

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMIA

**Evolución de los parámetros de nutrición fosforada en el cultivo de
papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo distintos niveles de fertilidad fosforada
en un suelo trumao**

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

Mirko Serdan Zec Beckdorf

VALDIVIA-CHILE

2008

PROFESOR PATROCINANTE:

Dante Pinochet T.

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

PROFESORES INFORMANTES:

Ricardo Fuentes P.

Ing. Agr., M. Sc.

Roberto Mac Donald H.

Ing. Agr., M. Sc.

Dedico esta tesis a mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera partir agradeciendo a mi profesor guía Dante Pinochet por su constante incentivo y apoyo para realizar esta tesis, como también por los conocimientos adquiridos y la forma de analizar las cosas aprendidos de él.

A los profesores y personal del Instituto de Suelo por su amistad, acogida y por hacernos sentir, a todos los estudiantes que pasamos por el Instituto, que pertenecemos a una gran familia.

A las personas que me brindaron su importante colaboración en este estudio dedicando su tiempo y esfuerzo, un especial agradecimiento a Jerman, Ruth y Olguita.

Al “team Agrosat” a Francisco, Marcelo y Sonia por las facilidades entregadas y su disposición desinteresada de prestarme siempre su ayuda.

A mis padres y hermanos a quienes les dedico este trabajo, a mis amigos German y Andrés por su respaldo y apoyo incondicional. A Romina y Claudia por compartir conmigo, acompañarme y entenderme en esta etapa de mi vida.

Finalmente, a todos los amigos y personas que de alguna medida siempre estuvieron presentes en motivarme a realizar este trabajo de tesis, a cada uno de ellos muchas gracias.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Cultivo de la papa en Chile	3
2.2	Descripción botánica del cultivo papa	4
2.3	Tipos de crecimientos del cultivo papa	5
2.4	Requerimientos de suelo cultivo de papa	6
2.5	Requerimientos climáticos del cultivo de papa	6
2.6	Método de fertilización razonado	7
2.6.1	Demanda de fósforo	8
2.6.1.1	Rendimiento esperado	9
2.6.1.2	Requerimiento interno	10
2.6.1.3	Índice de cosecha	11
2.6.2	Suministro de fósforo	12
2.6.2.1	Fósforo extractable	13
2.6.2.2	Eficiencia de absorción de fósforo	14
2.6.3	Eficiencia de fertilización fosforada	15
2.6.4	Estrategias de fertilización fosforada	17
2.6.4.1	Dosis de mantención	17
2.6.4.2	Dosis de corrección	17
3	MATERIAL Y METODO	18
3.1	Material	18
3.1.1	Características del sitio del ensayo	18
3.1.1.1	Características edáficas	18
3.1.1.2	Características climáticas de la zona	18
3.1.1.3	Características climáticas de la temporada 2002 – 2003	19
3.1.1.4	Suma térmica	20
3.1.1.5	Características químicas	21
3.1.2	Fertilizantes	21

Capítulo		Página
3.1.3	Material vegetal	22
3.2	Método	22
3.2.1	Tratamientos de fertilización fosforada	22
3.2.2	Diseño experimental	23
3.2.3	Tamaño de parcela	23
3.2.4	Preparación de suelo y fertilización	23
3.2.5	Fecha y método de plantación	24
3.2.6	Forma de los muestreos	24
3.3	Variables de medición directa	24
3.3.1	Determinación de biomasa como materia seca	25
3.3.2	Determinación de la concentración de fósforo	25
3.4	Variables derivadas	25
3.4.1	Absorción de fósforo	26
3.4.2	Tasa de crecimiento	26
3.4.3	Tasa de absorción	26
3.5	Parámetros de la fertilización fosforada	26
3.5.1	Requerimiento interno de fósforo	27
3.5.2	Índice de cosecha	27
3.5.3	Índice de extracción de fósforo	27
3.6	Análisis estadístico	27
4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	29
4.1	Variables de medición directa evaluadas	29
4.1.1	Producción de materia seca por órgano y total	29
4.1.1.1	Materia seca de hojas	29
4.1.1.2	Materia seca de tallos	30
4.1.1.3	Materia seca de estolones	32
4.1.1.4	Materia seca de tubérculos	33
4.1.1.5	Materia seca total	35
4.1.2	Concentración de fósforo	40
4.1.2.1	Concentración de fósforo en hojas	40
4.1.2.2	Concentración de fósforo en tallos	42

