor al máximo más bajo de P de tallos presentado en el tratamiento sin aplicación de P (7,27 kg P/ha). A diferencia de este estudio, donde el contenido máximo más alto de P de tallos (supraóptimo), fue 3,4 veces mayor al contenido máximo más bajo de P, presentado en el tratamiento sin fertilización fosforada.

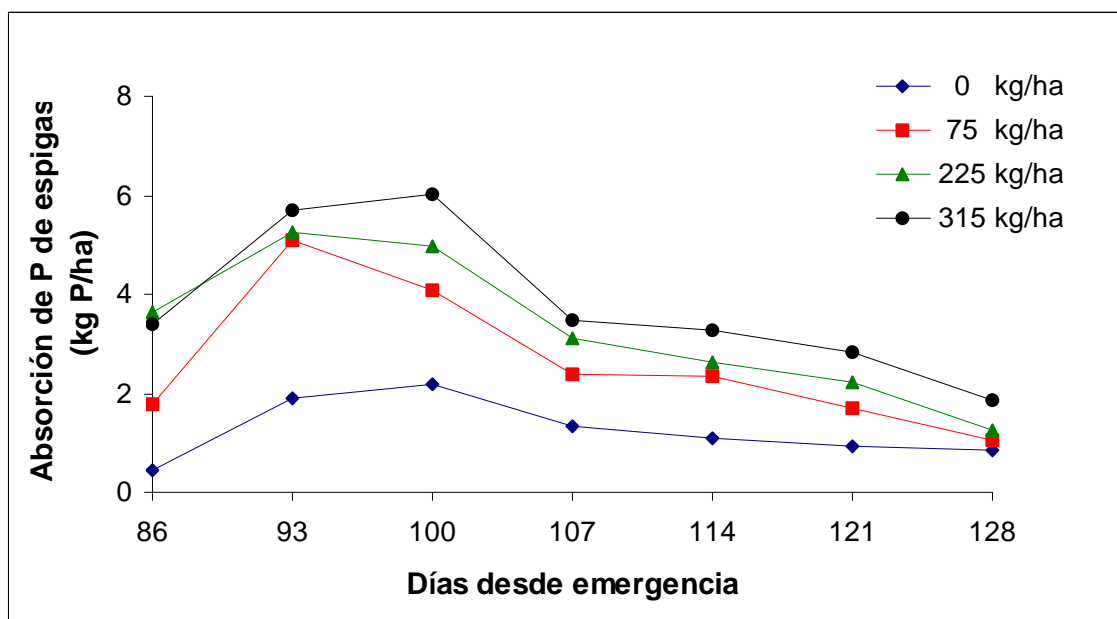
Las mayores diferencias de los contenidos máximos de P en tallos entre estudios, se presentaron en los tratamientos sin fertilización fosforada. La absorción de fósforo determinada por DASSE (2005), como máxima (7,3 kg P/ha) en el tratamiento sin adición de P, fue prácticamente el doble que la máxima absorción de P determinada en el tratamiento sin fertilización fosforada (3,7 kg P/ha), del presente estudio.

Si comparamos los máximos contenidos de P observados en tallos con los máximos contenidos de P observados en las hojas podemos ver que, los contenidos máximos de P presentados en tallos son de dos a tres veces mayores que los máximos contenidos de P presentados en las hojas. Las mayores diferencias del máximo contenido de P entre tallos y hojas, fue determinado en el tratamiento sin fertilización fosforada. A diferencia del tratamiento con mayor aplicación de P, quien presentó la menor diferencia de los máximos contenidos de P entre tallos y hojas.

Los máximos contenidos de P en los tallos de los distintos tratamientos, disminuyeron hasta cosecha, desde un 28 a un 52 %. La mayor disminución de P se presentó en el tratamiento subóptimo, mientras que la menor disminución del contenido de P en tallos, en relación a su máximo presentado, fue determinado en el tratamiento sin fertilización con P. Los contenidos de P en los tallos variaron entre 2,9 y 7,6 kg

P/ha. El nivel más alto de P en tallos fue presentado por el tratamiento supraóptimo, mientras que el tratamiento sin adición de P fue el que presentó el nivel más bajo de fósforo de tallos, al momento de cosecha. Los tratamientos subóptimo y óptimo presentaron contenidos finales de P de 4,4 y 5,7 kg P/ha.

4.2.1.3 Absorción acumulada de fósforo en las espigas. En general, las espigas presentaron un aumento en la absorción de fósforo, alcanzando un máximo entre los 93 y los 100 días desde emergencia, para luego disminuir su contenido, hasta final de cosecha (Figura 19). Este comportamiento de la absorción de P por parte de las espigas, también fue descrito por DASSE (2005), quien determinó un aumento en la absorción de P durante las primeras semanas de muestreo de espigas, llegando a un máximo a los 114 días desde emergencia, para luego disminuir el contenido de P en espigas, hasta final de cosecha.



**FIGURA 19 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en espigas de trigo.**

Durante todo el desarrollo del cultivo el tratamiento supraóptimo y el tratamiento sin fertilización fosforada, presentaron diferencias significativas en la absorción de P de espigas. Por su parte, los tratamientos con fertilización fosforada, presentaron

contenidos de P sin diferencias estadísticas, hasta los 121 desde emergencia. Durante la última semana de muestreo, el tratamiento subóptimo presentó diferencias significativas en la absorción de P con el tratamiento supraóptimo (Cuadro 8).

Al inicio de los muestreos de espigas la absorción de P varió de 0,5 a 3,7 kg P/ha. El mayor contenido de fósforo fue determinado en el tratamiento de fertilización fosforada óptima, mientras que el menor contenido fue presentado por el tratamiento sin fertilización fosforada. El contenido de P determinado en el tratamiento de mayor fertilización fosforada fue de 3,4 kg P/ha, levemente inferior al presentado por el tratamiento de fertilización óptima. La absorción determinada al inicio en el tratamiento subóptimo fue de 1,8 kg P/ha, encontrándose en una situación intermedia entre el tratamiento sin adición de P y los tratamientos con mayor fertilización fosforada.

Los máximos contenidos de P presentados en espigas variaron de 2,2 y 6,0 kg P/ha. El tratamiento supraóptimo fue quien presentó el máximo más alto de P en espigas, mientras que el tratamiento sin fertilización fosforada presentó el contenido máximo más bajo de P en espigas. Los contenidos más altos de P en espigas determinados en el tratamiento subóptimo y el tratamiento óptimo fueron de 4,1 y 5,0 kg P/ha. Valores más altos de P en espigas, fueron determinados por DASSE (2005), donde el tratamiento que presentó el máximo más bajo de P en espigas (tratamiento sin fertilización fosforada), fue superior al máximo más alto determinado en el tratamiento supraóptimo, del presente estudio. A su vez, el contenido máximo de P en espigas del tratamiento sin aplicación de P, determinado por DASSE (2005), fue tres veces superior al contenido de P determinado como máximo en espigas del tratamiento sin fertilización fosforada, en el presente estudio.

Luego de alcanzar un máximo, los niveles de P en espigas disminuyeron hasta cosecha entre un 60 y 79%. La menor disminución del contenido de P en espigas fue determinado en el tratamiento sin fertilización, mientras que la mayor disminución hasta cosecha se presentó en el tratamiento subóptimo (75 kg  $P_2O_5$ /ha). Los niveles de P en espigas al momento de cosecha variaron de 0,9 a 1,9 kg P/ha, ordenándose en relación al nivel de fertilización de P al suelo.

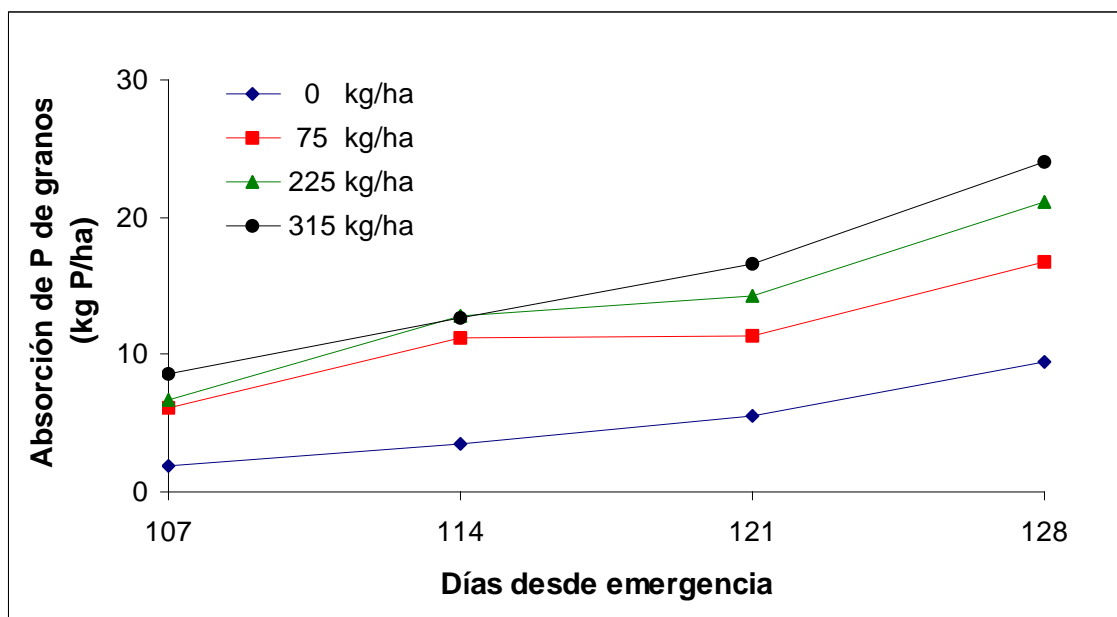


4.2.1.4 Absorción acumulada de fósforo en los granos. El contenido de P en los granos de los distintos tratamientos, presentó un aumento desde inicio de colecta (día 107 desde emergencia) hasta final de cosecha (Figura 20).

Durante todo el periodo de desarrollo de los granos, existieron diferencias significativas de los contenidos de P entre el tratamiento sin aplicación de P y los tratamientos con fertilización fosforada. Por su parte, el tratamiento óptimo no presentó mayores diferencias en el contenido de P de granos con el tratamiento supraóptimo, mientras que el tratamiento subóptimo durante las últimas dos semanas de desarrollo, presentó una situación intermedia en la absorción de P entre el tratamiento sin aplicación de P y los tratamientos con mayor fertilización fosforada (Cuadro 8).

El P presente en los granos al momento de cosecha vario entre 9,4 y 24,0 kg P/ha. La mayor absorción de P hasta cosecha se presentó en el tratamiento con mayor fertilización fosforada, mientras que la menor absorción de P se determinó en el tratamiento sin adición de P. A su vez, el tratamiento de óptimo fertilización presentó una absorción de P en cosecha de 21,2 kg P/ha. En cambio, el tratamiento de menor aplicación de P no superó los 16, 7 kg P/ha. Una mayor extracción de P en granos del cultivo sin fertilización fosforada, fue descrito por DASSE (2005), cuyo contenido final P llego a los 17,7 kg P/ha, siendo 1,9 veces mayor al contenido de P determinado en los granos del tratamiento sin aplicación de P, del presente estudio.

Las diferencias entre el contenido de P en granos presentadas al momento de cosecha y la presentada al inicio de los muestreos, varió en los distintos tratamientos entre 7,5 y 15,4 kg P/ha. El mayor incremento del contenido de P en granos desde inicio de colecta hasta cosecha final, fue determinado en el tratamiento supraóptimo, mientras que el tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó el menor incremento de P desde el primer muestreo de granos hasta final de cultivo.

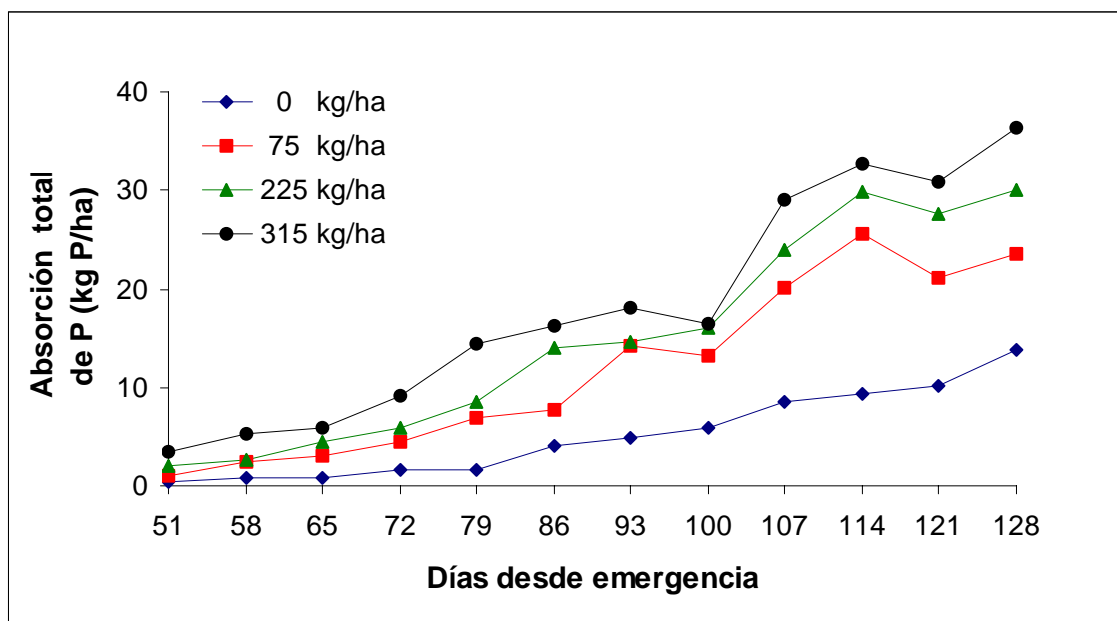


**FIGURA 20** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo en granos de trigo.

4.2.1.5 Absorción de fósforo en la biomasa aérea de la planta. El general las plantas de trigo al inicio de su desarrollo presentaron una absorción lenta, seguido luego por una absorción de P con tendencia lineal, hasta el día 114 desde emergencia. En las últimas dos semanas de desarrollo del cultivo, la absorción de P se mantiene sin mayores cambios en los tratamientos fertilizados con P. A diferencia del tratamiento sin fertilización fosforada, quien mantuvo un aumento de la absorción de P, hasta final de cosecha (Figura 21). Por su parte, DASSE (2005) determinó un comportamiento de la absorción de P similar entre el tratamiento sin adición de P y los tratamientos fertilizados con P, presentándose una absorción de P durante las últimas semanas de cultivo, sin mayores cambios.

Los contenidos de P determinados en las plantas de trigo del tratamiento supraóptimo, fueron significativamente diferentes a los contenidos de P presentado en las plantas de trigo del tratamiento sin fertilización fosforada. Por su parte, los tratamientos óptimo y supraóptimo presentaron diferencias significativas en la absorción de P, hasta los 79 días desde emergencia, no presentaron mayores

diferencias durante las siguientes semanas de desarrollo. En la mayoría de los muestreos realizados, el tratamiento subóptimo presentó una situación intermedia en la absorción de P total, entre el tratamiento sin adición de P y los tratamientos de mayor fertilización fosforada (Cuadro 8).



**FIGURA 21 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la absorción de fósforo total en la planta de trigo.**

La absorción total de P al momento de cosecha varió de 13,8 a 36,3 kg P/ha. El menor contenido de P al momento de cosecha fue determinado en el tratamiento sin fertilización fosforada, mientras que el tratamiento supraóptimo fue el que presentó el mayor contenido de P al momento de cosecha. En el tratamiento óptimo se determinó una absorción total en cosecha de 30,1 kg P/ha. A diferencia de los 23,6 kg P/ha determinados en el tratamiento subóptimo, al término de desarrollo del cultivo.

El tratamiento con mayor fertilización fosforada (supraóptimo) fue el que presentó un mayor incremento en el contenido de P desde el primer muestreo hasta cosecha final (32,8 kg P/ha), mientras que el menor incremento fue determinado en el tratamiento sin fertilización fosforada (13,4 kg P/ha).

Al momento de cosecha, el 69% del P total fue determinado en los granos, un 20% en tallos, un 6% de P se determinó en hojas y solamente un 5% del P total presente en las plantas, se determinó en las espigas (promedio entre tratamientos). Por su parte DASSE (2005), determinó una mayor participación de los granos en el contenido total de fósforo presente en la planta, siendo esta once puntos mayor (80,5 % de P en granos) que la determinada en este estudio. Sin embargo, en el presente estudio se determinó una mayor participación de las hojas y los tallos, que en el estudio realizado por DASSE (2005), quien determinó una participación de un 2,7% para las hojas y un 11% de participación de los tallos en el contenido total de P, presente en el cultivo. En el caso de las espigas, en ambos estudio se determinó una participación de un 5% del contenido total de P presente en la planta. Por último, hay que tener presente que en ambos estudio no fueron consideradas las raíces en el total. Por lo tanto, el fósforo total corresponde solamente al fósforo presente en la parte aérea de la planta.

**CUADRO 8 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la absorción de P en los distintos órganos y el total aéreo del cultivo de trigo.**

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia											
		51			58			65			72		
Hojas	0	0,41	± 0,09	a	0,55	± 0,14	a	0,40	± 0,08	a	0,99	± 0,40	a
	75	1,02	± 0,27	ab	1,46	± 0,22	a	1,29	± 0,45	a	2,33	± 0,41	b
	225	1,94	± 0,35	b	1,71	± 0,23	a	2,40	± 0,68	b	3,07	± 0,36	b
	315	3,51	± 0,55	c	3,46	± 1,22	b	2,92	± 0,19	b	4,95	± 0,32	c
Tallos	0				0,27	± 0,06	a	0,44	± 0,02	a	0,69	± 0,34	a
	75				1,03	± 0,13	ab	1,79	± 0,71	ab	2,24	± 0,38	b
	225				1,04	± 0,06	ab	2,13	± 0,34	ab	2,77	± 0,09	b
	315				1,79	± 0,63	b	2,98	± 1,12	b	4,13	± 0,75	c
Espigas	0												
	75												
	225												
	315												
Granos	0												
	75												
	225												
	315												
Total	0	0,42	± 0,09	a	0,82	± 0,21	a	0,84	± 0,11	a	1,69	± 0,73	a
	75	1,02	± 0,27	ab	2,49	± 0,35	a	3,09	± 1,16	ab	4,57	± 0,71	b
	225	1,94	± 0,35	b	2,74	± 0,20	a	4,53	± 0,75	bc	5,84	± 0,37	b
	315	3,51	± 0,55	c	5,25	± 1,79	b	5,90	± 1,30	c	9,09	± 1,07	c

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

Continuación Cuadro 8

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia											
		79			86			93			100		
Hojas	0	0,09	± 0,15	a	1,24	± 0,11	a	1,01	± 0,03	a	0,96	± 0,24	a
	75	4,49	± 0,80	b	2,19	± 0,36	a	3,11	± 0,31	ab	2,41	± 0,93	ab
	225	5,65	± 0,63	b	4,19	± 1,03	b	3,33	± 1,26	ab	3,01	± 0,19	b
	315	10,04	± 1,70	c	6,17	± 0,85	c	4,47	± 1,79	b	3,07	± 0,70	b
Tallos	0	0,84	± 0,07	a	2,40	± 0,15	a	2,06	± 0,46	a	2,86	± 0,93	a
	75	2,36	± 0,34	b	3,67	± 0,26	a	5,93	± 0,54	b	6,63	± 2,34	b
	225	2,89	± 0,25	b	6,11	± 0,68	b	5,94	± 1,30	b	8,00	± 0,04	b
	315	4,39	± 0,45	c	6,72	± 0,88	b	7,85	± 1,43	b	7,36	± 0,38	b
Espigas	0				0,46	± 0,18	a	1,89	± 0,39	a	2,17	± 0,39	a
	75				1,76	± 0,31	b	5,08	± 0,05	b	4,09	± 1,10	ab
	225				3,65	± 0,65	c	5,27	± 1,16	b	4,96	± 0,59	b
	315				3,39	± 0,32	c	5,70	± 1,34	b	6,04	± 0,81	b
Granos	0												
	75												
	225												
	315												
Total	0	1,70	± 0,13	a	4,11	± 0,38	a	4,95	± 0,85	a	5,99	± 1,55	a
	75	6,85	± 1,06	b	7,62	± 0,56	a	14,13	± 0,68	b	13,13	± 4,35	b
	225	8,55	± 0,82	b	13,95	± 2,20	b	14,55	± 3,71	b	15,97	± 0,65	b
	315	14,44	± 2,13	c	16,28	± 1,47	b	18,03	± 4,28	b	16,46	± 1,84	b