Capítulo		Página
4.1.2.3	Concentración de fósforo en estolones	43
4.1.2.4	Concentración de fósforo en tubérculos	44
4.2	Variables derivadas	50
4.2.1	Absorción acumulada de fósforo	50
4.2.1.1	Absorción acumulada de fósforo en hojas	50
4.2.1.2	Absorción acumulada de fósforo en tallos	51
4.2.1.3	Absorción acumulada de fósforo en estolones	52
4.2.1.4	Absorción acumulada de fósforo en tubérculos	53
4.2.1.5	Absorción total de fósforo	54
4.2.2	Contribución de cada órgano en la materia seca total producida	59
4.2.2.1	Contribución de las hojas	59
4.2.2.2	Contribución de los tallos	60
4.2.2.3	Contribución de los estolones	61
4.2.2.4	Contribución de los tubérculos	62
4.2.3	Tasas de crecimiento	66
4.2.3.1	Tasa de crecimiento de hojas	66
4.2.3.2	Tasa de crecimiento de tallos	68
4.2.3.3	Tasa de crecimiento de tubérculos	70
4.2.3.4	Tasa de crecimiento total	71
4.2.4	Tasas de absorción de fósforo	73
4.2.4.1	Tasa de absorción de P de hojas	73
4.2.4.2	Tasa de absorción de P de tallos	75
4.2.4.3	Tasa de absorción de P de tubérculos	77
4.2.4.4	Tasa de absorción total de P	78
4.3	Parámetros de fertilización racional de P del cultivo de papa	80
4.3.1	Índice de cosecha	80
4.3.2	Índice extracción de fósforo	83
4.3.3	Requerimiento interno de fósforo (RP)	86
5	CONCLUSIONES	89
6	RESUMEN	91

Capítulo		Página
	SUMMARY	92
7	BIBLIOGRAFIA	93
	ANEXOS	99

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Suma térmica en grados días acumulados (GDA) registrado durante el desarrollo del cultivo de papa	20
2	Análisis químico del área del ensayo	21
3	Composición química de la mezcla comercial Frölich	22
4	Producción de materia seca acumulada (kg MS ha ⁻¹) por órgano en distintos dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa	37
5	Concentración de fósforo (g/100g) por órgano en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa	47
6	Absorción de fósforo (kg P ha ⁻¹) por órgano en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa	56
7	Contribución por órgano de la materia seca (g/100g) en el total de producido en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa	63
8	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana $[Y=(Area/(SD*(2*Pi)^{0,5}))*exp(-0,5*((X-mean)/SD)^2)]$ del crecimiento de las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	66
9	Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo $[Y=Ymax/(1+exp((B-X)/C))]$ de la materia seca de tallos producida en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	68
10	Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo $[Y=Ymax/(1+exp((B-X)/C))]$ de la materia seca de tubérculos producida en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	70
11	Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo $[Y=Ymax/(1+exp((B-X)/C))]$ de la materia seca total producida en el tiempo para cuatro tratamientos de fertilización fosforada	72

Cuadro		Página
12	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana $[Y=(Area/(SD*(2*Pi)^{0,5})*exp(-0,5*((X-mean)/SD)^2)]$ de la absorción de fósforo en las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	74
13	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana $[Y=(Area/(SD*(2*Pi)^{0,5})*exp(-0,5*((X-mean)/SD)^2)]$ de la absorción de fósforo en los tallos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	75
14	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución sigmoidea $[Y=Ymax/(1+exp((B-X)/C))]$ de la absorción de fósforo en los tubérculos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	77
15	Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo $[Y=Ymax/(1+exp((B-X)/C))]$ de la absorción total de fósforo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada	78
16	Variación de los índices de cosecha (g/100g) en el total producido en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa	82
17	Variación de los índices de extracción (g/100g) en el total producido en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa	85
18	Variación del requerimiento interno de fósforo (g/100g) producido por distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa	88