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

Continuación Cuadro 8

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia											
		107			114			121			128		
Hojas	0	1,18	± 0,40	a	0,96	± 0,19	a	0,73	± 0,11	a	0,66	± 0,09	a
	75	3,09	± 0,88	ab	2,81	± 0,41	b	1,88	± 0,46	b	1,40	± 0,45	ab
	225	4,08	± 0,63	b	3,67	± 0,64	b	2,77	± 0,50	b	1,95	± 0,20	bc
	315	4,84	± 1,86	b	4,12	± 1,01	b	3,00	± 0,54	b	2,76	± 0,42	c
Tallos	0	4,06	± 1,25	a	3,72	± 0,68	a	3,00	± 0,55	a	2,90	± 0,35	a
	75	8,49	± 2,14	ab	9,27	± 1,10	b	6,13	± 1,33	b	4,41	± 0,61	ab
	225	10,05	± 1,07	b	10,66	± 1,69	b	8,24	± 1,42	b	5,69	± 0,56	b
	315	12,06	± 3,15	b	12,64	± 3,20	b	8,59	± 0,76	b	7,62	± 0,95	c
Espigas	0	1,35	± 0,36	a	1,10	± 0,21	a	0,92	± 0,15	a	0,86	± 0,10	a
	75	2,39	± 0,47	ab	2,33	± 0,13	b	1,72	± 0,54	ab	1,05	± 0,12	a
	225	3,12	± 0,34	b	2,62	± 0,34	b	2,22	± 0,47	b	1,27	± 0,33	ab
	315	3,46	± 0,61	b	3,26	± 0,60	b	2,83	± 0,63	b	1,86	± 0,34	b
Granos	0	1,93	± 0,70	a	3,47	± 0,63	a	5,47	± 1,27	a	9,40	± 0,96	a
	75	6,07	± 1,79	b	11,22	± 0,69	b	11,39	± 2,27	b	16,71	± 4,48	ab
	225	6,67	± 0,81	b	12,79	± 1,68	b	14,31	± 1,79	bc	21,16	± 3,45	b
	315	8,64	± 1,15	b	12,63	± 1,59	b	16,55	± 1,98	c	24,02	± 6,33	b
Total	0	8,50	± 2,68	a	9,24	± 1,69	a	10,12	± 2,02	a	13,83	± 1,04	a
	75	50,05	± 5,19	ab	25,62	± 1,93	b	21,12	± 4,57	b	23,56	± 5,53	ab
	225	23,92	± 2,23	b	29,74	± 4,25	b	27,54	± 4,04	bc	30,07	± 3,71	b
	315	28,99	± 6,66	b	32,64	± 6,28	b	30,96	± 2,44	c	36,26	± 7,53	b

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.**

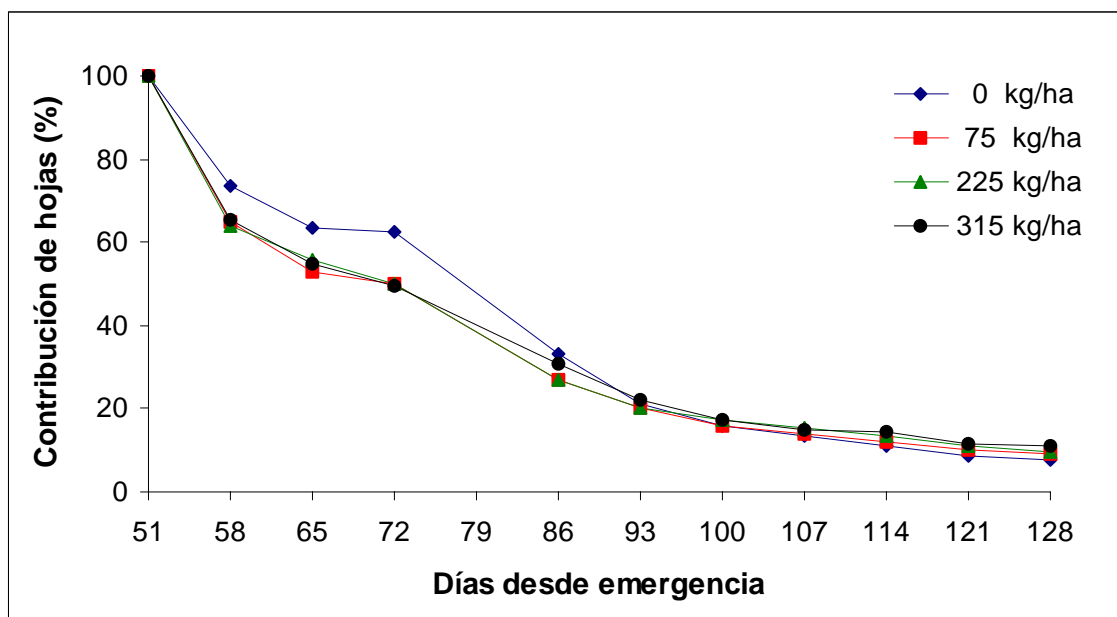
La colecta de hojas y tallos del día 79 desde emergencia no fue considerada en este capítulo, debido a que se detectó la presencia de tallos en la materia seca colectada de hojas, alterando tanto la curva de contribución de hojas como la de tallos, en el total de la planta.

4.2.2.1 Contribución porcentual de las hojas. En el primer muestreo sólo fue posible diferenciar hojas. Por lo tanto, al inicio de los muestreos la contribución de las hojas en las plantas fue considerada como un 100% del total (sin considerar las raíces). Como se muestra en las Figura 22, la participación de las hojas en el total de la planta, fue disminuyendo constantemente, hasta final de cosecha. Un comportamiento similar de las hojas en el total de la planta, fue descrito por DASSE (2005), quien determinó al inicio de muestreos, la mayor participación de las hojas en el total de la planta, y posteriormente una disminución de la contribución de hojas, hasta madurez fisiológica.

El tratamiento sin adición de P presentó diferencias significativas en la contribución de hojas con los tratamientos fertilizados con P, hasta los 72 días desde emergencia. Durante las siguientes semanas de cultivo, sólo presentaron diferencias estadísticas el tratamiento sin fertilización y los tratamientos con mayor aplicación de P, encontrándose en una situación intermedia el tratamiento subóptimo (Cuadro 9).

El tratamiento sin fertilización fosforada fue quien presentó la mayor contribución de hojas en la materia seca total, durante las primeras 5 semanas de muestreos (una semana después de floración). Este comportamiento también fue descrito por DASSE (2005), presentando el tratamiento sin aplicación de P la mayor contribución de hojas en el total de la planta, durante las primeras semanas de muestreo. Según ELLIOTT et al. (1997a), las plantas de trigo bajo estrés de P, presentan una mayor contribución de hojas en la materia seca total, siendo este comportamiento un mecanismo adaptativo por parte de la planta para mantener una adecuada eficiencia fotosintética.





**FIGURA 22 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de las hojas en el total de la materia seca producida.**

En los tratamientos con fertilización fosforada las hojas presentaron dominancia en la contribución de la materia seca total, hasta el día 72 desde emergencia. A diferencia del tratamiento sin fertilización fosforada, quien mantuvo una dominancia de hojas en la materia seca total, una semana más tarde que los tratamientos fertilizados con P.

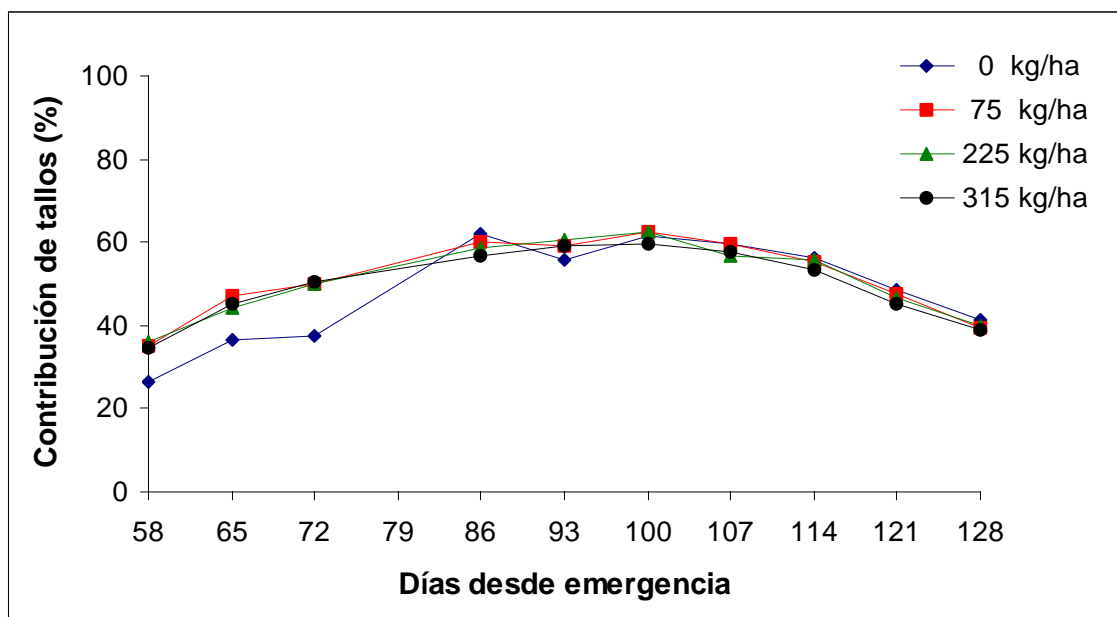
La contribución de las hojas en cosecha varió de un 7,6 a un 10,9 % en el total de los tratamientos. El tratamiento de mayor fertilización fosforada fue el que presentó la mayor contribución de hojas en la materia seca total al momento de cosecha, mientras que el tratamiento sin aplicación de P fue quien presentó la menor contribución. Las contribuciones de hojas presentadas por los tratamientos subóptimo y óptimo al momento de cosecha, fueron de 9,0 y 9,7%.

4.2.2.2 Contribución porcentual de los tallos. La contribución de los tallos al inicio de los muestreos es baja, la cual aumenta hasta alcanzar un máximo a los 100 días desde

emergencia (dos semanas después de floración). Luego de alcanzar un máximo, la contribución de los tallos en el total de la planta, disminuye hasta final de cosecha (Figura 23). Por su parte, DASSE (2005) determinó un máximo de contribución de tallos, una semana antes de floración, disminuyendo luego la participación de los tallos en la materia seca total, hasta término de cultivo.

En las primeras tres semanas de muestreos, el tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó la menor contribución de tallos en el total de la planta, siendo esta estadísticamente distinta a los tratamientos con fertilización fosforada. Sin embargo, el tratamiento supraóptimo fue el que presentó la menor contribución de tallos, en los muestreos realizados posteriormente. La contribución presentada en el tratamiento supraóptimo fue estadísticamente distinta a la contribución presentada en el tratamiento sin adición de P, hasta los 121 días desde emergencia. Al momento de cosecha, los tratamientos presentaron contribuciones de tallos sin mayores diferencias (Cuadro 9).

Al inicio de muestreos la contribución de los tallos en la materia seca total varió de 26,5 a 36,0% entre los distintos tratamientos. El tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó una menor contribución de tallos en la primera colecta. A diferencia del tratamiento con una fertilización fosforada óptima (225 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha), quien presentó la mayor contribución de tallos en la materia seca total al inicio de los muestreos. En el tratamiento subóptimo se determinó una contribución inicial de 35,3%, mientras que la contribución presentada al inicio en el tratamiento supraóptimo fue de 34,7%.



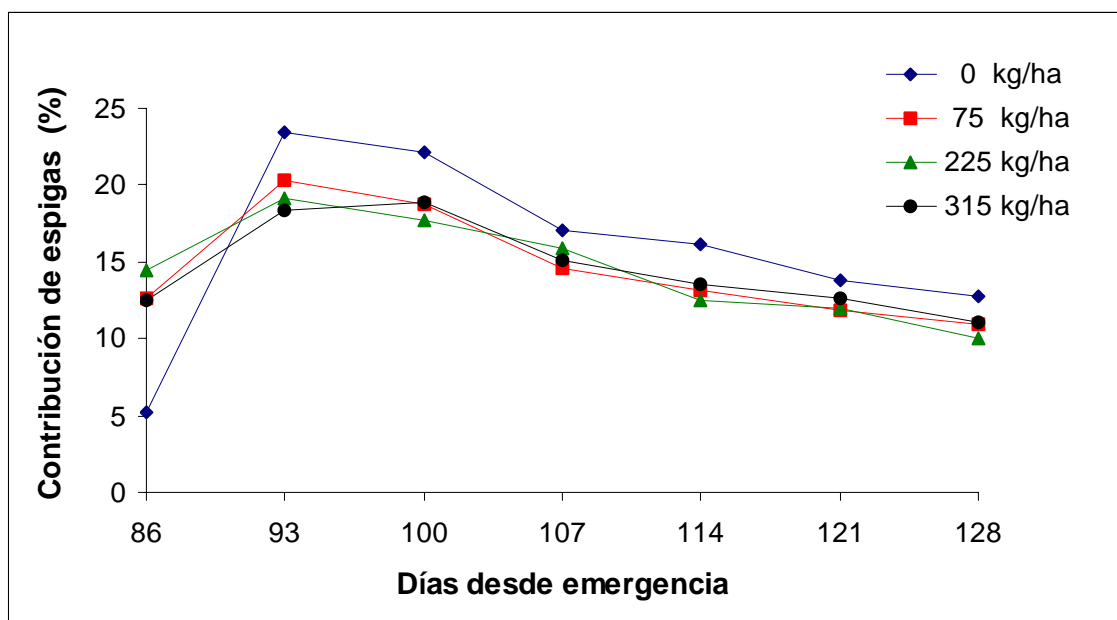
**FIGURA 23 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de tallos en el total de la materia seca producida.**

La contribución de los tallos al momento de cosecha varió entre 39,0 y 41,5%, en los distintos tratamientos. El tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó una mayor participación de los tallos en la materia seca total, mientras que la menor participación de los tallos en la materia seca total fue determinada en el cultivo del tratamiento de mayor aplicación de P. A diferencia de lo determinado por DASSE (2005), donde la menor contribución de tallos se presentó en el tratamiento sin adición de P, mientras que el tratamiento óptimo fue el que presentó la mayor contribución de tallos en el total de la planta, al momento de cosecha.

Al comparar las contribuciones de las hojas y los tallos, durante todo el desarrollo del cultivo podemos decir que, al inicio de los muestreos las hojas fueron las de mayor contribución en la materia seca total (cerca al 100%). Luego la contribución de las hojas disminuye, a diferencia de los tallos, quienes aumentan su participación en la materia seca total. A los 72 días desde emergencia existió un

equilibrio de contribución entre tallos y hojas, para más tarde ser los tallos los de mayor contribución en la materia seca total de la planta.

4.2.2.3 Contribución porcentual de las espigas. En general la contribución porcentual de las espigas en la materia seca total aumenta, hasta alcanzar un máximo entre los 93 y los 100 días desde emergencia, para luego disminuir hasta cosecha (Figura 24). Los tratamientos con fertilización fosforada presentaron en el primer muestreo una mayor participación de espigas, que el tratamiento sin aplicación de P. Durante las siguientes semanas de desarrollo, la mayor participación de espigas se presentó en el cultivo sin fertilización fosforada. Por su parte DASSE (2005), describió al tratamiento supraóptimo como el de menor contribución de espigas, durante todo el desarrollo del cultivo. Según DASSE (2005), el tratamiento subóptimo fue quien presentó durante las primeras semanas de muestreos, la mayor contribución de espigas, mientras que en las últimas dos semanas de cultivo, el tratamiento sin adición de P fue el que presentó la mayor contribución de espigas en el total de la planta.



**FIGURA 24** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de espigas en el total de la materia seca producida.

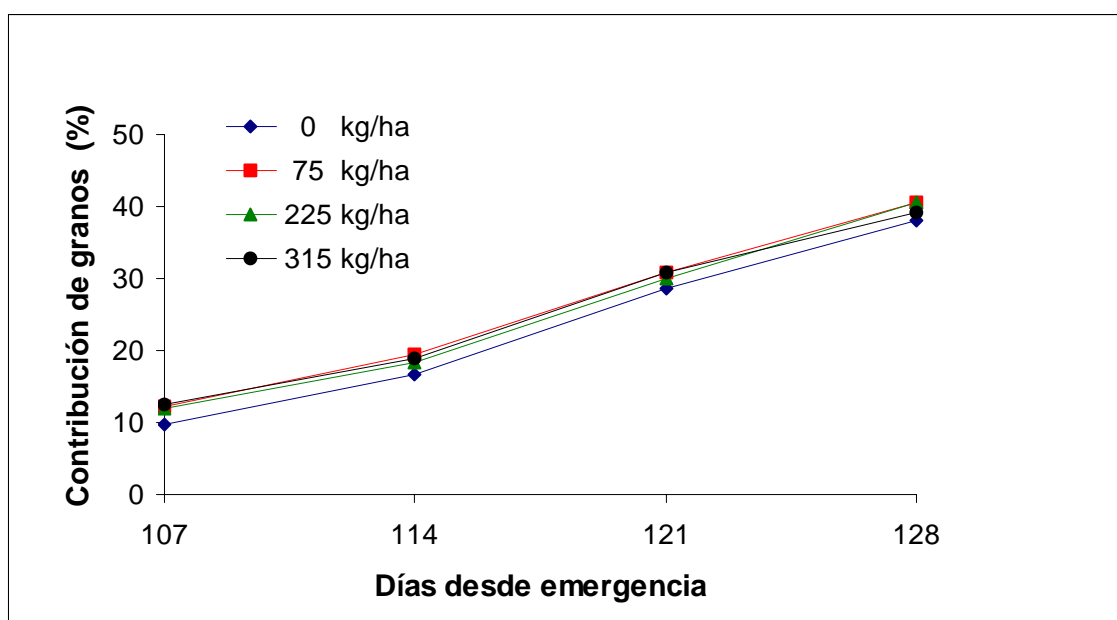
El tratamiento sin fertilización fosforada presentó diferencias significativas en la contribución de espigas con los tratamientos fertilizados con P, hasta los 114 días desde emergencia. En las últimas dos semanas de cultivo los tratamientos óptimo y supraóptimo presentaron diferencias estadísticas con el tratamiento sin aplicación de P (Cuadro 9).

En el último muestreo la contribución de espigas en la materia seca total varió entre 9,9 y 12,7%. El cultivo que presentó la mayor contribución de espigas en la materia seca total fue el del tratamiento sin aplicación de fósforo, mientras que la menor contribución de espigas en la materia seca total, fue determinada en el cultivo de fertilización fosforada óptima. Según DASSE (2005), el tratamiento sin fertilización con P fue el que presentó la mayor contribución de espigas, al momento de cosecha, mientras que la menor contribución de espigas fue presentado por el tratamiento de mayor fertilización fosforada.

4.2.2.4 Contribución porcentual de los granos. Desde el inicio de los muestreos hasta final de cosecha, se observa un aumento de la contribución de los granos en la materia seca total (Figura 25). El tratamiento sin aplicación de P, presentó la menor contribución de los granos en la materia seca total, durante todo el desarrollo del cultivo. Mientras que en los tratamientos con aplicación de P, se determinaron contribuciones similares de granos, en el total de colectas realizadas. Por su parte DASSE (2005), describió en el inicio de muestreos al tratamiento sin aplicación de P como el de menor contribución de granos, mientras que en las últimas dos semanas de desarrollo, el tratamiento de óptima fertilización, fue el que presentó la menor contribución de granos en la materia seca total.

Los tratamientos subóptimo y supraóptimo presentaron diferencias significativas en la contribución de granos con el tratamiento sin adición de P, hasta los 121 días desde emergencia, encontrándose en una situación intermedia el tratamiento de fertilización óptima. En la última semana de cultivo no existieron diferencias estadísticas de las contribuciones de los granos en el total de la planta, entre los distintos tratamientos (Cuadro 9).

La contribución porcentual de los granos en cosecha varió entre un 38,1 y un 40,4%. La menor contribución de granos en el total de la planta, fue determinado en el tratamiento sin fertilización fosforada, mientras que la mayor contribución de los granos en la materia seca total fue determinada en los tratamientos óptimo y subóptimo. Una mayor participación de granos en la materia seca total, fue determinada por DASSE (2005), donde el tratamiento que presentó la menor contribución de granos (46,4% presentado en el tratamiento óptimo), fue 5,7 puntos mayor que el tratamiento que presentó la mayor contribución de granos en el total de la planta, del presente estudio. Según DASSE (2005) el tratamiento que presentó la mayor contribución de granos, fue el tratamiento sin fertilización fosforada (48,7%). A diferencia de este estudio, donde el tratamiento sin aplicación de P, fue el que presentó la menor contribución de granos, al momento de cosecha (38,1%).



**FIGURA 25 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la contribución porcentual de los granos en el total de la materia seca producida.**

Al momento de cosecha los tallos fueron en promedio los que presentaron la mayor contribución en la materia seca total, seguidos por los granos, las espigas y por

último las hojas. En promedio entre tratamientos, los tallos presentaron una contribución de 39,9%, seguidos por los granos con una contribución de un 39,4%, un 11,2% de contribución de espigas, y finalmente las hojas presentaron 9,3% de contribución en la materia seca total, al momento de cosecha. A diferencia de lo determinado por DASSE (2005), donde el grano fue el órgano que presentó la mayor participación en la materia seca total, con un promedio de un 47,7%, seguido por tallos con un 32,8%, un 13,6% de contribución de espigas y finalmente las hojas con una contribución promedio de un 6,0%, al momento de cosecha. Hay que tener en cuenta que en ambos estudios no fueron consideradas las raíces en la producción total de la planta.