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Precipitación y evaporación media mensual (mm) registrada durante la temporada del cultivo (mayo 2002 - abril 2003)	19
2	Temperatura máxima y mínima media mensual (°C) registrada durante la temporada del cultivo (mayo 2002 - abril 2003)	20
3	Diagrama del ensayo	23
4	Biomasa producida por las hojas (kg MS ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	30
5	Biomasa producida por los tallos (kg MS ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	31
6	Biomasa producida por los estolones (kg MS ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	33
7	Biomasa producida por los tubérculos (kg MS ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	34
8	Biomasa total producida (kg MS ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	35
9	Concentración de fósforo en las hojas (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	40
10	Concentración de fósforo en los tallos (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	42
11	Concentración de fósforo en los estolones (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	44
12	Concentración de fósforo en los tubérculos (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	45
13	Absorción acumulada de fósforo en las hojas (kg P ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	50
14	Absorción acumulada de fósforo en los tallos (kg P ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	51
15	Absorción acumulada de fósforo en los estolones (kg P ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	52
16	Absorción acumulada de fósforo en los tubérculos (kg P ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	53

Figura		Página
17	Absorción acumulada de fósforo total (kg P ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	54
18	Contribución porcentual de las hojas en el total de materia seca producida por el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	59
19	Contribución porcentual de los tallos en el total de materia seca producida por el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	60
20	Contribución porcentual de los estolones en el total de materia seca producida por el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	61
21	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento de las hojas	67
22	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento de los tallos	69
23	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento de los tubérculos	71
24	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento total de materia seca	73
25	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de absorción de fósforo de las hojas	75
26	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de absorción de fósforo de los tallos	76
27	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de absorción de fósforo los tubérculos	78
28	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de absorción total de fósforo	79
29	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la variación de los índices de cosecha del cultivo de papa	81

Figura		Página
30	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹) en la variación de los índices de extracción de fósforo del cultivo de papa	83
31	Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada en la variación del requerimiento interno de fósforo del cultivo de papa	86

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Variación en el tiempo de la acumulación de materia seca en los tubérculos (kg MS ha ⁻¹) en el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	100
2	Variación en el tiempo de la acumulación total de materia (kg MS ha ⁻¹) en el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	101
3	Variación en el tiempo de la absorción acumulada de fósforo total (kg P ha ⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	102
4	Ajuste de la producción de materia seca de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para distintas dosis de fertilización fosforada	103
5	Ajuste de la producción de materia seca de los tallos a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada	103
6	Ajuste de la producción de materia seca de los tubérculos a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada	104
7	Ajuste de la producción de materia seca total a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada	104
8	Ajuste de la absorción de P de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para distintas dosis de fertilización fosforada	105
9	Ajuste de la absorción de P de los tallos a un modelo de distribución Gaussiana para distintas dosis de fertilización fosforada	105
10	Ajuste de la absorción de P de los tubérculos a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada	106
11	Ajuste de la Absorción de P total a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada	106

Anexo		Página
12	Variación en el tiempo de los índices de cosecha del cultivo de papa para distintas dosis de fertilización fosforada	107
13	Variación en el tiempo de los índices de extracción de fósforo del cultivo de papa para distintas dosis de fertilización fosforada	108

1 INTRODUCCION

En el sur de Chile, la mayoría de los suelos tienen su origen a partir de la depositaciones de cenizas volcánicas (Andisoles). Estos suelos usualmente presentan, en condición nativa, bajos niveles de disponibilidad de fósforo para el desarrollo de cultivos de alto rendimiento. En estos agroecosistemas, los cultivos muestran una respuesta a la aplicación de fertilizante fosforado, aumentando tanto sus rendimientos agronómicos como una mejor calidad del producto cosechado.

Las diferentes habilidades de las especies para absorber fósforo a un mismo nivel de fósforo disponible en el suelo, depende de la capacidad de sus raíces para absorber. La papa (*Solanum tuberosum* L.), presenta un sistema radical limitado, con una reducida capacidad de explorar el perfil del suelo en los primeros 20 cm de profundidad. Ello es particularmente importante para los nutrientes relativamente inmóviles en el suelo, como el fósforo, dado que la absorción está limitada a núcleos de concentración de P cercanos a la superficie de las raíces y estos son abundantes en las capas superficiales del suelo.