**CUADRO 9 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la contribución % de órganos en la MS total producida en cosecha del cultivo de trigo.**

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia														
		51			58			65			72					
Hojas	0	100	±	a	73,4	±	1,9	b	63,5	±	3,1	a	62,6	±	2,4	b
	75	100	±	a	64,7	±	0,6	a	52,7	±	2,8	a	50,0	±	2,8	a
	225	100	±	a	64,0	±	0,9	a	55,8	±	4,7	a	50,0	±	2,0	a
	315	100	±	a	65,3	±	2,6	a	54,6	±	6,1	a	49,7	±	1,6	a
Tallos	0				26,5	±	2,0	a	36,5	±	3,1	a	37,3	±	2,4	a
	75				35,3	±	0,6	b	47,3	±	2,9	a	49,9	±	2,8	b
	225				36,0	±	0,9	b	44,2	±	4,8	a	49,9	±	2,0	b
	315				34,7	±	2,6	b	45,3	±	6,1	a	50,2	±	1,6	b
Espigas	0															
	75															
	225															
	315															
Granos	0															
	75															
	225															
	315															

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



Continuación Cuadro 9

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia												
		79			86			93			100			
Hojas	0		33,0	±	1,4	b	20,9	±	2,8	a	16,1	±	1,6	a
	75		27,1	±	1,8	a	20,4	±	0,9	a	15,8	±	0,8	a
	225		26,7	±	1,9	a	20,2	±	1,4	a	17,4	±	0,2	a
	315		30,9	±	2,1	ab	22,2	±	3,4	a	17,4	±	1,9	a
Tallos	0		61,8	±	1,2	b	55,6	±	2,9	a	61,8	±	2,0	a
	75		60,3	±	1,4	b	59,2	±	1,0	a	62,5	±	1,9	a
	225		58,8	±	1,5	ab	60,6	±	0,8	a	62,5	±	2,6	a
	315		56,6	±	0,4	a	59,3	±	4,3	a	59,7	±	1,7	a
Espigas	0		5,16	±	2,0	a	23,5	±	0,4	b	22,1	±	1,7	b
	75		12,6	±	1,9	b	20,4	±	0,5	a	18,7	±	1,4	a
	225		14,4	±	1,5	b	19,1	±	0,6	a	17,8	±	1,0	a
	315		12,4	±	1,8	b	18,4	±	2,1	a	18,9	±	0,5	a
Granos	0													
	75													
	225													
	315													

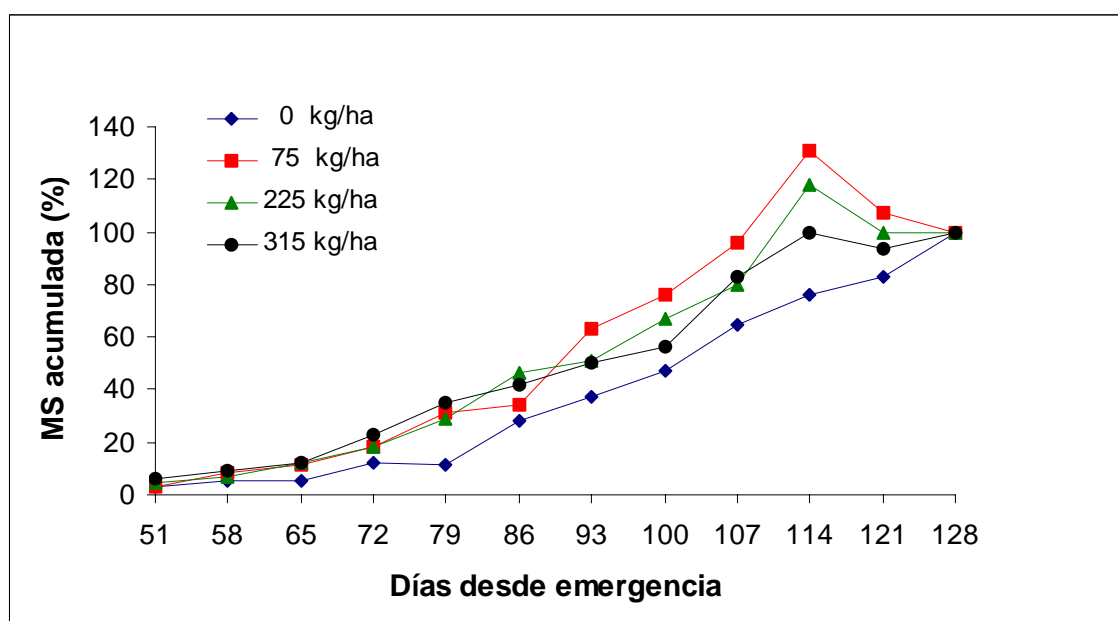
Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p<0,05; Tukey).

Continuación Cuadro 9

Órgano vegetal	Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	Días desde emergencia											
		107			114			121			128		
Hojas	0	13,5	± 0,5	a	11,2	± 0,8	a	8,8	± 0,5	a	7,6	± 0,6	a
	75	13,8	± 0,5	a	12,2	± 0,6	ab	9,9	± 0,6	ab	9,0	± 1,0	ab
	225	15,4	± 1,1	a	13,3	± 1,4	ab	11,1	± 0,7	bc	9,7	± 0,5	b
	315	14,9	± 2,5	a	14,3	± 0,7	b	11,6	± 0,5	c	10,9	± 0,9	b
Tallos	0	59,7	± 1,7	a	56,1	± 1,1	b	48,6	± 0,3	b	41,5	± 1,7	a
	75	59,4	± 1,1	a	55,0	± 0,5	ab	47,5	± 0,4	b	39,6	± 3,0	a
	225	56,9	± 1,0	a	55,9	± 0,9	b	46,8	± 0,1	ab	39,9	± 0,5	a
	315	57,5	± 1,0	a	53,3	± 0,3	a	45,1	± 1,3	a	39,0	± 1,7	a
Espigas	0	17,0	± 1,3	a	16,2	± 0,5	b	13,8	± 0,6	a	12,7	± 1,0	b
	75	14,6	± 0,3	a	13,2	± 0,4	a	11,8	± 1,1	a	10,9	± 0,4	ab
	225	15,9	± 2,3	a	12,5	± 0,5	a	11,9	± 0,2	ab	9,9	± 1,6	a
	315	15,1	± 0,9	a	13,4	± 0,3	a	12,7	± 0,4	b	11,0	± 0,4	ab
Granos	0	9,8	± 0,8	a	16,5	± 1,2	a	28,7	± 0,9	a	38,1	± 0,8	a
	75	12,2	± 0,9	ab	19,5	± 0,6	b	30,7	± 0,9	b	40,4	± 2,4	a
	225	11,8	± 1,0	ab	18,3	± 0,7	ab	30,0	± 0,6	ab	40,4	± 2,5	a
	315	12,6	± 1,2	b	18,9	± 0,6	b	30,7	± 0,5	b	39,0	± 1,9	a

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

**4.2.3 Acumulación porcentual de materia seca y fósforo.** Para calcular la acumulación porcentual de la materia seca, se tomo como máxima producción la obtenida en la cosecha final (día 128). En la Figura 26 se muestra una acumulación porcentual baja, durante las primeras colectas para todos los tratamientos (desde los 51 a los 72 días desde emergencia). Durante las siguientes semanas se muestra un aumento de la acumulación de materia seca, la que se mantiene hasta final de cosecha en el tratamiento sin fertilización fosforada. A diferencia de los tratamientos con fertilización fosforada, quienes presentaron un máximo de acumulación de materia seca, a los 114 días desde emergencia.

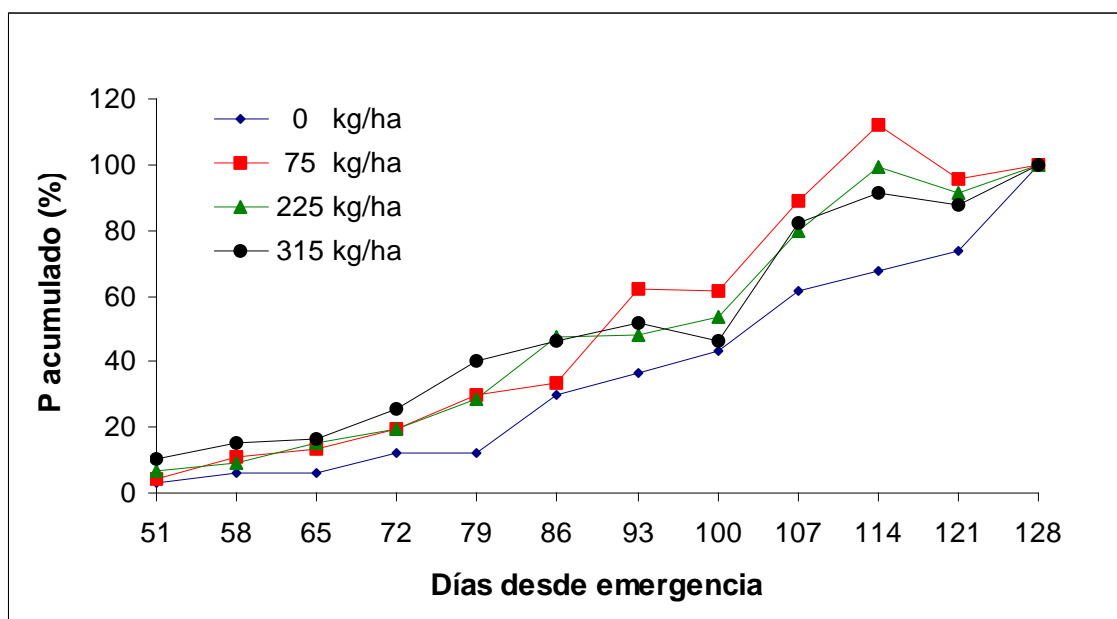


**FIGURA 26** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la acumulación porcentual de materia seca total en el tiempo.

El 50 % de la producción de materia seca se produjo una semana después de floración (día 93 desde emergencia) en los tratamientos con aplicación de P. A diferencia del tratamiento sin fertilización fosforada, quien llegó a la mitad de su producción dos semanas más tarde que los tratamientos fertilizados con P (día 107 desde emergencia). Este desfase también fue observado por DASSE (2005), donde el

tratamiento sin adición de P presentó el 50% de la producción, dos semanas más tarde que los tratamientos fertilizados con P.

Al igual que en la materia seca, el tratamiento sin fertilización fosforada presentó el 50% del P total (determinado al momento de cosecha), dos semanas más tarde que los tratamientos fertilizados con P.



**FIGURA 27 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la acumulación porcentual del fósforo total en el tiempo.**

Al comparar el fósforo absorbido durante el desarrollo del cultivo (Figura 27) con la materia seca total acumulada (Figura 26), podemos ver un comportamiento bastante parecido entre ambas curvas. El máximo de acumulación de materia seca y de absorción de P, se presentó en las últimas dos semanas de muestreos (114 días desde emergencia), en los tratamientos fertilizados con P. A diferencia del tratamiento sin fertilización fosforada quien presentó un máximo de acumulación de materia seca y de absorción de P al final del cultivo. Un comportamiento totalmente distinto fue descrito por DASSE (2005), quien determinó un máximo de acumulación de P cercano a floración, manteniéndose luego sin mayores cambios hasta final de cosecha. Por su

parte, GREGORY *et al.* (1979b) encontraron que la absorción de P llega a un máximo después del periodo de espigadura. Estos autores relacionan 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 las raíces más viejas.

**4.2.4 Tasa de crecimiento.** La tasa de crecimiento corresponde al delta de crecimiento diario (kg MS/ha/día). Para su cálculo se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de crecimiento} = \frac{\text{kgMS acumulada } t_2 - \text{kgMS acumulada } t_1}{t_2 - t_1}$$

Donde  $t_1$  y  $t_2$  son los tiempos de muestreos. En general, los delta de tiempo de muestreo fueron cada 7 días, con la excepción del muestreo inicial para cada órgano. En este estudio se consideró que entre emergencia y el primer muestreo de hojas y tallos, transcurrieron 51 días y entre inicio de espigadura y el muestreo de espigas 36 días, asumiendo como el inicio de desarrollo de las espigas el día 50 desde la emergencia.

La estimación de las tasas se realizó a partir de regresiones ajustadas entre la producción de materia seca acumulada y los días transcurridos desde la emergencia del cultivo. Este ajuste fue necesario debido a que si se determinan las tasas en base a los datos obtenidos en terreno para cada tratamiento, se obtienen valores erráticos, dado que las muestras tomadas fueron de plantas diferentes en cada muestreo (distintas plantas de trigo con distintos crecimientos en cada semana de muestreo).

La tasa de crecimiento se determinó para cada órgano vegetal y para el total aéreo de la planta de trigo. Para graficar los valores de la tasa de crecimiento, se utilizó la tasa como un valor correspondiente al promedio entre dos tiempos sucesivos de muestreo correspondientes  $((t_1 + t_2)/2)$ .

4.2.4.1 Tasa de crecimiento de las hojas. La tasa de crecimiento de las hojas se determinó, ajustando la materia seca acumulada de hojas, a una regresión de distribución Gaussiana. Los parámetros de esta ecuación se presentan en el Cuadro 10 donde **Y** es la materia seca producida por hectárea y **X** es el tiempo en días desde emergencia.

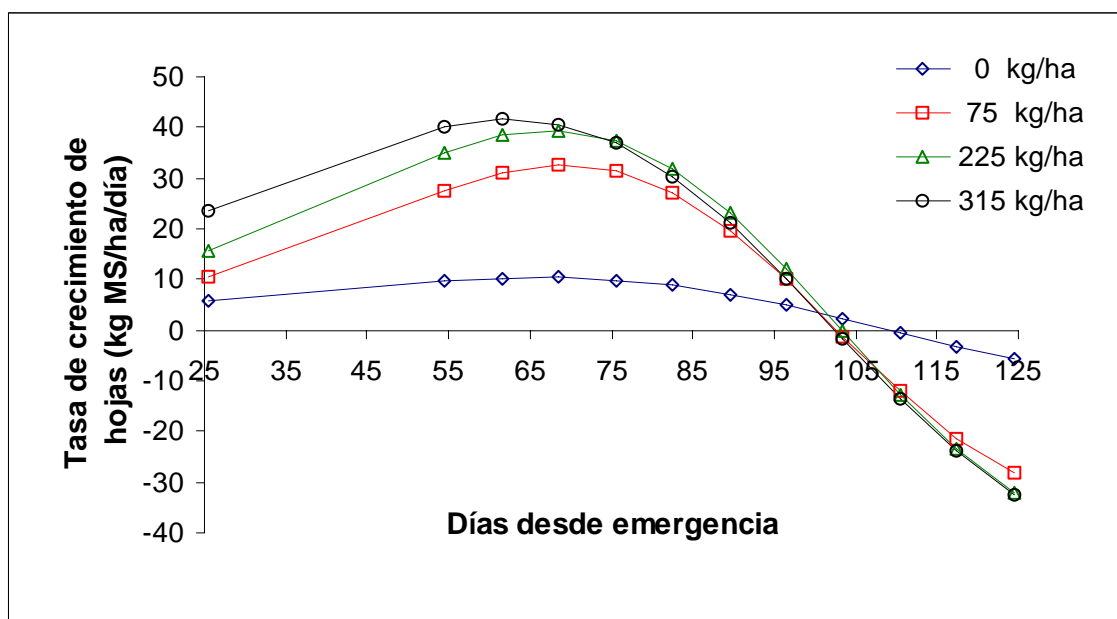
En la Figura 28 se muestra la tasa de crecimiento ajustada para cada tratamiento. En general las hojas presentaron una tasa positiva ascendente, luego una tasa positiva descendente y finalmente una tasa de crecimiento negativa o tasa de desacumulación.

**CUADRO 10 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana del crecimiento de hojas para los distintos tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) Área SD Mean Sy.x R <sup>2</sup>	Y=(area/(SD*(2*Pi)^0.5))*exp(-0.5((X-Mean)/SD)^2)			
	1	2	3	4
	0	75	225	315
	79604	151092	210315	275600
	43,0	33,4	35,9	40,0
	109,5	102,8	103,4	102,5
	106,8	306,6	340,7	483,8
	0,70	0,69	0,73	0,56

La tasa de crecimiento en hojas al inicio es baja, aumentando luego hasta llegar a un máximo a los 72 días desde emergencia, en todos los tratamientos. A excepción del tratamiento de mayor fertilización fosforada, quien alcanza un máximo una semana antes (65 días desde emergencia). Luego de alcanzar los máximos, las tasas en los distintos tratamientos disminuyen, llegando a punto de cero crecimiento diario. Las tasas cero de crecimiento se alcanzaron a los 100 días desde emergencia (dos semanas después de floración) en los tratamientos con fertilización fosforada. A diferencia del tratamiento sin aplicación de P, quien presentó una tasa de crecimiento cero, después que los demás tratamientos (107 días desde emergencia). Luego de llegar a una tasa de crecimiento cero, los distintos tratamientos presentaron tasas negativas en aumento, hasta final de cosecha.

Después de los 100 días desde emergencia en los tratamientos con fertilización fosforada y desde los 107 días en el tratamiento sin aplicación de P, las tasas de crecimiento en las hojas comenzaron hacer negativas, lo cual indicaría una desacumulación de materia seca, producto de la translocación de carbohidratos hacia otros sectores de la planta. El retraso de la translocación, presentado por el cultivo del tratamiento sin aplicación de P, también fue descrito por DASSE (2005). Por su parte, los tratamientos de mayor fertilización (óptimo y supraóptimo), fueron los primeros en presentar tasas negativas, encontrándose en una situación intermedia el tratamiento de fertilización subóptima (DASSE, 2005).



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

Los máximos alcanzados en la tasa de crecimiento fluctuaron entre 10,3 y 41,6 kg MS/ha/día. El tratamiento con mayor aplicación de P, fue el que presentó la mayor tasa de crecimiento en hojas, mientras que el tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó la tasa máxima más baja de crecimiento diario. Las tasas más altas presentadas en los tratamientos subóptimo y óptimo fueron de 32,7 y 39,4 kg MS/ha/día. Menores diferencia en las tasas máximas de crecimiento, entre

tratamientos fue determinado por DASSE (2005), cuyos valores variaron entre 37,5 y 62,9 kg MS/ha/día, ordenándose en función de la fertilización fosforada aplicada. A su vez, la tasa máxima de crecimiento determinada por DASSE (2005), en tratamiento sin aplicación de P, fue 3,6 veces mayor a la tasa máxima determinada en el tratamiento sin fertilización fosforada, del presente estudio.

Las desacumulaciones de materia seca en hojas se ordenaron en función de la cantidad de fósforo aplicado al suelo, encontrándose las mayores desacumulaciones en los tratamientos con aplicaciones de P más altos al suelo (óptimo y supraóptimo). Las tasas de crecimiento en hojas al momento de cosecha, variaron entre -5,6 y -32,4 kg MS/ha/día. En el tratamiento óptimo se determinó una tasa de -32,1 kg MS/ha/día, mientras que el tratamiento subóptimo presentó una tasa de -28,3 kg MS/ha/día. Las tasas de los tratamientos fertilizados con P, al momento de cosecha fueron en promedio 5,5 veces superior a la tasa presentada por el tratamiento sin aplicación de P.

4.2.4.2 Tasa de crecimiento de los tallos. Para poder determinar la tasa de crecimiento de los tallos, se utilizó un ajuste no lineal de distribución sigmoidea. Al igual que en la determinación de las tasas de crecimiento en hojas, se utilizó como parámetro la materia seca acumulada en función del tiempo de muestreo. Los parámetros de la curva son mostrados en el Cuadro 11, donde **Y** es la materia seca producida por hectárea y **X** es el tiempo en días desde emergencia.

**CUADRO 11 Ecuación y parámetros de ajuste a un modelo sigmoideo de la materia seca de tallos producida en el tiempo para los distintos tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) Bottom Top V50 Slope Sy.x R <sup>2</sup>	Y= Bottom + (Top-Bottom)/(1+exp((V50-X)/slope))			
	1	2	3	4
	0	75	225	315
Bottom	73,66	504,3	377,7	390,8
Top	3864	7333	8504	9749
V50	92,64	86,22	84,23	84,27
Slope	8,2	6,0	7,4	12,3
Sy.x	425,5	1140	883	499,6
R <sup>2</sup>	0,92	0,89	0,94	0,98



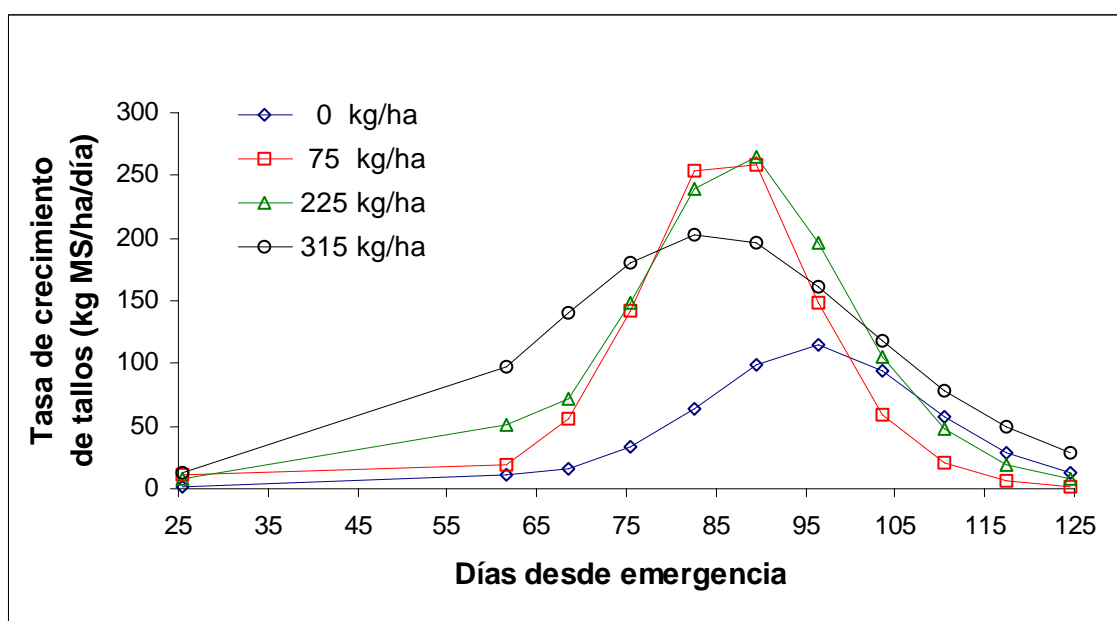
En general las tasas de crecimiento en tallos al inicio de los muestreos son bajas, aumentando luego hasta alcanzar un máximo entre los 86 y los 100 días desde emergencia. Después de alcanzar un máximo las tasas de crecimiento en tallos disminuyen, hasta final cosecha (Figura 29).