En Chile, desde mediados de la década del 80, se viene desarrollando el método razonado de la fertilización fosforada, que se basa en el conocimiento de las interacciones existentes en el sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante para establecer normas de fertilización de los cultivos. Estas interacciones han sido simplificadas para la formulación de una dosis en tres componentes: demanda del nutriente, suministro del nutriente y eficiencia de la fertilización. Para una mejor comprensión del sistema que rodea al cultivo es necesario estudiar los parámetros nutricionales de la fertilización fosforada (índice de cosecha, índice de extracción de fósforo y requerimiento interno de fósforo), junto a la variación de estos parámetros en función de distintas disponibilidades de fósforo en el suelo.

La hipótesis de este trabajo es que los parámetros de la demanda de la nutrición fosforada en el cultivo de papa no varían con niveles de disponibilidad agronómica de fósforo.

Se planteó como objetivo general de esta tesis, evaluar el efecto de distintos niveles de fertilidad fosforada, sobre las variables de crecimiento y absorción de fósforo asociadas a los parámetros de la nutrición fosforada en el cultivo de papa en suelos volcánicos.

Los objetivos específicos fueron:

Determinar la producción de materia seca acumulada a través del tiempo en cada órgano del cultivo de papa, en función de los diferentes niveles de fósforo y del total del cultivo de papa y estimar las variaciones en las tasas de crecimiento de cada órgano.

Determinar la variación en el tiempo de la concentración de fósforo en los distintos órganos del cultivo de papa, en los distintos niveles de fósforo en el suelo.

Estimar la absorción de P acumulada y la tasa de absorción de P de cada órgano y del total del cultivo de papa en los distintos niveles de fertilidad fosforada.

Determinar la variación de parámetros necesarios para estimar la nutrición fosforada del cultivo de papa, de acuerdo al método razonado. Es decir, la variación del índice de cosecha, del índice de extracción de P y del requerimiento interno de P, en los distintos niveles de disponibilidad de fósforo en un suelo volcánico.

2 REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Cultivo de la papa en Chile

En Chile la papa se cultiva de Arica a Magallanes, pero las zonas de mayor importancia se encuentran entre la IV y X regiones. La IV región se caracteriza por la producción de papas primores, mientras que las regiones VI y VII destacan por sus producciones de papa consumo e industrial. En la VII región con producciones de papa consumo y papa semilla corriente. En tanto, las regiones IX y X presentan la mayor superficie del país, con producciones destinadas al consumo, la industria, y a la obtención de papa semilla certificada y corriente (CONTRERAS, 2003).

Según ODEPA (2006), la superficie promedio de los últimos cinco años destinada a este cultivo es de 59.148 ha, ubicándose en el cuarto lugar de importancia entre los cultivos anuales después del trigo, maíz y la avena. En la última década la papa ha seguido una tendencia al incremento en la producción, obteniendo en la temporada 2005-2006 un record (desde 1980) histórico nacional de 1.391.378 toneladas, siendo la X región la que presentó el mayor aporte con un 34,7%. Al igual que la producción nacional, el rendimiento anual aumentó obteniendo un promedio de los últimos cinco años de 20,4 ton ha⁻¹ situándose en segundo lugar, luego de la remolacha, presentando la IX y X regiones los mayores rendimientos del país.

En relación a lo anterior SCHNETTLER (2006), señala que pese al optimismo en el aumento de la superficie plantada de los últimos años, la producción en Chile debería abocarse a los parámetros de calidad del cultivo, para traducir esa superficie en rentabilidad. Para lograr esto es necesario partir por la elección de una buena genética, según el objetivo productivo, complementada con mejores manejos fitosanitarios y de fertilidad que den como resultado tubérculos de buena apariencia y calibre homogéneo.

Desde un punto de vista agronómico, el cultivo de papa se establece en el sur de Chile, generalmente, como cabecera de rotación en suelos manejados con praderas de

baja producción y degradadas. Por efecto del alto nivel remanente de fertilidad, en especial de fósforo y de nitrógeno, producido por la mineralización de los residuos durante la época del cultivo (SIERRA, 1995).

El destino de la papa en Chile es aproximadamente un 47% a consumo de papa fresco, un 18% para procesamiento industrial, un 13% es usada como semilla para temporada siguiente, las pérdidas en almacenaje corresponden a un 15% y tan solo un 7% de la producción es destinada a consumo animal (KALAZICH, 1995).

Los principales cultivares que se utilizan en Chile son Desirée, destinado principalmente como papa de guarda tanto en la zona central como en el sur, seguido por los cultivares Ultimus y Cardinal usados para la producción temprana en la zona centro y sur del país, además presentar buenas aptitudes como papa cuaresmera en la zona central (CONTRERAS, 2003).

2.2 Descripción botánica del cultivo papa

La papa *Solanum tuberosum* L. es una planta dicotiledónea herbácea anual, perteneciente a la familia de las Solanáceas. Potencialmente es una planta perenne debido a que es capaz de reproducirse por tubérculos (MONTALDO, 1984).

Las hojas maduras son compuestas, consisten en un pecíolo con un foliolo terminal, foliolos laterales, foliolos secundarios y, a veces, foliolos terciarios. Las hojas son pilosas presentado mayor cantidad de estomas en la superficie inferior que en la parte superior de la hoja. Existen diferencias en la forma, número, tamaño y color de los foliolos entre distintos cultivares. Luego de desarrollar de seis a nueve hojas, pueden aparecer botones florales en todas o alguna de las ramas apicales (ALONSO, 1996).

Según MONTALDO (1984), los tallos son herbáceos, de color verde y que en corte de sección transversal son huecos y triangulares. Se considera como un tallo principal el que crece directamente del tubérculo madre y como secundarios los que provienen del tallo principal.

Las flores son pentámeras, de colores que varían del blanco al morado, poseen estilo y estigma simple y un ovario bilocular. El número de flores es variable y depende del cultivar que se trate, lo mismo se puede decir de los frutos que se forman a partir de ellas (ALONSO, 1996).

Las bayas son amarillas o castaño amarillentas, de tamaño pequeño y uniformes, sus formas pueden ser alargadas, ovaladas o cónicas. Estas pueden contener entre 0 a 400 semillas (CONTRERAS, 2003).

El sistema radical es de origen adventicio, en verticilo, con raíces fibrosas, ramificadas y extendidas, pero más bien superficiales, que se concentran en un radio de 50 cm del eje central (PUC, 2006). Por su parte, CONTRERAS (2003) indica que el sistema radical, al encontrarse en suelos sin mayores limitaciones físicas, puede alcanzar entre los 60 y 90 cm de profundidad.

El tubérculo puede ser considerado un tallo subterráneo modificado que se ha acortado y ensanchado con hojas débilmente desarrolladas, adaptado para el almacenamiento de carbohidratos y para la reproducción. Este se forma en el extremo de un estolón como consecuencia de la acumulación de reservas que se produce por el rápido desarrollo y división celular (MONTALDO, 1984).

2.3 Tipos de crecimientos del cultivo papa

Los cultivares de papa presentan dos tipos definidos de crecimientos. Por una parte, están los cultivares de periodo vegetativo corto (tipo I) que son de menor crecimiento y de maduración más rápida, ejemplos de estos, son los cultivares Monalisa y Rosana. Por otra parte, se encuentran los cultivares de ciclo vegetativo largo (tipo II), con un mayor crecimiento foliar, una maduración más tardía y de un mayor rendimiento, cultivares de este tipo son Asterix, Baraka y Desirée (CONTRERAS, 2003).

Para la obtención de un rendimiento máximo, hay que considerar que los requerimientos varían según el ciclo de crecimiento. Los cultivares tipo II se diferencian de los de ciclo corto por requerir: fotoperiodos largos, baja intensidad lumínica,

temperaturas menores (16 a 18°C), abundante riego y mayores dosis nitrógeno. Estos factores tienen una mayor influencia en estados tempranos de crecimiento, ya que una vez iniciada la tuberización, el tipo de crecimiento se ve menos afectado por las condicionantes ambientales. (BEUKEMA y VAN DER ZAAG, 1979).