Al inicio del desarrollo, las tasas de crecimiento de los tallos varían entre 1,5 y 13,4 kg MS/ha/día. El tratamiento que presentó la mayor tasa de crecimiento en tallos al inicio de los muestreos, fue el tratamiento supraóptimo, mientras que la menor tasa se presentó en el tratamiento sin fertilización fosforada. La tasa máxima de crecimiento, se presentó a los 86 días desde emergencia (floración) en el tratamiento con mayor aplicación de P. Por su parte, los tratamientos de fertilización óptima y subóptima, presentaron un máximo en sus tasas de crecimiento, una semana más tarde. El tratamiento sin fertilización fosforada presentó una tasa máxima de crecimiento, dos semanas después de floración del cultivo (día 100 desde emergencia). Este retraso también fue descrito por DASSE (2005), donde los tratamientos subóptimo y sin fertilización fosforada fueron los últimos en presentar una tasa máxima de crecimiento en tallos. Sin embargo, las mayores tasas de crecimiento, se ordenaron en función de la disponibilidad de P en el suelo (DASSE, 2005). A diferencia de este estudio, donde las tasas más altas de crecimiento en tallos, fueron determinadas en los tratamientos óptimo y subóptimo. Mientras que la tasa máxima más baja fue determinada en el tratamiento sin aplicación de P.

Las tasas máximas presentada en el tratamiento óptimo fue de 265,3 kg MS/ha/día, levemente superior a la presentada en el tratamiento subóptimo (258,1 kg MS/ha/día). La tasa máxima más baja presentada en el tratamiento sin adición de P fue de 114,4 kg MS/ha/día. Por su parte, DASSE (2005) determinó tasas máximas más bajas en tallos, donde el tratamiento que presentó el mayor crecimiento diario, no superó los 200 kg MS/ha/día. Sin embargo DASSE determinó menores diferencias entre el tratamiento sin adición de P y los tratamientos con fertilización fosforada, en las tasas máximas de crecimiento de tallos.

Luego de alcanzar las tasas más altas de crecimientos, los tallos de los distintos tratamientos disminuyen su crecimiento diario hasta final de cosecha. El crecimiento

diario presentado durante la última semana de desarrollo del cultivo, varió entre 2,0 y 29,5 kg MS/ha/día. La menor tasa de crecimiento de tallos al momento de cosecha se presentó en el tratamiento subóptimo, mientras que el tratamiento con mayor aplicación de P fue el que presentó la mayor tasa de crecimiento, durante la última semana de cultivo. Por su parte, el tratamiento sin adición de P, presentó una tasa de crecimiento de tallos más alta a la determinada para el tratamiento de fertilización óptima. La tasa de crecimiento de tallos del tratamiento sin adición de P (13,47 kg MS/ha/día), fue 1,7 veces mayor que la tasa de crecimiento de tallos, determinada en el tratamiento óptimo (7,87 kg MS/ha/día), al momento de cosecha.



**FIGURA 29** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de crecimiento en tallos.

4.2.4.3 Tasa de crecimiento de las espigas. Para poder determinar las tasas de crecimiento de espigas. La materia seca de los distintos tratamientos fue ajustada a una regresión con distribución Gaussiana. En el cuadro 12 se presentan los parámetros de la curva, donde  $Y$  es la materia seca producida por hectárea y  $X$  es el tiempo en días desde emergencia.

La tasa de crecimiento de espigas presentó un aumento, llegando a un máximo entre 93 y los 100 días desde emergencia. Luego de alcanzar un máximo la tasa de crecimiento de espigas disminuye, haciéndose negativa durante las últimas etapas de cultivo (Figura 30). Un comportamiento diferente fue descrito por DASSE (2005), quien determinó un crecimiento máximo diario de espigas en la primera colecta, y tasas negativas en las últimas dos semanas de desarrollo del cultivo.

**CUADRO 12 Ecuación y parámetros de ajuste a un modelo de distribución Gaussiana del crecimiento de espigas para cuatro tratamientos con fertilización fosforada.**

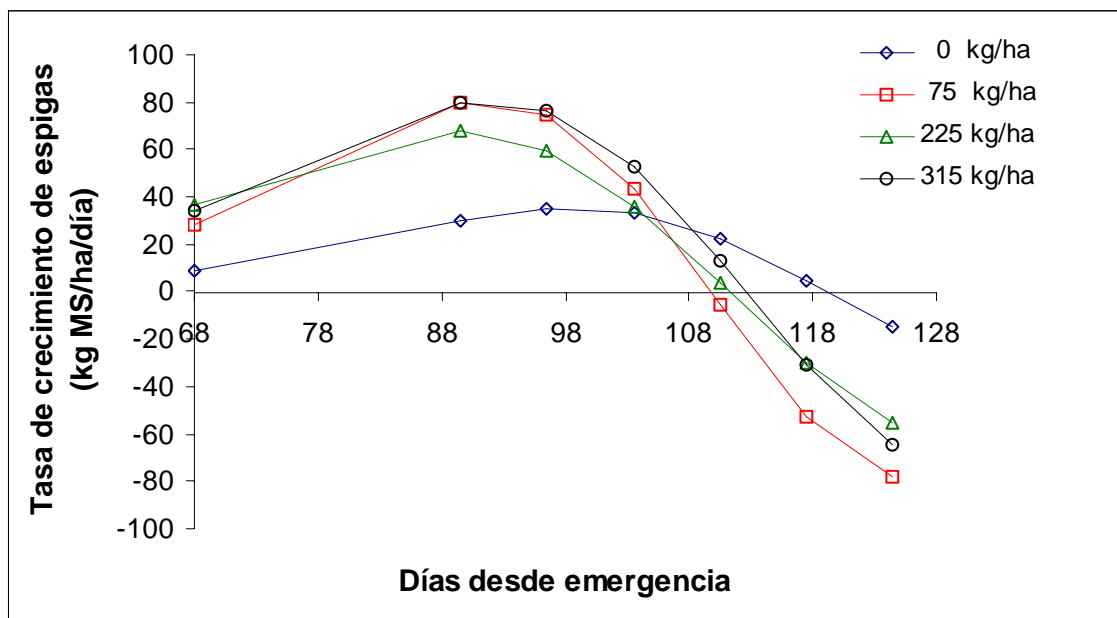
Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	$Y=(area/(SD*(2*Pi)^{0.5}))*exp(-0.5((X-Mean)/SD)^2)$			
	1	2	3	4
Area	64407	108517	140624	145936
SD	20,56	17,93	22,31	20,80
Mean	119	110	111	113
Sy.x	192,1	298,1	298,1	334,1
R <sup>2</sup>	0,78	0,62	0,66	0,74

Las espigas al inicio de su desarrollo presentaron tasas de crecimiento que variaron entre 9,3 y 36,9 kg MS/ha/día. El tratamiento con una fertilización fosforada óptima fue el que presentó la mayor tasa de crecimiento de espigas, mientras que el tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó la menor tasa de crecimiento, al inicio de desarrollo de espigas. En los tratamientos subóptimo y supraóptimo se determinaron tasas iniciales de 28,0 y 34,5 kg MS/ha/día.

Los tratamientos fertilizados con P, presentaron un máximo de crecimiento diario en espigas, una semana después de floración (día 93 desde emergencia). A diferencia del tratamiento sin fertilización fosforada, donde las espigas presentaron su máximo crecimiento diario (100 días desde emergencia), una semana más tarde que los tratamientos fertilizados con P. Las tasas más altas de espigas, variaron entre 35,1 y 80,1 kg MS/ha/día. El tratamiento sin aplicación de P fue el que presentó la tasa máxima más baja, mientras que el tratamiento supraóptimo fue el que presentó la tasa máxima más alta de crecimiento en espigas. El tratamiento subóptimo presentó una

tasa máxima similar a la presentada por el tratamiento supraóptimo (77,9 kg MS/ha/día). A diferencia de los 67,7 kg MS/ha/día presentados como máximos en el tratamiento de fertilización óptima. Tasas muy superiores a las presentadas en este estudio fueron determinadas por DASSE (2005), donde el tratamiento que presentó el máximo más bajo (tratamiento sin adición de P), fue tres veces superior que la tasa máxima más alta presentada en el tratamiento supraóptimo de este estudio.

Luego de alcanzar un crecimiento diario máximo, las tasas disminuyen hasta un crecimiento diario igual a cero. Por último, las tasas de crecimiento en espigas se presentaron negativas, hasta final de cosecha. Al igual que en las hojas, en el tratamiento sin adición de P, se determinó un atraso de la translocación de compuestos carbonados desde espigas, presentando tasas de crecimiento negativas una semana más tarde que los tratamientos de mayor fertilización fosforada (óptimo y supraóptimo). A su vez, el tratamiento subóptimo, fue el primero en presentar tasas negativas.



**FIGURA 30** Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de crecimiento en espigas.

En el tratamiento sin fertilización fosforada se presentó la tasa de desacumulación de P más baja de espigas (-14,99 kg MS/ha/día), mientras que el tratamiento subóptimo fue el que presentó la tasa más alta de desacumulación de P en espigas (-77,9 kg MS/ha/día). Por su parte, los tratamientos de mayor fertilización (óptimo y supraóptimo), presentaron una situación intermedia en sus tasas de crecimientos, al momento de cosecha (tasas de 55,7 y 64,9 kg MS/ha/día).

4.2.4.4 Tasa de crecimiento de los granos. La materia seca producida en grano fue ajustada a una regresión lineal, donde la ecuación y los parámetros de la curva para cada tratamiento son mostrados en el Cuadro 13.

Los parámetros de la ecuación presentada en el Cuadro 9 son: **A** es el intercepto en **Y** Cuando **X** es cero; **X** es el tiempo desde emergencia; **B** es la pendiente, por ende, la tasa de crecimiento del grano, y **intercepto en X** es el día en que la producción de granos es cero.

**CUADRO 13 Ecuación y parámetros del ajuste a una regresión lineal del crecimiento de granos para cuatro tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) A B Intercepto en X Sy.x R <sup>2</sup>	Y= A+B*X			
	1	2	3	4
P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	0	75	225	315
A	-14350	-19630	27530	30810
B	137,7	201,4	275,4	307,1
Intercepto en X	104	97	99	100
Sy.x	357	848	579	1115
R <sup>2</sup>	0,92	0,81	0,94	0,85

El grano es el órgano receptor de gran parte de los carbohidratos producido en hojas, tallos y espigas de la planta. Por lo tanto, el grano siempre presentara un crecimiento ascendente. Las tasas de crecimiento en grano variaron entre 137 y los 307 kg MS/ha/día, ordenándose en relación al nivel de fertilización de P al suelo.

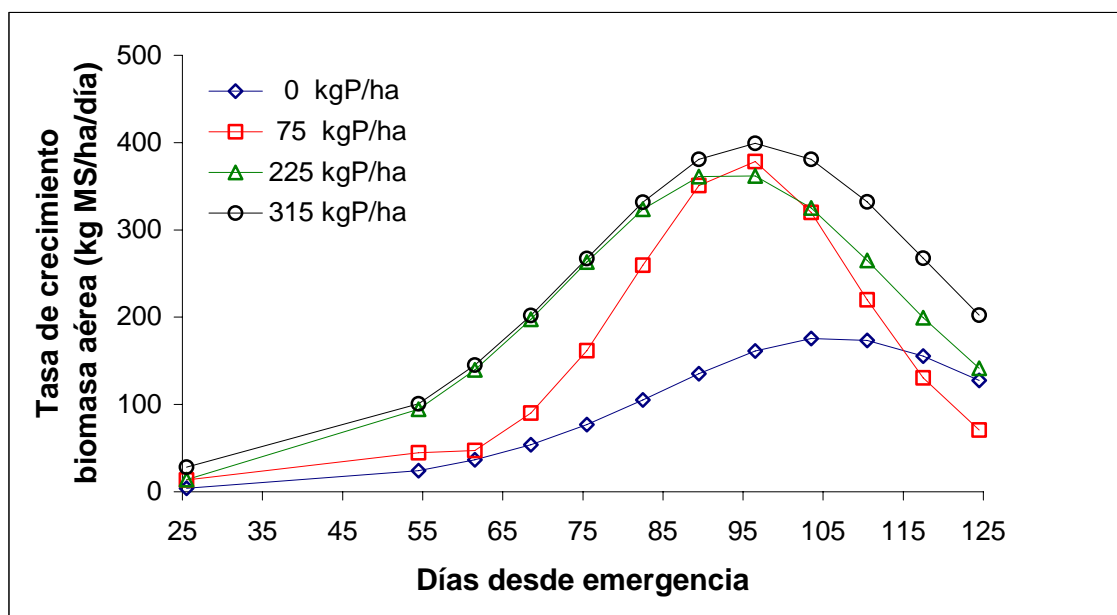
El grano fue el órgano que presentó la tasa de crecimiento más alta, cuyo promedio entre tratamientos fue de 230 kg MS/ha/día, seguido por los tallos con una tasa promedio de 210 kg MS/ha/día, 65 kg MS/ha/día presentado en espigas y por último las hojas, con una tasa de crecimiento promedio entre tratamientos de 31 kg MS/ha/día.

4.2.4.5 Tasa de crecimiento en la biomasa aérea de la planta. La materia seca total producida en la parte aérea de la planta, fue ajustada a una regresión no lineal de distribución Sigmoidea. En el cuadro 14 se presentan los parámetros de la curva, donde **Y** es la materia seca producida por hectárea y **X** es el tiempo en días desde emergencia.

**CUADRO 14 Parámetros de ajuste a un modelo sigmoideo de la biomasa total aéreo producida en el tiempo para los tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación	Y= Bottom + (Top-Bottom)/(1+exp((V50-X)/slope))			
	1	2	3	4
Tratamiento				
P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	0	75	225	315
Bottom	-107,1	668,9	-477,3	36,1
Top	10971	15704	21341	25629
V50	106	92	93	96
Slope	15,6	9,8	14,8	15,9
Sy.x	770,3	1767	1375	2207
R <sup>2</sup>	0,94	0,92	0,96	0,93

Como se muestra en la Figura 31, Las tasas al inicio de desarrollo fueron bajas, aumentando en las siguientes semanas de cultivo, hasta llegar a un máximo entre los 100 y los 107 días desde emergencia. Luego de presentar un máximo crecimiento diario, las tasas disminuyen, hasta cosecha final.



**FIGURA 31 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de crecimiento en la biomasa aérea de la planta.**

Los tratamientos fertilizados con P presentaron su máximo crecimiento diario dos semanas después de floración (100 días desde emergencia). A diferencia del tratamiento sin fertilización fosforada, donde la tasa máxima de crecimiento se produjo una semana más tarde. Este comportamiento también fue observado por ELLIOTT et al (1997a), quienes demostraron que las deficiencias de fósforo reducen claramente el crecimiento del trigo y retrasan la fase de desarrollo. La deficiencia de P resultaría de modificaciones tempranas en los procesos fisiológicos del cultivo, los cuales tendrían como objetivo principal general 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 el suelo que presenta deficiencia de P-Olsen disponible. Por su parte, DASSE (2005), también determinó un retraso por parte del tratamiento sin adición de P, en presentar la tasa máxima de crecimiento, en relación a los tratamientos con mayor disponibilidad de P. Sin embargo, durante las últimas semanas de desarrollo del cultivo, el tratamiento sin fertilización fosforada fue el que

presentó la mayor tasa de crecimiento (DASSE, 2005). A diferencia de este estudio, donde el tratamiento de mayor fertilización fosforada fue el que presentó la mayor tasa de crecimiento, al momento de cosecha.

En el tratamiento sin adición de P, el máximo crecimiento diario, determinado por DASSE (2005), fue de 230,0 kg MS/ha/día. A diferencia de lo presentado en este estudio, donde la tasa máxima de crecimiento, determinada para el tratamiento sin aplicación de P, fue de 175,6 kg MS/ha/día. La tasa máxima presentada en el tratamiento supraóptimo fue de 399,3 kg MS/ha/día, mientras que los tratamientos óptimo y subóptimo presentaron tasas de 361,4 y 378,2 kg MS/ha/día respectivamente. Tasas máximas más bajas, en los tratamientos con fertilización fosforada, fueron determinados por DASSE (2005), cuyos valores fluctuaron entre 266,0 y 272,0 kg MS/ha/día. Según DASSE (2005), los tratamientos con fertilización fosforada, no presentaron mayores diferencias en la tasa máxima de crecimiento, con el tratamiento sin adición de P. Resultados totalmente distintos fueron determinados en el presente estudio. Donde los tratamientos fertilizados con fósforo presentaron en promedio una tasa 2,2 veces superior a la tasa máxima presentada en el tratamiento sin aplicación de P:

En cosecha las tasas de crecimientos variaron entre los 70,7 y los 202,2 kg MS/ha/día. La mayor tasa de crecimiento fue presentada en el tratamiento supraóptimo, mientras que el tratamiento subóptimo fue el que presentó la menor tasa de crecimiento, al momento de cosecha. La tasa crecimiento presentada en cosecha por el tratamiento óptimo fue similar a la tasa de crecimiento presentada en cosecha en el tratamiento sin aplicación de P. Los tratamientos óptimo y sin adición de P presentaron tasas de crecimientos en cosecha de 141,3 y 127,6 kg MS/ha/día respectivamente.

**4.2.5 Tasa de absorción de fósforo.** Las tasas de absorción se determinaron para cada órgano vegetal y para el total absorbido en la parte aérea de la planta. Estas tasas se estimaron de forma similar a las tasas de crecimiento, es decir a través de regresiones ajustadas a valores reales de absorción de fósforo en el tiempo.



4.2.5.1 Tasa de absorción de fósforo de las hojas. Los valores de absorción de P de las hojas fueron ajustados a una curva no lineal de distribución Gaussiana, al igual que en la determinación de las tasas de crecimiento de hojas y espigas.

En el cuadro 15 se presentan los parámetros de la curva, donde **Y** es la absorción de fósforo por hectárea y **X** es el tiempo en días desde emergencia.

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

Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) Area SD Mean Sy.x R <sup>2</sup>	Y=(area/(SD*(2*Pi)^0.5))*exp(-0.5((X-Mean)/SD)^2)			
	1	2	3	4
	0	75	225	315
	89,4	215,7	313,9	471,5
	31,9	30,2	31,3	34,7
	95	97	95	87
	0,21	0,56	0,69	1,1
	0,54	0,58	0,59	0,46

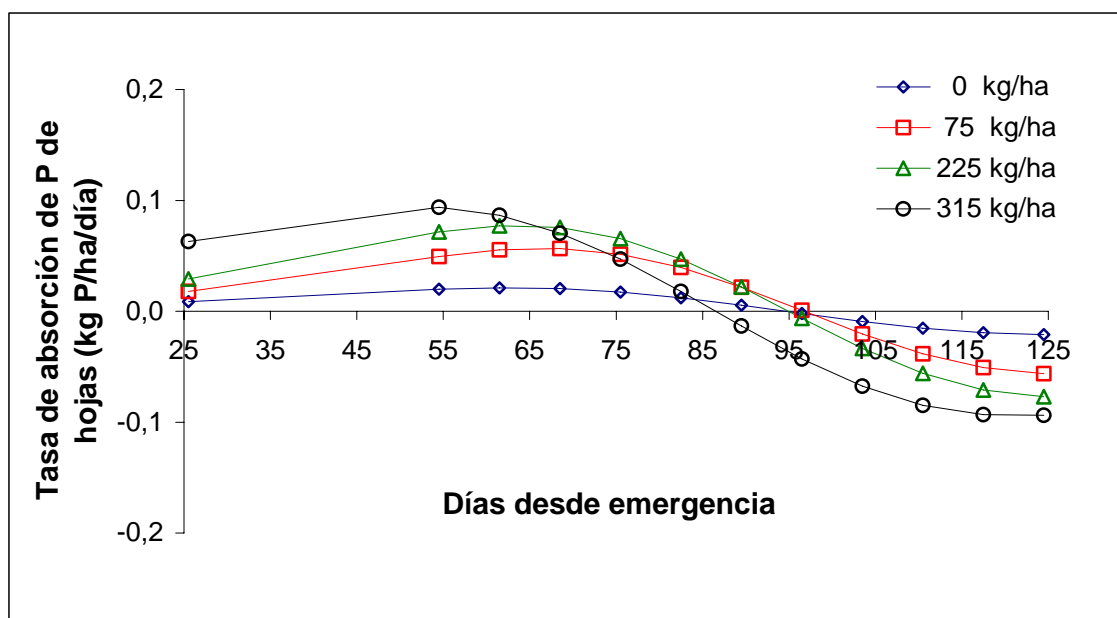
Los tratamientos en general presentaron un aumento de la absorción diaria de P durante sus primeras semanas de desarrollo, alcanzando una tasa máxima de absorción entre los 58 y los 72 días desde emergencia. Luego de alcanzar un máximo, la tasa de absorción de P en hojas disminuye, haciéndose negativa durante las últimas etapas de desarrollo del cultivo (Figura 32).

La tasa de absorción de P en hojas al inicio de colecta varió entre tratamientos, desde 0,01 a 0,06 kg P/ha/día. El tratamiento sin adición de P fue el que presentó la tasa más baja al inicio de los muestreos, mientras que la tasa más alta de absorción de fósforo, fue presentada por el tratamiento supraóptimo. Por su parte, los tratamientos subóptimo y óptimo presentaron tasas de 0,02 y 0,03 kg P/ha/día, al inicio de colecta.

Las tasas máximas de absorción de P variaron entre los 0,02 y 0,09 kg P/ha/día, ordenándose en relación al nivel de fertilización de P al suelo. La tasa máxima de absorción de P se presentó después de la primera semana de muestreos,

en el tratamiento con mayor aplicación de P (58 días desde emergencia). Los tratamientos óptimo y sin fertilización fosforada presentaron la tasa máxima de absorción una semana más tarde que el tratamiento supraóptimo. Mientras que el tratamiento subóptimo fue el último en presentar un máximo de absorción diario de P (72 días desde emergencia). Un retraso de los máximos de absorción diario de P, también fue determinado por DASSE (2005), donde los tratamientos subóptimo y sin fertilización fosforada presentaron una semana más tarde las tasas máxima de absorción de P, que los tratamientos óptimo y supraóptimo.

La tasa negativa de absorción de P se presentó primero en el tratamiento con mayor fertilización fosforada, a diferencia del resto de los tratamientos, quienes presentaron tasas negativas una semana mas tarde.



**FIGURA 32 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en hojas.**

Las tasas máximas de desacumulación de P fueron determinadas en la cosecha final. Las tasas de desacumulación de P variaron al momento de cosecha entre -0,02 y -0,09 kg P/ha/día. La tasa de desacumulación de P más alta al final de

cosecha, se presentó en el tratamiento supraóptimo, mientras que el tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó la tasa de desacumulación más baja al momento de cosecha. Si bien las tasas de desacumulación fueron aumentando con el tiempo, este incremento fue cada vez menor, debido probablemente a que disminuyen los compuestos orgánicos fosforado degradables en las hojas, quedando sólo fracciones no translocables de P. Tasa de desacumulaciones más alta fueron determinadas por DASSE (2005), donde el tratamiento que presentó la máxima más baja de desacumulación de P (tratamiento sin adición de P), fue superior a la tasa máxima más alta presentada por el tratamiento supraóptimo, en este estudio.

Por ultimo, como se mostró anteriormente, existió un efecto de la disponibilidad de fósforo en el suelo sobre las tasas de absorción P en hojas. Las tasas de acumulación y desacumulación de P en hojas fueron mayores a medida que la fertilización fosforada fue más alta.

4.2.5.2 Tasa de absorción de fósforo de los tallos. La absorción acumulada de P en los tallos, fue ajustada a una regresión de distribución Gaussiana. Los parámetros y la ecuación se muestran en el Cuadro 16, donde **Y** corresponde a la absorción acumulada de fósforo en los tallos y **X** al tiempo en días desde emergencia.

**CUADRO 16 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en tallos para cuatro tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	$Y=(area/(SD*(2*\pi)^{0.5}))*exp(-0.5((X-Mean)/SD)^2)$			
	1	2	3	4
P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	0	75	225	315
Area	186,2	407,5	535	675
SD	20,13	19,98	22,48	23,85
Mean	113	108	109	108
Sy.x	0,58	1,32	1m18	1,81
R <sup>2</sup>	0,85	0,81	0,88	0,80

Los tratamientos al inicio de desarrollo presentaron tasas de absorción de P bajas, aumentando en las siguientes semanas, hasta llegar a un máximo de absorción

diaria de P entre los 86 y 93 días desde emergencia (alrededor de floración). Luego de alcanzar una máxima absorción diaria, los tratamientos disminuyen sus tasas, presentándose negativas durante las últimas semanas de desarrollo de cultivo (Figura 33).

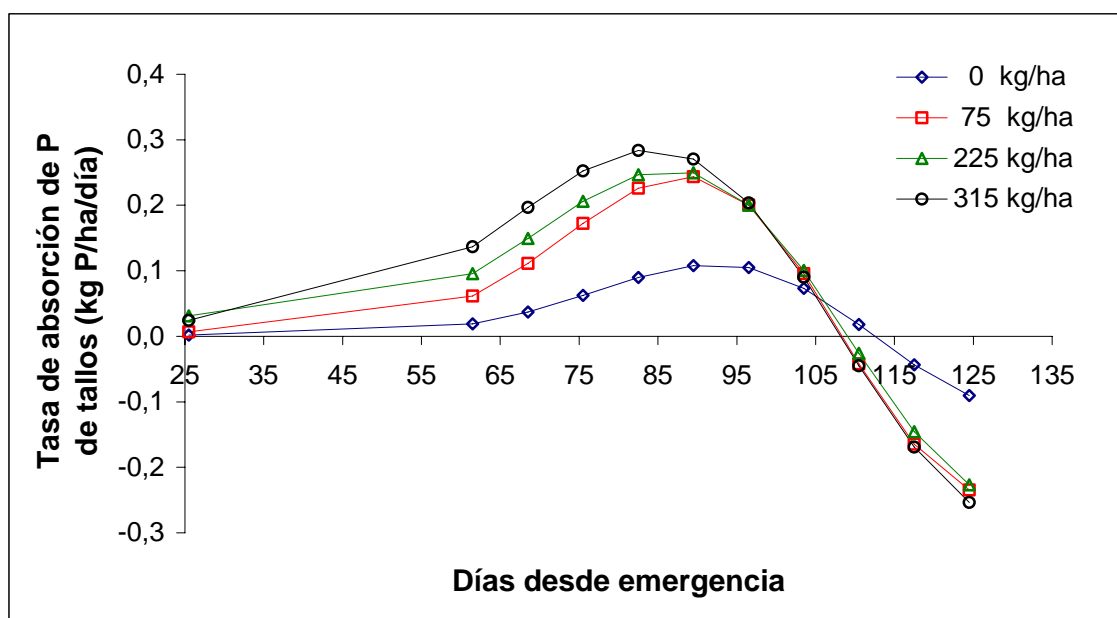
Al inicio de desarrollo los tratamientos presentaron tasas de absorción de P entre 0,002 y 0,031 kg P/ha/día. el tratamiento que presentó la tasa más alta al inicio fue el tratamiento óptimo, mientras que el tratamiento sin aplicación de P fue el que presentó la tasa más baja de absorción de P de tallos, durante las primeras etapas de cultivo.

Las tasas máximas de absorción de P de tallos variaron entre 0,11 y 0,28 kg P/ha/día, ordenándose en relación al nivel de aplicación de P como fertilizante al suelo. El tratamiento supraóptimo presentó la tasa máxima de absorción de P en tallos a los 86 días desde emergencia (floración). A diferencia de los demás tratamientos quienes presentaron tasas máximas de absorción de P una semana más tarde que el tratamiento supraóptimo. Este retraso por parte de los tratamientos con menor disponibilidad de P también fue determinado por DASSE (2005), sin embargo, existieron menos diferencias de tasas máximas de absorción, entre los tratamientos fertilizado y el tratamiento sin fertilización fosforada (tasas similares). A diferencia de este estudio, donde los tratamientos fertilizados con P presentaron tasas máximas en promedio 2,4 veces mayor a la tasa de absorción máxima presentada en el tratamiento sin aplicación de P.

Las tasas negativas se presentaron una semana más tarde en el tratamiento sin fertilización fosforada que los tratamientos con aplicación de P al suelo. Este retraso sugiere que el tratamiento sin fertilización no alcanzaría a suplir las necesidades de fósforo óptimas del cultivo y de esa manera, las plantas podrían estar modificando su ontogenia, retrasando sus periodos fonológicos tal como ha sido sugerido por ELLIOTT *et al.*, (1997a).

La tasa máxima de desacumulación de P se presentó al momento de cosecha en los distintos tratamientos, existiendo una gran diferencia de la cantidad de P

translocado por día desde los tallos, entre los tratamientos con aplicación de P y el tratamiento sin fertilización fosforada. Las tasas de absorción de P al momento de cosecha variaron entre -0,09 y -0,25 kg P/ha/día. El tratamiento supraóptimo presentó la mayor desacumulación diaria de P al momento de cosecha. La tasa de desacumulación presentada en los tratamientos subóptimo y el tratamiento óptimo, al momento de cosecha fue de 0,23 kg P/ha/día. Por su parte DASSE (2005), determinó tasas de desacumulación de P de tallos similares entre los tratamientos fertilizados con P y el tratamiento sin fertilización fosforada.



**FIGURA 33 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en tallos.**

4.2.5.3 Tasa de absorción de fósforo de las espigas. La curva ajustada para la absorción de P acumulada en espigas corresponde a un modelo de distribución Gaussiana. Los parámetros de la ecuación son presentados en el Cuadro 17, donde **Y** corresponde a la absorción acumulada de fósforo de espigas y **X** al tiempo en días desde emergencia.

El comportamiento adoptado por las tasas de absorción de P en espigas fue similar al comportamiento mostrado anteriormente por las tasas de absorción de P en tallos y hojas. Se determinó en general un aumento de la absorción diaria de P en espigas, hasta los 93 días desde emergencia. Luego las tasas de absorción de P en espigas disminuyen haciéndose negativas durante las últimas semanas de desarrollo del cultivo (Figura 34).

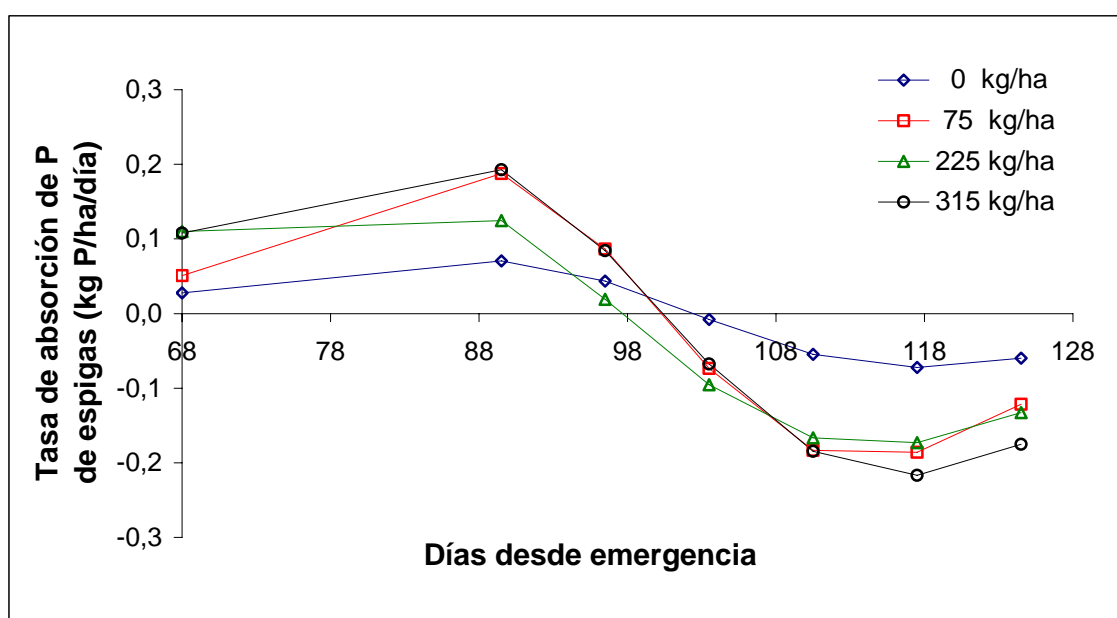
**CUADRO 17 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana de la absorción de fósforo en espigas para cuatro tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	$Y=(area/(SD*(2*Pi)^{0.5}))*exp(-0.5((X-Mean)/SD)^2)$			
	1	2	3	4
P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	0	75	225	315
Area	68,07	153,8	212,7	233,4
SD	14,97	13,52	16,90	15,99
Mean	102	100	98	100
Sy.x	0,47	0,87	0,69	0,87
R <sup>2</sup>	0,47	0,72	0,83	0,76

Al inicio de desarrollo de espigas las tasas de absorción de P variaron desde 0,03 a 0,11 kg P/ha/día. Los tratamientos óptimo y supraóptimo presentaron la tasa más alta, mientras que el tratamiento sin adición de P fue el que presentó la tasa de absorción de P más baja, a comienzos de desarrollo.

Las tasas máximas de absorción de P se presentaron a los 93 días desde emergencia, las cuales variaron entre 0,07 y 0,19 kg P/ha/día. Los tratamientos subóptimo y supraóptimo presentaron la tasa máxima más alta de absorción de P, mientras que el tratamiento sin adición de P fue el que presentó la máxima más baja de absorción de P. La máxima absorción de P determinada en el tratamiento óptimo fue de 0,12 kg P/ha/día. Tasas máximas más altas fueron descritas por DASSE (2005), quien además las determinó al inicio de colecta. La tasa máxima más baja determinada por DASSE (2005), fue más del doble que la tasa máxima más alta de absorción de P, presentada en espigas de los tratamientos subóptimo y supraóptimo, en este estudio.

Las máximas desacumulaciones de P en espigas se observaron una semana antes de cosecha. A diferencias de los máximos desacumulaciones diarias de P presentadas en hojas y tallos (se presentaron al momento de cosecha). Esta disminución en la translocación desde las espigas durante la última semana de desarrollo del cultivo, estaría indicando la existencia de una fracción de P acumulado que no participa en el proceso de translocación. Las tasas de desacumulación en espigas, al momento de cosecha variaron entre -0,06 y -0,18 kg P/ha/día, ordenándose en relación al nivel de disponibilidad de P en el suelo.



**FIGURA 34 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en espigas.**

Al comparar las tasas de desacumulación de P en hojas, tallos y espigas, el órgano que presentó la mayor tasa de desacumulación al momento de cosecha fue el tallo, con un promedio de -0,20 kg P/ha/día, seguido por las espigas con -0,12 kg P/ha/día y finalmente las hojas con una tasa promedio de -0,06 kg P/ha/día entre el total de los tratamientos evaluados. A su vez las tasas más altas de absorción de P fueron presentadas en los tallos, con un promedio entre tratamientos de 0,22 kg P/ha/día, seguidos por las espigas con un valor de 0,14 kg P/ha/día y por último las

hojas, quienes presentaron una tasa máxima promedio entre tratamientos de 0,06 kg P/ha/día.

4.2.5.4 Tasa de absorción de fósforo de los granos. Los datos de la absorción de fósforo acumulada de los granos se ajustaron a una regresión lineal para cada tratamiento, donde **Y** corresponde a la absorción acumulada de fósforo de los granos expresada en kg P/ha y **X** al tiempo expresado en días desde emergencia. En el Cuadro 18 se presentan los parámetros de la ecuación.

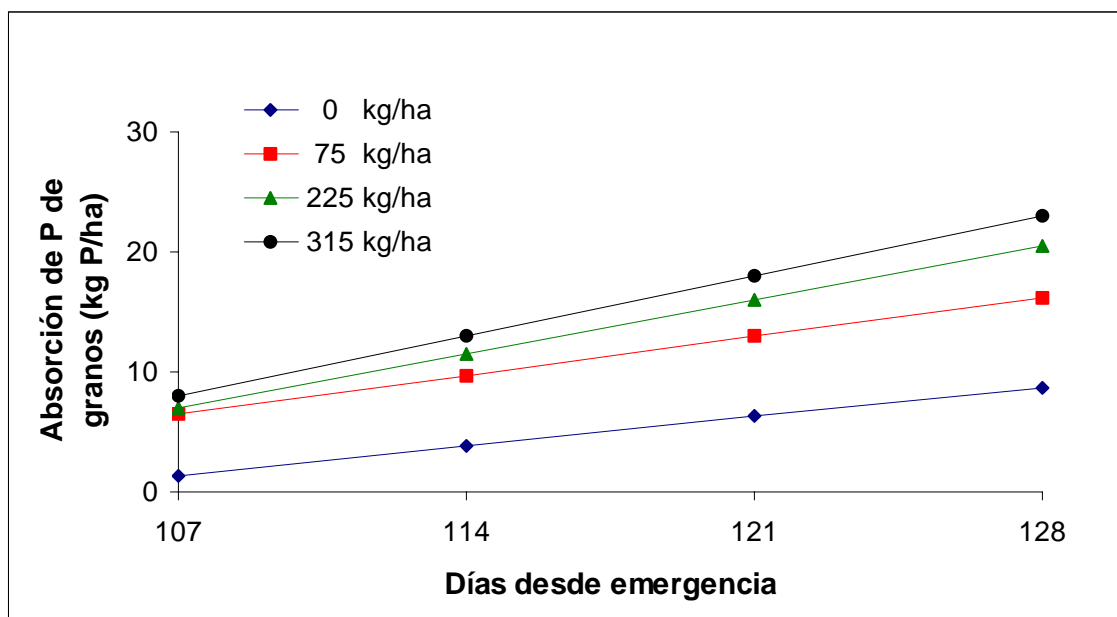
**CUADRO 18 Ecuación y parámetros del ajuste a una regresión lineal de la absorción de fósforo en granos para cuatro tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación Tratamiento P (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) A B Intercepto en X Sy.x R <sup>2</sup>	Y = A+B*X			
	1	2	3	4
	0	75	225	315
A	0,35	0,46	0,64	0,72
B	-35,91	-42,5	-61,79	-68,56
Intercepto en X	103	93	96	96
Sy.x	1,07	2,71	2,29	3,26
R <sup>2</sup>	0,89	0,68	0,85	0,78

Como el grano es el órgano receptor del P desde los órganos fuentes, las tasas de absorción de P se presentan constantes en el tiempo, independientemente de la fertilización fosforada.

Las tasas de acumulación de P de granos variaron entre 0,35 y 0,72 kg P/ha/día. El tratamiento con mayor aplicación de P presentó la tasa de absorción de P más alta, mientras que el tratamiento sin fertilización fosforada fue el que presentó la tasa más baja de absorción de P de granos. Por su parte, los tratamientos subóptimo y óptimo presentaron tasas de absorción de P de 0,46 y 0,64 kg P/ha/día. Los granos en promedio entre tratamientos, presentaron una tasa de absorción de 0,54 kg P/ha/día. A diferencia de los tallos, las espigas y las hojas, quienes presentaron en promedio tasas máximas de 0,22, 0,14 y 0,06 kg P/ha/día, respectivamente.





**FIGURA 35 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) sobre la absorción de fósforo en granos.**

4.2.5.5 Tasa de absorción de fósforo en la biomasa aérea de la planta. La absorción acumulada de fósforo en el total aéreo de la planta de trigo, fue ajustada a una regresión de tipo sigmoidea. En el Cuadro 19 se muestran los parámetros de la ecuación, donde **Y** corresponde a la absorción total de P y **X** al tiempo en días desde emergencia.

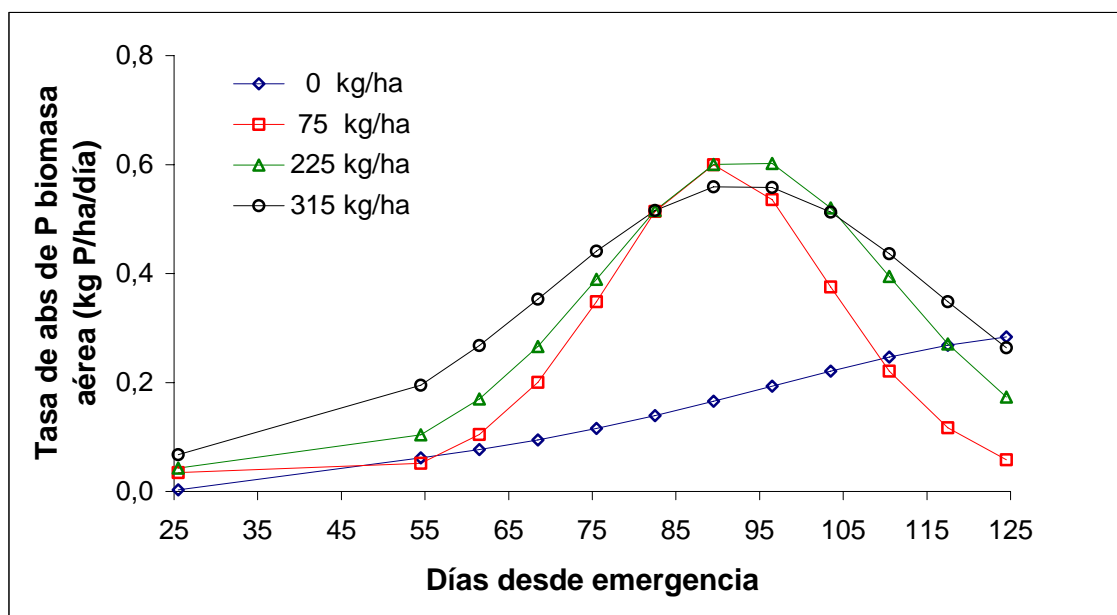
**CUADRO 19 Parámetros de ajuste a un modelo sigmoideo de la absorción total de fósforo para los tratamientos con fertilización fosforada.**

Ecuación	Y= Bottom + (Top-Bottom)/(1+exp((V50-X)/slope))			
	1	2	3	4
Tratamientos P (kgP <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	0	75	225	315
Bottom	-1,47	1,43	1,16	0,41
Top	31,32	24,02	32,02	39,81
V50	134	90	93	93
Slope	28,05	9,3	12,51	17
Sy.x	1,24	3,08	2,59	3,80
R <sup>2</sup>	0,93	0,92	0,94	0,91

En general las tasas de absorción de P fueron bajas al inicio de cultivo, aumentando en las siguientes semanas, hasta llegar a un máximo entre los 93 y los 100 días desde emergencia. Luego de alcanzar la máxima absorción de P, los tratamientos disminuyen sus tasas, hasta final de cosecha (Figura 36). Sin embargo, el tratamiento sin fertilización fosforada adoptó un comportamiento distinto hacia final de cosecha, presentando un máximo de absorción diario de P, en la última semana de desarrollo de cultivo. Comportamiento totalmente distinto al determinado por DASSE (2005), donde el tratamiento sin fertilización con P presentó la tasa máxima de absorción de P, una semana más tarde que los tratamientos óptimo y supraóptimo, para más tarde disminuir hacia cosecha.