2.4 Requerimientos de suelo del cultivo de papa

El cultivo de papa, en comparación a otros cultivos, posee un sistema radical débil por lo que necesita una buena preparación de suelo que permita además de una rápida emergencia, un adecuado enraizamiento en profundidad en el suelo (BEUKEMA y VAN DER ZAAG, 1979).

Por su parte CONTRERAS (2003), señala que para el desarrollo óptimo del sistema de raíces, la papa requiere un suelo profundo, poco compactado, con un buen contenido de materia orgánica, buena retención de humedad, libre de napas freáticas altas y de pedregosidad que afecte el crecimiento y las forma de los tubérculos.

Aunque las papas toleran suelos ácidos con un pH de hasta 5, el pH ideal para este cultivo se encuentra entre 5,5 y 6,5. Además, el mantenimiento en el suelo de un pH alrededor de 5,5 ayuda a controlar enfermedades como la sarna común (ALONSO, 1996).

2.5 Requerimientos climáticos del cultivo de papa

La papa se adapta muy bien a climas predominantemente frescos, y con valores no muy altos en humedad ambiental. Estas características son importantes para el desarrollo vegetativo de la planta sea lento, de esta forma las plantas pueden producir la cantidad suficiente de carbohidratos, los cuales juegan un rol fundamental en el proceso de formación de los tubérculos (FAIGUENBAUM, 1987).

Los factores climáticos que afectan directamente el crecimiento del cultivo son: la radiación, la longitud del día y la temperatura. La radiación diurna determina el crecimiento y la producción del cultivo, la longitud del día determina la iniciación de la tuberización y la temperatura influye en la eficiencia de la fotosíntesis durante el día y en las pérdidas por la respiración por la noche (NIVAP, 2006).

La temperatura óptima para la producción de papas es aproximadamente de 20°C durante el día y alrededor de 15°C por la noche. Los días largos en combinación con temperaturas relativamente altas suelen retrasar la iniciación de la tuberización y estimular el crecimiento de follaje (NIVAP, 2006).

La papa es una especie sensible a heladas, temperaturas de 0°C que se prolonguen por algunas horas, causan problemas al cultivo. Heladas de mayor intensidad (1 a 2°C bajo cero), pueden causar importantes daños en la parte aérea de las plantas, o incluso la destrucción total del follaje (CONTRERAS, 2003).

Condiciones favorables de clima se presentan en la zona sur del país (X región) para el cultivo de papa, debido a los días largos, a las temperaturas más bien frescas y la permanente humedad aportada por las lluvias (FAIGUENBAUM, 1987).

2.6 Método de fertilización razonado

La fertilización racional se crea como alternativa viable a las normas tradicionales de fertilidad la cual se requiere mucha experimentación para calibrar la fertilización de los cultivos y las funciones de producción, sin la necesidad de profundizar en los conocimientos de los procesos que determinan la respuesta del fertilizante. El método racional, por su parte, se fundamenta en la comprensión y determinación del funcionamiento de los sistemas de nutrientes en los suelos y cultivos, limitando la experimentación a la validación de la estimación de fertilidad (RODRÍGUEZ, 1993).

El método racional de fertilización utiliza un reducido número de parámetros correspondientes a los principales procesos que determinan la nutrición de los cultivos. Estos parámetros derivan de interacciones existentes en el sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante y a través del conocimiento de estos, es posible predecir las normas de fertilización de los cultivos en cada caso particular (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

Según RODRÍGUEZ *et al.* (2001), el objetivo principal de la fertilización razonada es establecer una estrategia de manejo integral agronómico de la fertilización que permita elevar y mantener el estado nutricional de los suelos en forma económica

y así alcanzar una nutrición óptima de los cultivos sin afectar la sustentabilidad del sistema.