El comportamiento adoptado por las plantas de trigo en el tratamiento sin fertilización con P, estaría sugiriendo una modificación en su ontogenia producto de que la cantidad de P absorbido por la planta de trigo, no estaría supliendo los requerimientos óptimos para su normal desarrollo.

Las tasas máximas de absorción de P variaron entre 0,28 y 0,60 kg P/ha/día. presentándose la tasa máxima más baja en el tratamiento sin adición de P (al momento de cosecha). Mientras que los tratamientos subóptimo y óptimo presentaron la tasa máxima más alta de absorción de P. La tasa máxima de absorción de P presentada en el tratamiento supraóptimo fue de 0,57 kg P/ha/día.



**FIGURA 36 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg  $P_2O_5$ /ha) sobre la tasa de absorción de fósforo en la biomasa aérea de la planta.**

Las absorciones diarias de P al momento de cosecha variaron entre 0,06 y 0,28 kg P/ha/día. El tratamiento que presentó la tasa más baja al momento de cosecha fue el subóptimo, mientras que la tasa de absorción de P más alta se determinó en el tratamiento sin adición de P. La tasa de absorción presentada en cosecha por el tratamiento supraóptimo fue levemente inferior a la presentada por el tratamiento sin adición de P. Por su parte, el tratamiento óptimo presentó una tasa de absorción total de 0,17 kg P/ha/día, al momento de cosecha.

**4.2.6 Translocación de fósforo en la parte aérea de la planta de trigo.** Al analizar las tasas de absorción de fósforo en hojas, tallos y espigas se determinó una pérdida de P o mejor dicho el traspaso de una fracción del P total acumulado hacia los granos, una vez iniciado su desarrollo (inicio de floración).

**CUADRO 20 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada sobre la translocación de fósforo (kg P/ha) estimada para distintos órganos de la planta hacia el grano.**

<b>Dosis kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha</b>	<b>Hojas</b>	<b>Tallos</b>	<b>Espigas</b>	<b>Total</b>
<b>0</b>	0,5	0,9	1,4	2,8
<b>75</b>	1,2	3,1	3,9	8,2
<b>225</b>	1,7	2,8	4,0	8,5
<b>315</b>	2,8	3,3	4,5	10,6

En el Cuadro 20 se muestra el P translocado por órgano y el total de la planta. En general mientras mayor fue la fertilización fosforada, mayor fue la cantidad de P translocado hacia los granos, debido a que a una menor disponibilidad de P en el suelo, menor va hacer el contenido de P absorbido en la planta. A su vez, los tratamientos fertilizados con P presentaron en promedio un translocado total 3,3 veces mayor al determinado en el tratamiento sin fertilización con P. Valores más alto de P translocado fueron determinados por DASSE (2005), donde el tratamiento que presentó la menor translocación (tratamiento sin fertilización con P), fue mayor al valor más alto de translocado determinado en el tratamiento supraóptimo en este estudio. Según DASSE (2005), el P translocado varió entre tratamientos de 12,9 a 19,4 kg P/ha, ordenándose en relación al nivel de fertilización en el suelo. La translocación de P determinada por DASSE (2005), en el tratamiento sin fertilización fosforada fue 4,6 veces mayor a la determinada en el tratamiento sin adición de P, en el presente estudio. A su vez, la translocación de P determinada en los tratamientos óptimo y supraóptimo, por DASSE (2005), fue prácticamente el doble que la determinada en los tratamientos óptimo y supraóptimo, en este ensayo.

En el Cuadro 21 se muestra la participación porcentual de cada órgano en el translocado total. En general, a medida que aumentó la fertilización de P, la participación de las espigas y tallos en el translocado total de P fue disminuyendo. En cambio la participación de las hojas en la translocación total de P fue aumentando con la mayor aplicación de P como fertilizante.

**CUADRO 21 Participación porcentual en la translocación de fósforo hacia el grano de los distintos órganos del trigo bajo distintas dosis de fertilización fosforada.**

Dosis Kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	%				
	Hojas	Tallos	Espigas	Translocación	Absorción directa
<b>0</b>	16,9	33,9	49,2	31,8	68,2
<b>75</b>	14,1	37,7	48,2	50,7	49,3
<b>225</b>	20,2	32,9	46,9	41,4	58,6
<b>315</b>	26,2	31,0	42,7	45,9	54,1

Las espigas fueron los órganos que presentaron la mayor translocación de P hacia los granos, presentando una participación mayor al 40% del total de P translocado en la planta. Por su parte, las hojas fueron las que presentaron el menor movimiento de P hacia los granos, con una participación que no superó el 26,2% del total translocado. Un comportamiento totalmente distinto fue determinado por DASSE (2005), en la translocación de P, donde las hojas fueron los órganos que presentaron la mayor participación en el translocado total de P, mientras que las espigas fueron las de menor participación. Las hojas en promedio presentaron una participación de un 45,8%, seguidos por los tallos con un 39,2% y por último las espigas, con una participación en promedio de un 15,0%, entre tratamientos (DASSE, 2005).

En este estudio, del fósforo total presente en granos al momento de cosecha, menos del 51% corresponde a P translocado desde los órganos fuentes. A diferencia de lo descrito por DASSE (2005), quien determinó al momento de cosecha, una participación de los órganos fuente en el contenido total de P presente en granos, mayor al 74%.

**4.2.7 Tratamiento óptimo de fertilización fosforada.** Las distintas dosis de P aplicadas como tratamiento permitieron alcanzar distintos niveles de P disponibles en el suelo. Al relacionar los rendimientos de granos obtenidos en cosecha en función de la dosis de P aplicada, se determinó que esta relación se ajusta al modelo de

Mitscherlich, usual para determinar la respuesta de un cultivo a la fertilización fosforada (MENSTED y PECK, 1978).

**CUADRO 22 Regresión no lineal de tipo Mitscherlich para los rendimientos de grano en trigo.**

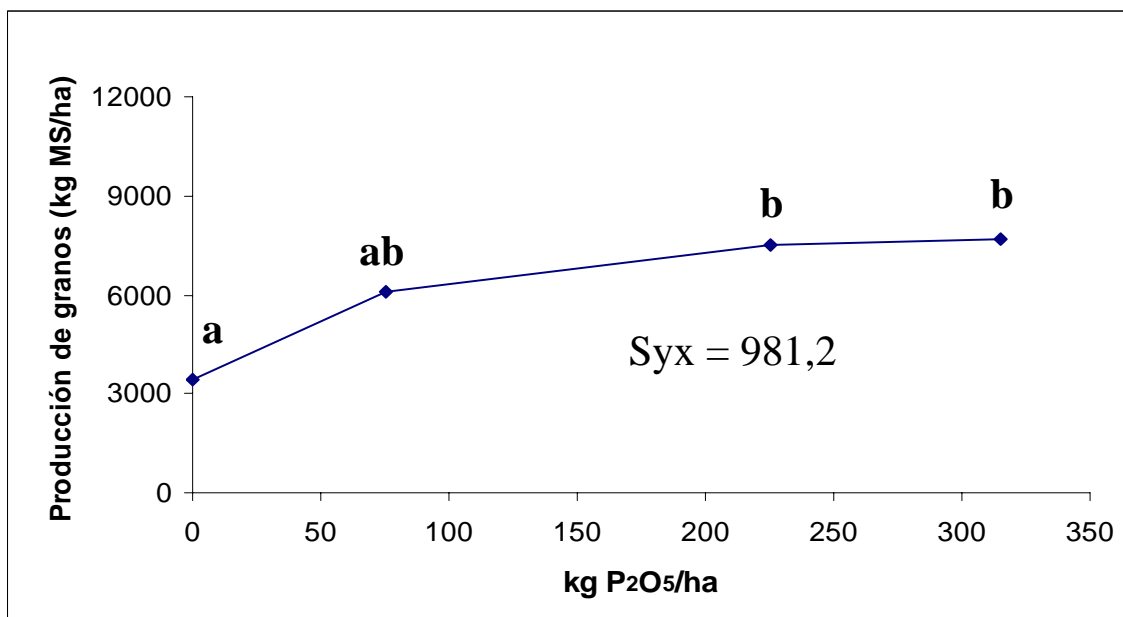
Ecuación	Span	k	R <sup>2</sup>	Sy.x
$Y = \text{Span} \cdot (1 - \exp(-k \cdot X)) + \text{Bottom}$	4331	0,01285	0,81	981,2

En la ecuación **Y** corresponde al rendimiento de granos expresados en kg MS/ha y **X** corresponde a las distintas dosis (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) aplicados a cada tratamiento inicialmente.

La ecuación de Mitscherlich describe un efecto positivo del P en la productividad del cultivo, y de acuerdo a esta función el tratamiento de fertilización fosforada óptima no se diferencia del tratamiento de mayor fertilización en la producción de granos (Figura 37).

Para poder determinar el tratamiento óptimo en la ecuación de Mitscherlich es necesario establecer una relación de costos, definiendo de esta forma un punto en la curva donde se calcula una dosis óptima económica (DOE). Para determinar este punto se derivó la ecuación de Mitscherlich y se reemplazo en **Y** por la relación precio de una unidad de fertilizante fosforado y precio venta de un quintal de grano de trigo. Para este estudio se asumió un precio de 182 pesos el kg de superfosfato triple y de 9537 pesos el precio de venta del quintal de trigo (precio de agosto del 2006). De esta forma se obtuvo finalmente una dosis óptima económica de 202 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (435 kg de SPT), que es equivalente en este tipo de suelo a subir de 10,9 a 18 ppm P-Olsen.

Si bien para este estudio no hubo una dosis 202 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, la más cercana correspondió al tratamiento de fertilización media (225 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha), es por esto que este tratamiento se considera como óptimo para poder determinar los parámetros de fertilización.



**FIGURA 37** Ajuste a una regresión no lineal de tipo Mitscherlich de los rendimientos del cultivo de trigo bajo cuatro dosis de fertilización fosforada.

**4.2.8 Parámetros de fertilización racional del cultivo de trigo.** Para poder determinar una fertilización fosforada razonada, se requiere conocer los parámetros del cultivo incluido en la demanda de fósforo, como son: índice de cosecha (IC), humedad de cosecha (HC) y requerimiento interno de fósforo (RIP). Estos parámetros se miden al momento de cosecha del cultivo. También es necesario conocer la eficiencia de fertilización fosforada, que esta determinada por el factor de retención de fósforo del suelo (FCO, kg P/ha/ppm P-Olsen) y el coeficiente de absorción de fósforo del cultivo (kg P absorbido/ha/ppm P-Olsen). Este parámetro se evalúa en función del tratamiento óptimo de fertilización fosforada desde ensayos de campo.

**4.2.8.1 Índice de cosecha.** El índice de cosecha es la relación existente entre el producto de cosecha (grano) y el total de la biomasa aérea producida al momento de cosecha. Para evaluar la evolución de los índices de cosecha estos fueron medidos durante los últimos cuatro muestreos.

En general las mayores diferencias en el índice de cosecha, entre tratamientos fueron determinadas en las primeras semanas de evaluación, donde los tratamientos subóptimo y supraóptimo presentaron diferencias significativas con el tratamiento sin adición de P. Al momento de madurez fisiológica no existieron mayores diferencias en los índices de cosecha, entre tratamientos (Cuadro 23).

**CUADRO 23 Variación de los índices de cosechas del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada.**

IC	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	IC			
		Días			
		107	114	121	128
	0	9,8 ± 0,79 a	16,6 ± 1,15 a	28,7 ± 0,93 a	38,1 ± 0,75 a
	75	12,1 ± 0,93 ab	19,5 ± 0,58 b	30,7 ± 0,89 b	40,4 ± 2,40 a
	225	11,8 ± 0,96 ab	18,3 ± 0,75 ab	30,0 ± 0,65 ab	40,4 ± 2,54 a
	315	12,6 ± 1,20 b	18,7 ± 0,65 b	30,6 ± 0,47 ab	39,0 ± 1,90 a

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

Los índices de cosecha variaron entre 38 y 40 % al momento de cosecha. Índices muchos más altos fueron determinados por DASSE (2005), los cuales variaron entre 49 y 46%. La menor participación de los granos en la materia seca total, se debe principalmente a la mayor participación de tallos en la planta, encontrándose relaciones de productividad de materia seca entre tallos y granos cercanas a uno.

Según lo determinado por DASSE (2005), la productividad de los granos en promedio entre tratamientos fue 1,4 veces mayor a la productividad promedio de tallos, al momento de cosecha. A diferencia de este estudio, donde la relación de productividad entre granos y tallos al momento de cosecha, fue igual a uno (promedio entre el total de los tratamientos evaluados). Si bien en este ensayo, la participación de los granos es menor a la determinada por DASSE (2005), la productividad en kilogramos de granos por hectárea de los tratamientos fertilizados con P, fue similar en ambos estudio. Sin embargo, en este estudio, existió una mayor producción de tallos al final de cosecha, afectando de esta forma la participación de los granos en el total de la planta.



**CUADRO 24 Variación en el tiempo de los índices de cosechas del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada.**

IC	Días	IC			
		Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)			
		0	75	225	315
	<b>107</b>	9,8 ± 0,79 a	12,1 ± 0,93 a	11,8 ± 0,96 a	12,6 ± 1,20 a
	<b>114</b>	16,6 ± 1,15 b	19,5 ± 0,58 b	18,3 ± 0,75 b	18,9 ± 0,65 b
	<b>121</b>	28,7 ± 0,93 c	30,7 ± 0,89 c	30,0 ± 0,65 c	30,7 ± 0,47 c
	<b>128</b>	38,1 ± 0,75 d	40,4 ± 2,40 d	40,4 ± 2,54 d	39,0 ± 1,90 d

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

Existieron diferencias significativas en el tiempo de los índices de cosecha para todos los tratamientos (Figura 24). Estas diferencias nos estarían indicando el rápido llenado que se produce en los granos durante el último mes de desarrollo del cultivo.

4.2.8.2 Índice de extracción de fósforo. El índice de extracción de fósforo (IEF) corresponde a la proporción de fósforo absorbido por el producto cosechado (grano), respecto al total de fósforo absorbido por la planta al momento de cosecha. Al igual que el índice de cosecha el índice de extracción de fósforo fue medido en los últimos cuatro muestreos.

En general, las mayores diferencias entre tratamientos se determinaron a inicio de la evaluación de extracción de P, donde los tratamientos fertilizados presentaron diferencias estadísticas con el tratamientos sin adición de P. Mientras que en las últimas dos evaluaciones de extracción de P, no existieron mayores diferencias entre tratamientos (Cuadro 25).

A los 128 días de emergencia (último muestreo) el índice de extracción de fósforo varió entre 65,8 y 70,4%. Esta información es muy útil, sobre todo para la siguiente fertilización fosforada, dado a que sabemos la cantidad de fósforo que sale del sistema y por lo tanto sabemos la cantidad de fósforo que tendremos que reponer al suelo para mantener los niveles de P que permitieron tales rendimientos.

**CUADRO 25 Variación de los índices de extracción de fósforo del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada.**

	Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	IEF %			
		Días			
		107	114	121	128
IEF	0	22,6 ± 1,84 a	37,5 ± 0,40 a	53,8 ± 2,68 a	67,9 ± 3,39 a
	75	30,2 ± 2,03 b	43,8 ± 1,48 b	54,1 ± 1,14 a	70,4 ± 3,17 a
	225	27,8 ± 1,21 ab	43,1 ± 1,57 b	52,1 ± 2,33 a	70,2 ± 4,34 a
	315	30,2 ± 3,28 b	39,1 ± 3,00 ab	53,4 ± 4,62 a	65,8 ± 3,94 a

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

En un estudio realizado por CALDERINI y MONASTERIO, (2003), se analizaron tres genotipos de trigo en dos fechas de siembras distintas, presentaron índice de extracción de P que variaron entre 53,3 y 77,9%. Los IEF en el cultivar Otto-B presentados por DASSE (2005) variaron entre 80 y 82%, siendo extracciones más altas que las determinadas en este estudio. Por su parte, WALDREN y FLOWERDAY (1979), determinaron que al momento de cosecha de madurez del trigo, el grano producido lleva consigo alrededor del 75 % del fósforo total absorbido por el cultivo.

Si bien en este estudio se presentaron valores más bajos de IEF que los determinados por DASSE (2005). La cantidad de P determinado en granos de los tratamientos con fertilización fosforada, al momento de cosecha, fue similar al contenido de P determinado en granos, por DASSE (2005), en la última colecta. Sin embargo, en este estudio se determinó un mayor contenido de P en hojas y tallos, disminuyendo la participación del P de los granos, en el P total de la parte aérea de la planta.

Al igual que en el índice de cosecha, el índice de extracción de fósforo presentó diferencias estadísticamente significativas en el tiempo (Cuadro 26), mostrando el rápido llenado de P que se produce en los granos trigos durante las últimas semanas de desarrollo del cultivo.

**CUADRO 26 Variación en el tiempo de los índices de extracción de fósforo del cultivo de trigo para distintas dosis de fertilización fosforada.**

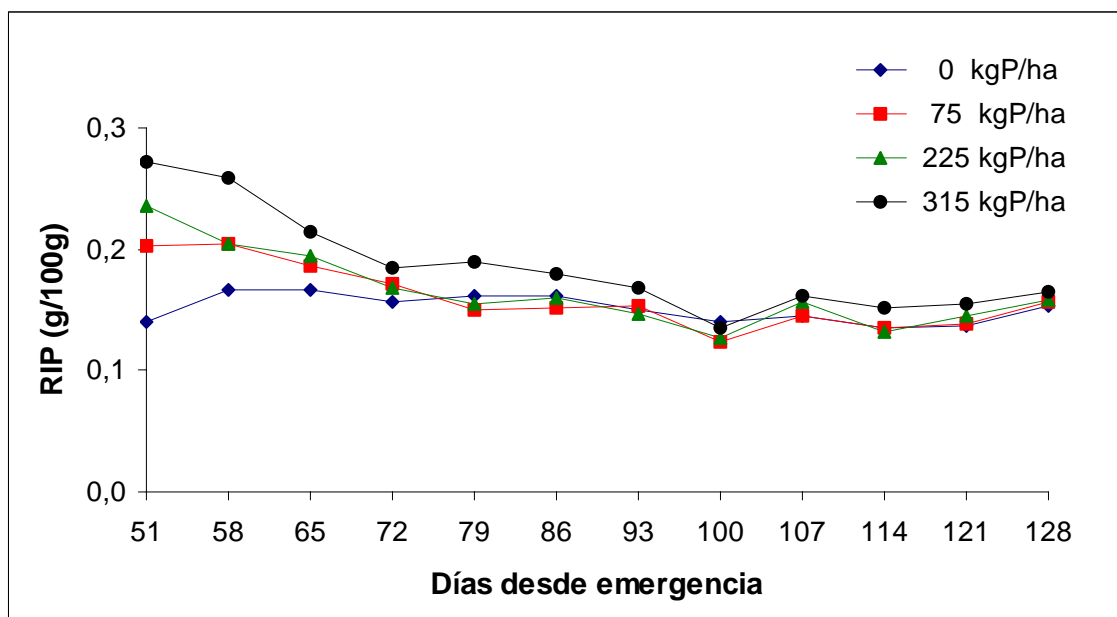
	Días	IEF %			
		Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)			
		0	75	225	315
IEF	107	22,6 ± 1,84 a	30,2 ± 2,03 a	27,0 ± 1,21 a	30,2 ± 3,28 a
	114	37,5 ± 0,40 b	43,8 ± 1,48 b	43,1 ± 1,57 b	39,1 ± 3,00 a
	121	53,8 ± 2,68 c	54,1 ± 1,14 c	52,1 ± 2,33 c	53,4 ± 4,62 b
	128	67,9 ± 3,39 d	70,43 ± 3,17 d	70,2 ± 4,34 d	65,8 ± 3,94 c

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

4.2.8.3 Requerimiento interno de fósforo. Requerimiento interno de fósforo es la concentración mínima de P en la biomasa total del cultivo. Este parámetro se expresa en porcentaje de la biomasa total producida para obtener la demanda de P.

En general los tratamientos fertilizados con fósforo presentaron una disminución en el requerimiento interno de P, durante todo el desarrollo del cultivo, mientras que el tratamiento sin adición de P se mantuvo relativamente constante (Figura 38). A diferencia de lo descrito por DASSE (2005), quien luego de la primera semana de muestreos determinó un aumento del requerimiento interno, el cual se mantiene hasta floración, para luego disminuir hacia cosecha.

El requerimiento interno presentado en floración varió entre tratamiento desde 0,15 a 0,18 %. El tratamiento subóptimo fue el que presentó el requerimiento interno más bajo, mientras que el tratamiento supraóptimo presentó el requerimiento interno más alto, al momento de floración. Los tratamientos óptimo y sin aplicación de P presentaron requerimiento similares de P, al momento de floración (0,16%). Requerimiento interno de P más altos fueron determinados por DASSE (2005), al momento de floración, cuyos valores variaron de 0,23 a 0,26%.



**FIGURA 38** Variación del requerimiento interno de fósforo (g/100g) durante el periodo de acumulación de biomasa del trigo bajo cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Al término del cultivo, el requerimiento interno de P varió entre 0,15 y 0,16%, presentándose el menor valor en el tratamiento sin fertilización fosforada. El requerimiento interno de P de los distintos tratamientos, concuerda con lo descrito por RODRÍGUEZ (1993), quien determinó un requerimiento interno de fósforo de 0,17% para el cultivo de trigo.

4.2.8.4 Factor de demanda de fósforo. En el cálculo de la demanda de P una vez obtenido el requerimiento interno, la humedad de cosecha y el índice de cosecha, se ha sugerido la utilización de un sólo factor que englobe estos parámetros (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001). De esta forma se puede calcular la demanda de P multiplicando el rendimiento de granos por un solo factor de demanda. Este factor, se calculó en base a los parámetros medidos en la cosecha del cultivo para todos los tratamientos. Los valores mostrados en el Cuadro 27, fueron calculados usando el valor de RIP respectivo de cada tratamiento y el RIP del tratamiento óptimo obtenido (0,16%). Se muestra que el factor de demanda de P no presentó diferencias

estadísticas entre los tratamientos, tanto al usar el RIP respectivo de cada tratamiento, como al utilizar el del tratamiento óptimo. En el estudio realizado por DASSE (2005), tampoco encontró diferencias significativas en el factor de demanda de P entre los distintos tratamientos.

Para determinar la demanda de P, según lo descrito por DASSE (2005) y lo determinado en este estudio, sólo se necesitaría conocer la productividad alcanzar como variable independiente y el factor de demanda de P.

**CUADRO 27 Efecto de distintas dosis de fósforo sobre el factor de demanda de P, utilizando el RIP de cada tratamiento y el RIP del tratamiento óptimo.**

Dosis (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)	Factor de demanda							
	RIP				RIP óptimo			
<b>0</b>	0,34	±	0,025	a	0,35	±	0,007	a
<b>75</b>	0,33	±	0,005	a	0,33	±	0,020	a
<b>225</b>	0,33	±	0,007	a	0,33	±	0,020	a
<b>315</b>	0,35	±	0,021	a	0,34	±	0,016	a

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

Los valores del factor de demanda son ligeramente más altos que los observados por DASSE (2005) quien determinó como promedio un valor de 0,31 como factor de demanda. Por su parte RODRÍGUEZ *et al.*, (2001), determinaron un factor de demanda de 0,32 por cada 100 gramos de granos de trigo producido, para el cultivo con una fertilización fosforada óptima.

**4.2.9 Eficiencia de recuperación de fósforo.** La eficiencia de recuperación de P corresponde a la cantidad de P recuperada por el cultivo desde el P del suelo más el P aplicado como fertilizante. Para ello se considera que existe una transformación del P aplicado a ppm P-Olsen de acuerdo al factor de conversión a P-Olsen del suelo (FCO). Esta cantidad representa la cantidad necesaria de P a aplicar para subir 1 ppm P-Olsen inmediatamente después de la aplicación y representa una medida de la disponibilidad del P aplicado (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001). Además, es necesario determinar el factor de absorción de P del cultivo (FAPC). Este factor indica la cantidad

de P posible de absorber por el cultivo en una hectárea por cada ppm P-Olsen disponible en el suelo. Combinando ambos parámetros se obtiene la eficiencia de recuperación de P de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$EfRecP = FCO(kgP/ha/ppmP-Olsen) * FAPC(ppmP-Olsen/kgP/ha)$$

En este estudio se consideró que la capacidad del suelo de retener o entregar el P a las raíces de las plantas correspondió a un valor de CP o capacidad de retención de P de 0,11 ppm/ppm, en base al valor determinado del aluminio de 900 ppm. Considerando una profundidad de muestreo de 20 cm y una densidad aparente de 0,7 g cm<sup>-3</sup>, el factor de retención de P (FCO) fue de 12 (kg P/ha aplicados/ppm P-Olsen) y con el valor de FAPC calculado en este estudio se obtuvieron los valores de eficiencia de recuperación de P (Cuadro 28).

**CUADRO 28 Efecto de distintas dosis de fósforo sobre el factor de absorción de P (FAPC) y la eficiencia de recuperación de fósforo.**

Dosis kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha	P inicial (ppm)	P final (ppm)	Absorción P (kg P/ha)	FAPC	ERP (%)
0	7,4	7,4	13,8	1,9	15,5
75	10,4	13	23,6	1,8	15,1
225	10,9	19	30,1	1,6	13,2
315	13,8	26	36,3	1,4	11,6

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

En el Cuadro 28 podemos ver que la eficiencia de recuperación de fósforo fue menor a medida que se aumentó la fertilización fosforada. El tratamiento con una fertilización fosforada optima (225 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha), presentó una eficiencia de recuperación de fósforo de 13,2%, siendo más alta que la determinada por DASSE (2005), quien calculó una eficiencia de 10,7% en el tratamiento de fertilización óptima. Por su parte, RODRÍGUEZ, *et al.* (2001), determinaron una eficiencia de recuperación de fósforo de un 11,0% para un suelo trumao como la serie de Valdivia.

**4.2.10 Eficiencia interna del uso de fósforo por el cultivo de trigo.** La eficiencia de uso de fósforo corresponde a los kg MS/ha producidos por el cultivo en relación a los kg de P absorbido por hectárea en el total de la planta sin considerar las raíces de las plantas, las cuales obviamente participan como parte de la absorción.

**CUADRO 29 Efecto de distintas dosis de fósforo (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) en la eficiencia de uso de P (UEP) en tres estados fenológicos distintos.**

<b>Tratamientos (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)</b>	<b>Primera colecta (día 51) 3 - 4 hojas (kg MS /ha / kg P/ha)</b>	<b>Floración (día 86) Antesis (kg MS /ha / kg P/ha)</b>	<b>Última colecta (día 128) Madurez fisiológica (kg MS /ha / kg P/ha)</b>
<b>0</b>	716,4 ± 44 c	622,5 ± 55 ab	655,3 ± 46 a
<b>75</b>	496,5 ± 47 b	661,6 ± 25 b	636,3 ± 29 a
<b>225</b>	424,5 ± 6 ab	627,3 ± 25 ab	636,4 ± 34 a
<b>315</b>	371,5 ± 40 a	555,8 ± 35 a	609,9 ± 31 a

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

En el Cuadro 29 se muestra que, en el primer muestreo existió una mayor eficiencia de uso de fósforo en las plantas de trigo de los tratamiento con menor disponibilidad de P (subóptimo y sin aplicación de P). Durante la semana de floración (día 86 desde emergencia) sólo se observaron diferencias significativas entre el tratamiento subóptimo y supraóptimo. Finalmente, al momento de cosecha no se presentaron mayores diferencias entre los tratamientos evaluados, en la eficiencia de uso de P. La mayor eficiencia de uso de P por parte de los tratamientos con menor disponibilidad de P, al inicio de colecta, también fue descrito por DASSE (2005), presentando valores de eficiencia entre 302 y 549 kg MS/kg P. Mientras que la eficiencia de uso de P en cosecha variaron desde 647 a 687 kg MS/kg P, no existiendo diferencia estadísticas entre tratamiento (DASSE, 23005). Al inicio de desarrollo del cultivo, las plantas con menor disponibilidad de P son más eficientes en el uso del P para su crecimiento, pero a mediada que avanza el cultivo hacia madurez fisiológica, la eficiencia de uso de P, no presenta mayores diferencias, con los distintos niveles de fertilización fosforada.

## 5 CONCLUSIONES

- Los niveles de P en el suelo determinaron la producción de materia seca acumulada y la tasa de crecimiento de los distintos órganos del cultivo de trigo desde niveles deficientes a niveles óptimos. Los tratamientos fertilizados con fósforo, presentaron crecimientos superiores al doble de crecimiento determinado en el tratamiento sin aplicación de fósforo, durante todo el desarrollo del cultivo. Además, afectó la distribución de las tasas de crecimientos de hojas, tallos y espigas. Presentando el tratamiento sin adición de P un retraso en el máximo crecimiento diario y en la movilización de carbohidratos solubles desde los órganos fuentes hacia los granos.
- La fertilidad fosforada del suelo afectó la fenología de la absorción y de la translocación del P del cultivo de trigo. Los tratamientos con fertilización fosforada alcanzaron el 50 y el 100% del fósforo total absorbido, dos semanas antes que el tratamiento sin fertilización fosforada. De esta forma, los tratamientos fertilizados con fósforo alcanzaron una tasa máxima de absorción antes que el tratamiento sin aplicación de P. Además, el tratamiento sin aplicación de fósforo, transloca el fósforo desde las hojas, tallos y espigas más tarde que en los tratamientos fertilizados con fósforo.
- La fertilidad fosforada del suelo afectó la translocación de fósforo desde los órganos fuentes (hojas, tallos y espigas) hacia el órgano destino (grano). Esta varió entre 32 y 51%, presentando los tratamientos fertilizados con fósforo una mayor movilización de fósforo desde los órganos fuentes que el tratamiento sin aplicación de fósforo.
- No se determinó un efecto significativo de la fertilización fosforada en el índice de cosecha y en el índice de extracción de P, al término del cultivo. El tratamiento óptimo presentó un índice de cosecha de 40% y un índice de extracción de P de 70%, en cosecha final.



- La fertilidad fosforada del suelo afectó el requerimiento interno durante las primeras semanas de cultivo. Sin embargo, en la cosecha final los cultivos presentaron un requerimiento interno común e independiente de la fertilidad fosforada que varió de 0,15 y 016%, presentando el valor más bajo el tratamiento sin fertilización fosforada.
  
- La eficiencia de absorción de P del cultivo (FAPC) y la eficiencia de recuperación de fósforo determinados para el cultivo de trigo, disminuyeron a medida que las dosis de fertilidad fosforada del suelo fue más alta. Los valores FACP variaron entre 1,9 y 1,4 kg P absorbidos/ppm P-Olsen. La eficiencia de recuperación de P varió entre 15,5 y 11,6%. El tratamiento óptimo de fertilización fosforada presentó un FAPC de 1,6 kg P absorbidos/ppm P-Olsen y una ERP de 13,2%.
  
- Se determinó que en plantas de trigo con niveles bajos de P en el suelo, presentan una mayor eficiencia de uso de P, en sus primeros estados de desarrollo, que las plantas con niveles altos de fósforo en el suelo. Sin embargo, durante las últimas semanas de desarrollo del cultivo, no se presentan diferencias significativas en la eficiencia de uso de fósforo entre tratamientos.

## 6 RESUMEN

En la estación experimental de campo Santa Rosa en Valdivia, se realizó un ensayo para evaluar la respuesta de un cultivar de trigo alternativo (variedad Otto B), a distintos niveles de disponibilidad de fósforo en el suelo. Se planteó como objetivo determinar la variación producida por los distintos niveles de fertilización fosforada en el suelo sobre parámetros del cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) relacionados con la demanda de nutrientes como producción de materia seca y absorción de P a través del índice de cosecha (IC), índice de extracción de P a cosecha (IEF) y requerimiento interno de fósforo (RIP). Se determinaron las tasas de crecimiento y las tasas de absorción de fósforo para cada órgano de la planta, la eficiencia de absorción de fósforo y la eficiencia interna de uso de fósforo (EUP) y la translocación de fósforo hacia el grano. Se diseñaron tres dosis de fósforo para ser aplicados al suelo como fertilización para obtener un nivel deficiente de fósforo en el suelo (subóptimo), una dosis óptima de fósforo en el suelo y una dosis de P supraóptima. Las dosis de P en los distintos tratamientos fueron de 0, 75, 225 y 315 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha, distribuidos en tres bloques completamente al azar. En cada parcela se realizaron cortes del material vegetal semanalmente, desde 3-4 hojas verdaderas hasta su madurez fisiológica. Todos los resultados fueron analizados estadísticamente a través de AnDeva y pruebas de Tukey para la separación de medias. En la descripción de las curvas de producción de materia seca y de absorción de fósforo, se ajustaron curvas por regresión lineal y no lineal usando el programa estadístico GraphPad Prism v. 4.0. Se concluye que al final de cosecha los distintos niveles de fertilidad fosforada no variaron estadísticamente el IC, IEF y RIP y por lo tanto, serían parámetros constante en la determinación de una dosis racional de fósforo. La eficiencia de absorción de fósforo del cultivo de trigo en el tratamiento óptimo fue de 1,6 kg P absorbidos/ppm P-Olsen, dando una eficiencia de recuperación de fósforo de 13,2%. La translocación de fósforo presentado en las plantas de los distintos tratamientos, no superó el 51% del fósforo total presentado en granos, al momento de cosecha. Las plantas de trigo con deficiencia de fósforo durante las primeras semanas de su desarrollo presentaron una mayor eficiencia de uso de P, que las plantas con disponibilidad óptima y supraóptima de P en el suelo, mientras que

en las últimas semanas no se presentaron mayores diferencias en la eficiencia de uso de fósforo entre tratamientos.

## SUMMARY

In order to evaluate the response of wheat (variety Ottop B) to different levels of phosphorus availability in the soil, a field assay was carried out. The assay was performed at Santa Rosa Experimental Station, nearby Valdivia. The objective was to assess the effect of different levels of soil P over dry matter production, P absorption and other secondary crop variables, such as harvest index (IC), P extraction index at harvest (IEF) and P internal requirement (RIP). Growth rates and P absorption rates for each plant organ were also estimated. Moreover the P absorption efficiency, P use efficiency (EUP) and the P translocation to the sinks were calculated. The experimental design comprises three different fertilizer-P rates that were applied to the soil in order to obtain under optimal, optimal, and over-optimal soil P levels. Given that there was also a treatment where no P was applied to the soil, the rates were 0, 75, 225 and 315 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per hectare and were distributed in a randomised blocks design. Vegetal material was harvested weekly from every plot starting at the stage of 3-4 leaves until physiological maturity. The results were analysed by means of an Analysis of Variance and Tuckey test for separation between means. The dry matter production and P absorption curves were described mathematically by means of linear and non-linear regression using GraphPad Prism v. 4.0. It is concluded that IC, IEF, RIP were not affected by the different P levels in a statistically significant way and therefore they could be considered conservative when calculating a fertilizer-P rate with the rational approach. The P absorption efficiency for the wheat crop growing with an optimum P level was 1,6 kg P absorbed / mg kg<sup>-1</sup> Olsen P and the corresponding P recovery efficiency (ERP) was 13,2%. P translocation, measured at harvest, did not account for more than 51% of total P content in the grains for any of the treatments. Wheat plants growing under restricted P conditions (0 and 75 kg P ha<sup>-1</sup>) showed a greater EUP than the other treatments during the first 7 weeks, but this effect was attenuated later on as the growing season advanced.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- BARRIGA, P. 1974. Índice de cosecha en trigo de primavera. *Agro Sur (Chile)* 2 (1): 17-20.
- BARRIGA, P., MILICEVIC, X., PROSCHLE, A. 1995. Vigor híbrido y capacidad combinatoria para contenido y eficiencia de utilización de fósforo en trigo. *Agro Sur. (Chile)* 23 (1): 21-29.
- BARRIGA, P., FUENTEALBA, J., MANQUIAN, N. 1998. Capacidad de absorción de fósforo en genotipos de trigo. *Agro Sur. (Chile)* 26 (1): 1-10.
- BATTEN, G. 1992. A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and Soil.* 146: 163-168.
- BATTEN, G. 1994. Concentrations of elements in wheat grains grown in Australia, North America, and the United kingdom. *Australian Journal of Experimental Agriculture.* 34: 51-56.
- BAUER, A., FRANK, A., BLACK, A. 1987 b. Aerial parts of hard red spring wheat. II. Nitrogen and phosphorus concentration and content by plants development stage. *Agronomy Journal (Estados Unidos)* 79: 852-858.
- BAUER, A. FRANK, A., BLACK, A. 1987 c. Aerial parts of hard red spring wheat. III. Nitrogen and phosphorus concentration and content in Kernels, anthesis to ripe stage. *Agronomy Journal (estados Unidos)* 79: 859-864.
- BELANGER, G., RICHARDS, J. 1999. Relationship between P and N concentrations in timothy. *Canadian Journal of Plant Science.* 79: 65-70.

- BOATWRIGHT, G., HAAS, H. 1961. Development and composition of spring wheat as influenced by nitrogen and phosphorus fertilization. *Agronomy Journal* (Estados Unidos) 53: 33-36.
- CALDERINI, D., MONASTERIO, I. 2003. Are synthetic hexaploids a means of increasing grain element concentrations in wheat?. *Euphytica*. 134: 169-178.
- CAMPBELL, C., CUTFORTH, H., SELLES, F., DEPAUW, R., CLARKE, J. 1990. Dynamics of dry matter; N and P accumulation in the developing kernels of four spring wheat cultivars for irrigation and dryland. *Canadian Journal of Plant Science*. 70: 1043-1056.
- CHILE, FUNDACION PARA LA INNOVACIÓN AGRARIA (FIA). 2003. FIA llama a postular al premio a la innovación agraria. (On line). Boletín FIA. <<http://www.fia.cl/difus/boletin/bolfia/bjulio2003.pdf> > (10 agosto 2006).
- CLARKE, J., CAMPBELL, C., CUTFORTH, H., DEPAUW, R., WINKLEMAN, G. 1990. Nitrogen and phosphorus uptake, translocation, and utilization efficiency of wheat in relation to environment and cultivar yield and protein levels. *Canadian Journal of Plant Science*. 70: 965-977.
- DASSE, G. 2005. 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. 126 p.
- EGLE, K., MANSKE, G., RÖMER, W., VLEK, P. 1999. Improved phosphorus efficiency of three new wheat genotypes from CYMMIT in comparison with an older Mexican variety. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 162: 353-358.

- ELLIOT, D., REUTER, D., REDDY, G., ABBOT, R. 1997 a. Phosphorus nutrition of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) 1. Effect of phosphorus supply on plant symptoms, yield, components of yield, and plant phosphorus uptake. Journal Agriculture Research (Australia) 48: 855-867.
- ELLIOTT, D., REUTER, D., REDDY, G., ABBOT, R. 1997 b. Phosphorus nutrition of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) 2. Distribution of phosphorus in glasshousegrown wheat and the diagnosis of phosphorus deficiency by plant analysis. Australian Journal Agriculture Research (Australia) 48: 869-881
- ELLIOTT, D., REUTER, D., REDDY, G., ABBOT, R. 1997 c. Phosphorus nutrition of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) 3. Effect of plant nitrogen status and genotype on the calibration of plant test for diagnosis phosphorus deficiency. Australian journal Agriculture Research (Australia) 48: 883-897.
- FAIGUENBAUM, H. 1987. Producción de cultivos en Chile. Santiago, Chile. Publicitaria Torrelodones Ltda. 332 p.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION., FAO, 2002. Bread Wheat:Improvement and production. Roma, 554 p.
- GREENWOOD, D., DRAYCOTT, A. 1995. Modelling uptake of nitrogen, phosphate and potassium in relation to crop growth. In: Kabat P; Marshall B.; Van der Brock B.J.; Vos J. Van Keulen H. (eds.). 1995. Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system. A comparison of potato growth models. Amsterdam, Holanda. Pp: 155-175.
- GREGORY, P., CRAWFORD D., MCGOWAN, M. 1979 a. Nutrient relations of winter wheat. 1. Accumulation and distribution of Na, K, Ca, Mg, P, S y N. Journal Agriculture Science 93: 485-494.

- GREGORY, P., CRAWFORD D., MCGOWAN, M. 1979 b. Nutrient relations of winter wheat. 2. Movement of nutrients to the root and their uptake. *Journal Agriculture Science* 93: 485-494.
- HEUN, M., SCHAFFER-PREGL, R., KLANAN, D., CASTAGNA, R., ACCERBI, M., BORGHI, B., SALAMINI, F. 1997. Site of Einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting. *Science*, 278: 1312-1314.
- HUBER, A. 1970. Diez años de observaciones climatológicas en la Estación Teja-Valdivia (Chile) 1960- 1969. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Austral de Chile. 46 p.
- INGLETT, G. 1974. *Wheat: Production and Utilization*. Inc. Westport, Connecticut, Estados Unidos. The Avi Publishing Company. 500 p.
- INSTITUTO DE INVESTIGACION DE RECURSOS NATURALEZ, CORPORACION DE FOMENTO y UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE. 1978. Estudio de suelos de la provincia de Valdivia. Santiago, Chile. 178 p.
- KIRBY, E., APPELYARD, M., SIMPSON, N. 1994. Coordination of stem elongation and Zadoks growth stage with leaf emergence in wheat and barley. *Journal Agriculture Science*, 122: 21-29.
- MENGEL, K., KIRKBY, E. 1982. *Principles of Plant Nutrition*. International Potash Intitute. Alemania. 655 p.
- MENSTED, S., PECK, T. 1978. *Soil Testing: Correlating and interpreting the analytical results*. Madison, Estados Unidos. ASA Special Publication, 117 p.
- MELLADO, M. 1998. Análisis del cultivo del trigo en Chile durante el siglo veinte. *Agricultura Técnica (Chile)* Vol. 58 N° 3: 231-240.



- MELLADO, M. 2001. Capitulo XII, Cereales: Trigo, centeno y triticale. Agenda del Salitre. Soquimich Comercial, Santiago, Chile, pp. 553-559.
- MONTALDO, P., FUENTES, R. 1980. Caracterización térmica y fotoperiódica para el área de Valdivia, Chile. *Agro Sur* 8 (Chile) (2): 94 -100.
- MONTALDO, P. 1983. Características climáticas de la ciudad de Valdivia y alrededores, Chile. *Agro Sur* (Chile)11 (2): 138 – 139.
- OSBORNE, L., RENGEL, Z. 2002. Genotypic differences in wheat for uptake and utilization of P from iron phosphate. *Australian Journal of Agriculture Research*. 53: 837-844.
- OZANNE, P. 1980. The role of phosphorus in agriculture. *American society of Agronomy*. Madison. USA, pp: 559 – 586.
- PINOCHET, D. 2000. Guia N° 2: Curso Nutrición Vegetal. Aspectos derivados de la demanda de nutrientes. Publicación interna. Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- PINO, I., CASAS, L. 1988. Determinación de la absorción de fósforo en función de dos suelos derivados de cenizas volcánicas. *Nucleotecnica*(Chile) 15: 17-24.
- RACZ, G., WEBER, M., SOPER, R., HEDLEN, R. 1965. Phosphorus and nitrogen utilization by raps, flax y wheat. *Agronomy Journal* (Estados Unidos) 57: 335-337.
- RAWSON, H., GOMEZ, H. 2001. Trigo regado: manejo de cultivo. Roma: FAO, 2001. 106 p.

- RODRÍGUEZ, J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Departamento de Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. 406 p.
- RODRÍGUEZ, J., PINOCHET, D., MATUS, F. 2001. Fertilización de los cultivos. Santiago, Chile. Editorial LOM, 117 p.
- RÖMER, W., SCHILLING, G. 1986. Phosphorus requirements of wheat plant in various stage of its life cycle. *Plant and Soil* 91 (2): 221-229.
- SCHACHTMAN, D., REID, R., y AYLING, S. 1998. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiology* 116: 447-453.
- USDA. 1975. Soil taxonomy. Soil conservation service. Agriculture handbook. 436 p.
- VON BAER, E. sf.Semillas Baer. [http:// www.semillasbaer.cl](http://www.semillasbaer.cl) (15 ago. 2006).
- ZUBAIDI, A., McDONALD, G., HOLLAMBY, G. 1999. Nutrient uptake and distribution by bread and durum wheat under drought conditions in South Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 39: 721-732.

**ANEXOS**

**ANEXO 1 Variación en el tiempo de la producción de materia seca de los granos (kg MS/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada.**

Días desde emergencia	Tratamiento ( kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)							
	0		75		225		315	
107	574	a	1687	a	1813	a	2239	a
114	1130	a	3704	ab	4103	b	4024	ab
121	2140	b	4670	b	5690	b	6170	bc
128	3449	c	6064	b	7709	c	8690	c

**ANEXO 2 Variación en el tiempo de la producción de materia seca total (kg MS/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada.**

Días desde emergencia	Tratamiento ( kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)							
	0		75		225		315	
107	5807	a	13749	a	15246	a	17893	a
114	6791	ab	19012	a	22442	b	21396	a
121	7438	ab	15251	a	18983	ab	20077	a
128	9065	b	14890	a	19094	ab	22142	a

**ANEXO 3 Variación en el tiempo de la concentración de fósforo (g/100g) de granos sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada.**

Días desde emergencia	Tratamiento ( kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)							
	0		75		225		315	
107	0,33	b	0,36	c	0,37	c	0,39	b
114	0,31	ab	0,3	b	0,31	b	0,31	a
121	0,26	a	0,24	a	0,25	a	0,27	a
128	0,27	ab	0,28	b	0,27	ab	0,28	a

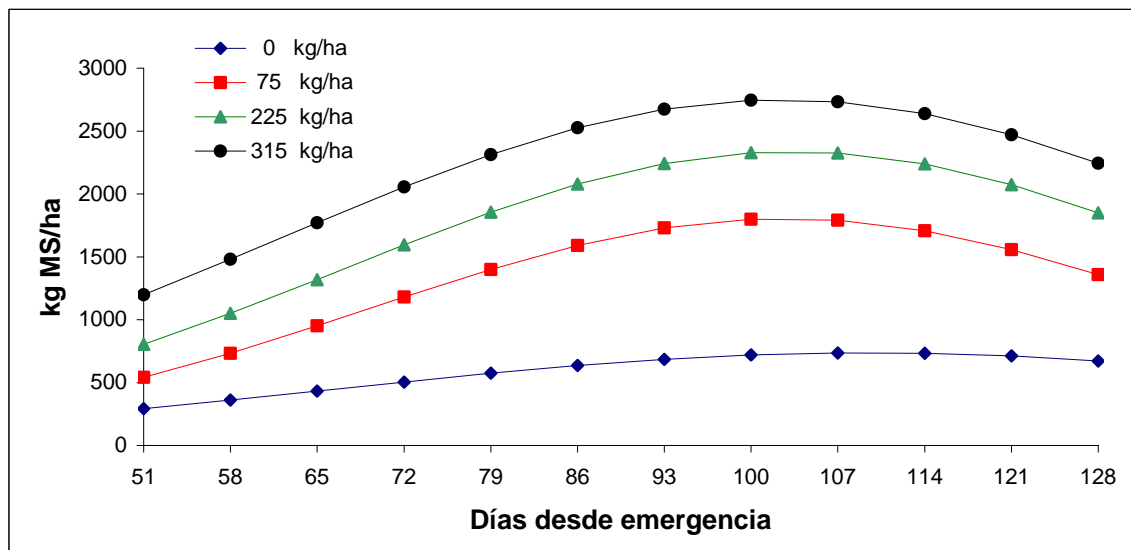
**ANEXO 4 Variación en el tiempo de la absorción de P de granos (kg P/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada.**

Días desde emergencia	Tratamiento ( kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)							
	0		75		225		315	
107	1,9	a	6,1	a	6,7	a	8,6	a
114	3,5	ab	11,2	ab	12,8	b	12,6	a
121	5,5	b	11,4	ab	14,3	b	16,5	ab
128	9,4	c	16,7	b	21,2	c	24,0	b

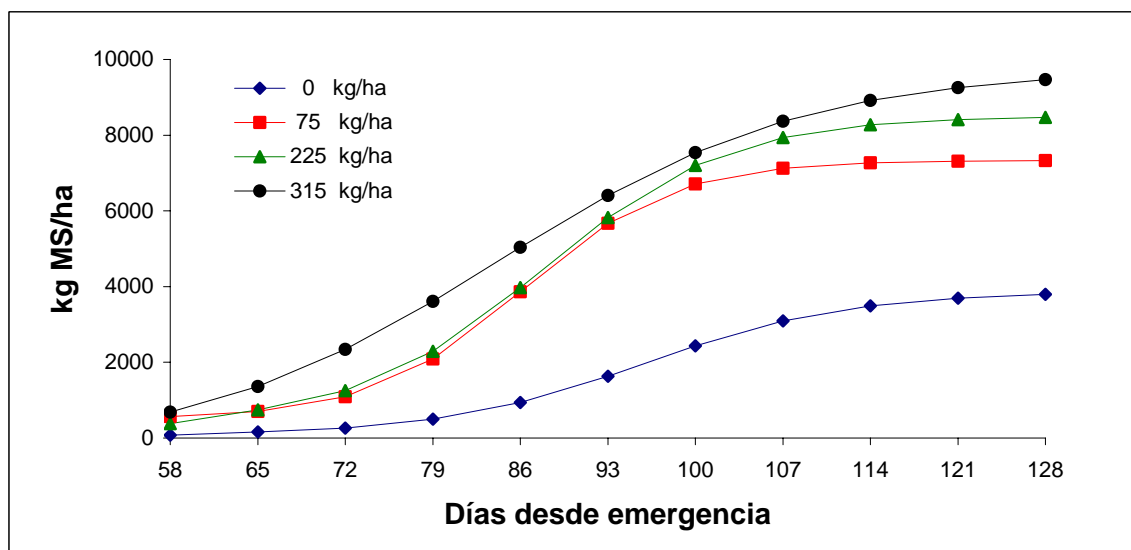
**ANEXO 5 Variación en el tiempo de la absorción de P total (kg P/ha) sometidos a distintas dosis de fertilización fosforada.**

Días desde emergencia	Tratamiento ( kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)							
	0		75		225		315	
107	8,5	a	20,1	a	23,9	a	29,0	a
114	9,2	ab	25,6	a	29,7	a	32,6	a
121	10,1	ab	21,1	a	27,5	a	31,0	a
128	13,8	b	23,6	a	30,1	a	36,3	a

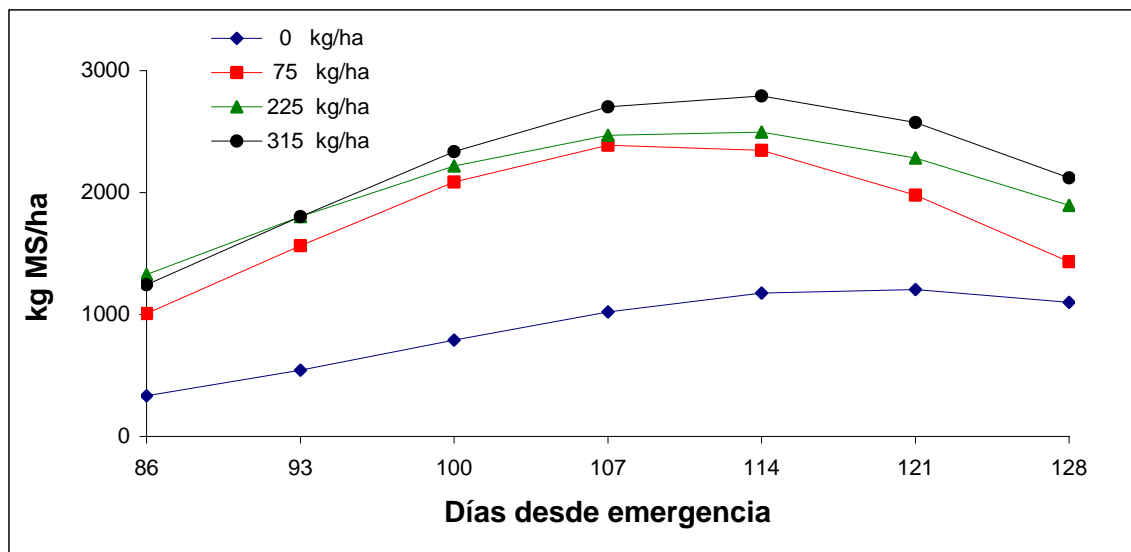
**ANEXO 6 Ajuste de la producción de materia seca de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).**



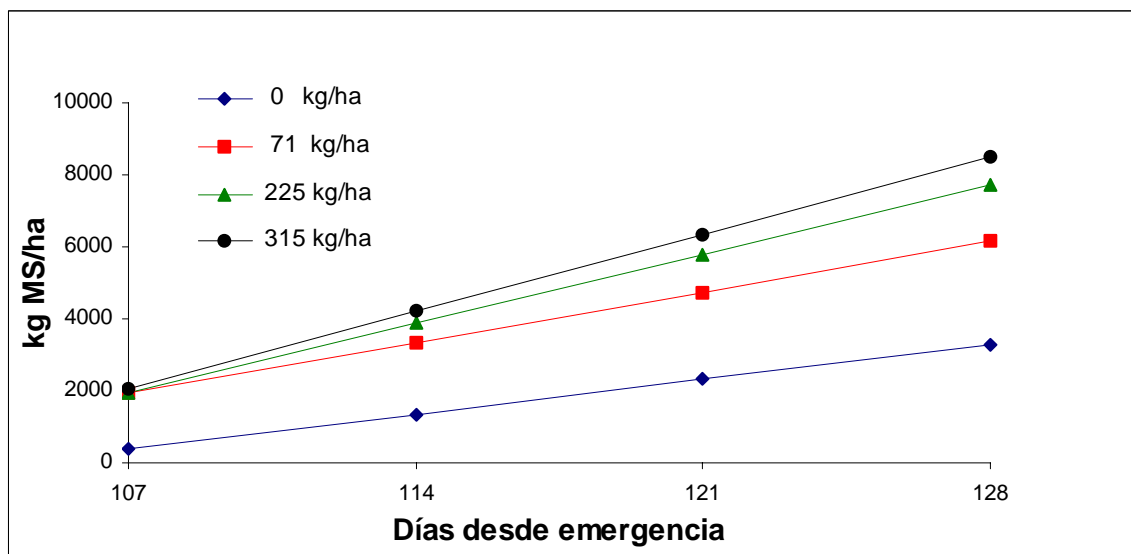
**ANEXO 7 Ajuste de la producción de materia seca de los tallos a un modelo de distribución sigmoidea para diferentes dosis de fósforo (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).**



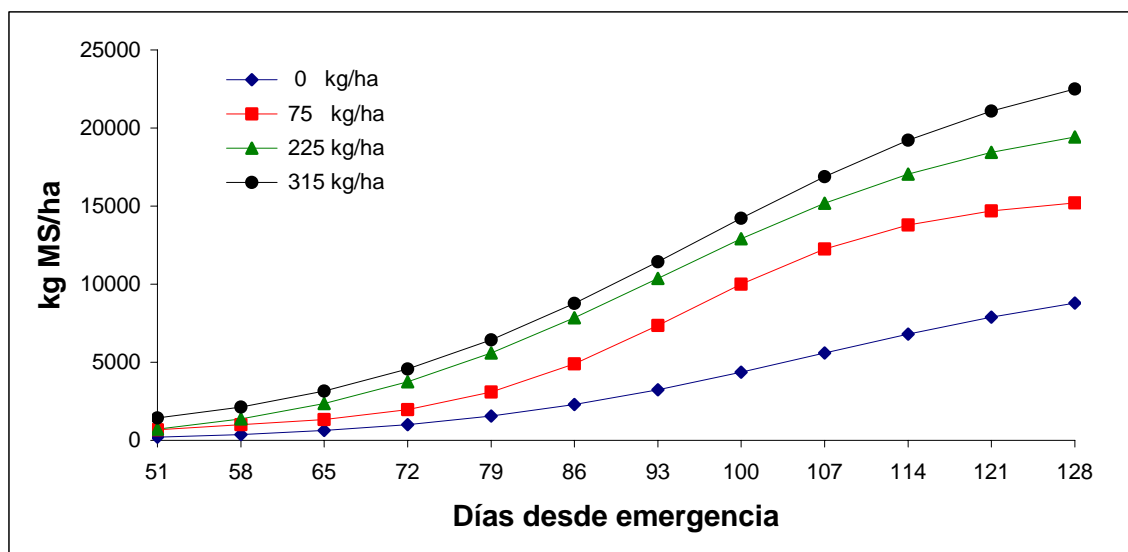
**ANEXO 8 Ajuste de la producción de materia seca de las espigas a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).**



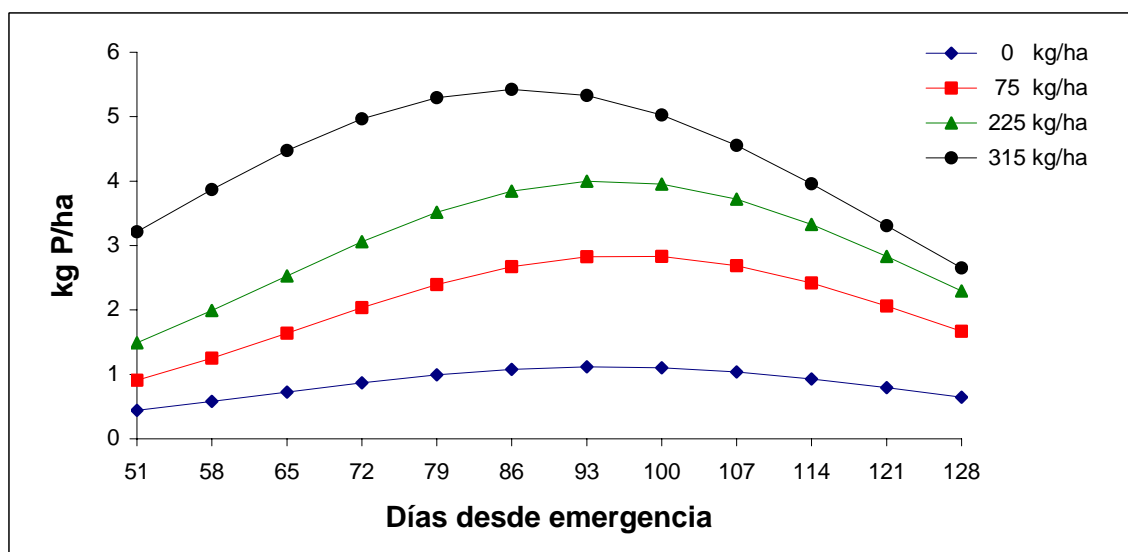
**ANEXO 9 Ajuste de la producción de materia seca de los granos a una regresión lineal para diferentes dosis de fósforo (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).**



**ANEXO 10 Ajuste de la producción total de materia seca a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg  $P_2O_5$ /ha).**

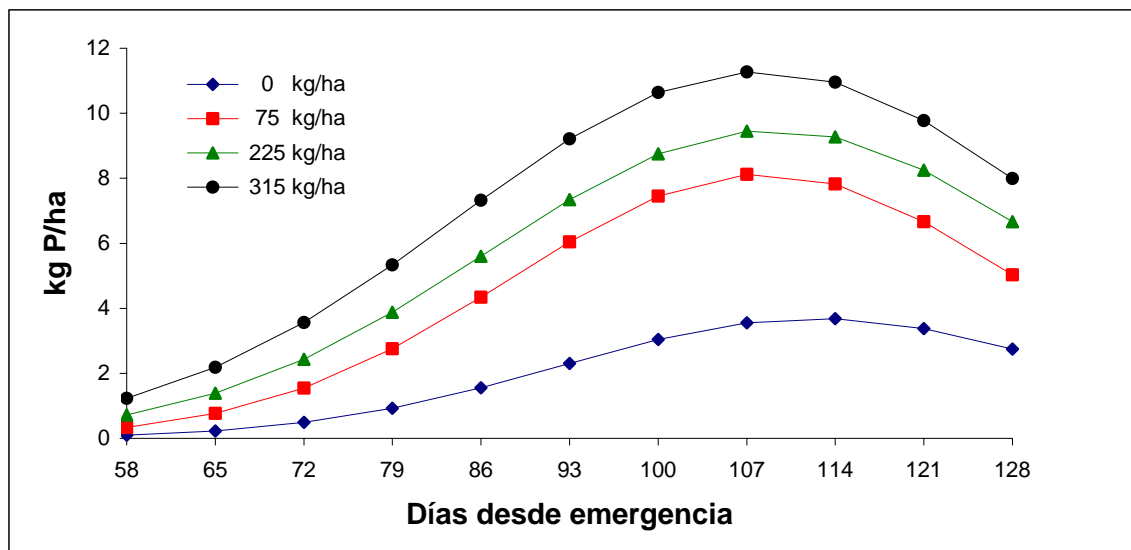


**ANEXO 11 Ajuste de la absorción de fósforo de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg  $P_2O_5$ /ha).**

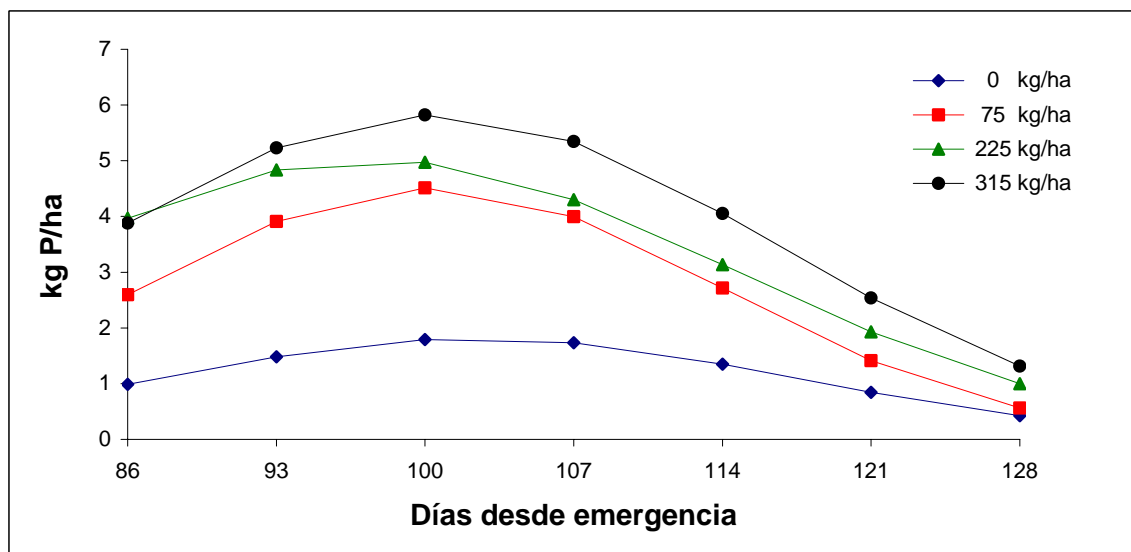




**ANEXO 12 Ajuste de la absorción de fósforo de los tallos a un modelo de distribución Gaussiana para diferentes dosis de fósforo (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha).**



**ANEXO 13 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).**



**ANEXO 14 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).**