El crecimiento y desarrollo de los cultivos genera una demanda de nutrientes para satisfacer sus necesidades metabólicas y estructurales, la cual, al no ser satisfecha con el suministro de nutrientes que es capaz de entregar el suelo, en especial el fósforo, se produce un déficit nutricional del cultivo. Así el objetivo de la aplicación de un fertilizante es satisfacer el déficit nutricional de forma de obtener la producción alcanzable del cultivo en un determinado agroecosistema (RODRÍGUEZ, 1993).

Según el mismo autor, la ecuación general de una dosis de fertilización estaría dada por:

$$\text{Dosis} = \frac{\text{Demanda Nutriente Cultivo} - \text{Suministro Nutriente Suelo}}{\text{Eficiencia Fertilización}} \quad (2.1)$$

De esta manera, las interacciones del sistema clima-suelo-cultivo-fertilizante han sido simplificadas en tres componentes. Así las interacciones entre el clima y el cultivo están reflejadas en la demanda del nutriente, las interacciones entre el suelo y el cultivo en el suministro del nutriente y el efecto del manejo de los fertilizantes en las relaciones suelo-cultivo a través de la eficiencia de fertilización (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

2.6.1 Demanda de fósforo. La demanda de fósforo de un cultivo es la cantidad de fósforo que necesita para alcanzar una productividad determinada. Es evidente que con un mayor crecimiento y una mayor producción, la demanda de nutrientes de los cultivos aumenta. Por lo tanto, la demanda de nutrientes de un cultivo con un determinado potencial genético variará, de acuerdo a las limitaciones del clima, de suelo y del nivel tecnológico utilizado (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

El fósforo en forma de ion fosfato (PO_4^{3-}) es un elemento integral y esencial en las células de las plantas, su importancia de debe a su participación en el metabolismo

de los hidratos de carbono (glucofosfatos), en el intercambio gaseoso y la fotosíntesis. Además de ser un constituyente estructural en las membranas de las células (fosfolípidos), es un componente de los nucleótidos usados por la planta en la formación de ADN y ARN, como en el ciclo energético del ATP (TAIZ y ZEIGER, 2002).

El cultivo de papa al tener un alto potencial de rendimiento, requiere extraer grandes cantidades de nutrientes del suelo, es por esto, que la mayoría de los suelos destinados a su cultivo requieren una gran adición de uno o más elementos nutritivos necesarios para su óptimo crecimiento (CONTRERAS y SILVA 1986).

En el cálculo de la demanda del fósforo se requiere establecer, además del rendimiento alcanzable, la concentración mínima óptima del fósforo en la materia seca producida y la relación del producto cosechado. (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

$$DP = \frac{RE * (1 - HC)}{IC} * RI \quad (2.2)$$

donde:

- DP demanda de fósforo (kg P ha⁻¹)
- RE rendimiento esperado (kg)
- HC humedad de cosecha (g/100g)
- IC índice de cosecha (g/100g)
- RI requerimiento interno del nutriente

2.6.1.1 Rendimiento esperado. La productividad a alcanzar estará determinada por el potencial genético que pueda expresar un cultivo en función del agroecosistema en el cual se desarrolle afectado por sus factores más relevantes, estos son: la radiación fotosintéticamente activa, temperatura, eficiencia fotosintética del cultivo y la disponibilidad de agua (PINOCHET, 1988).

Es importante hacer una estimación realista y adecuada del rendimiento esperado por el cultivo, considerando la situación actual del suelo y del nivel tecnológico del agricultor, puesto que una subestimación del rendimiento esperado conducirá a calcular una dosis superior a la requerida, elevando los costos de producción y además, produciendo un riesgo contaminación del medio ambiente, sobretodo en el caso de nutrientes móviles en el suelo. Por el contrario, una subestimación del rendimiento esperado llevará una disminución en la dosis, produciendo una deficiencia de este nutriente que limitará la productividad, proceso conocido como la ley del mínimo de Liebig, que conducirá a una menor utilidad económica (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

Las zonas agroecológicas más aptas para el cultivo de papa y que a su vez poseen el mayor potencial de producción se encuentra en las regiones IX y X del país. El clima permite que cualquier agricultor con baja tecnología y sin riego obtenga rendimientos de 16 ton/ha, pudiendo a través de manejos simples, aumentar los rendimientos a 35 ton/ha (CONTRERAS, 1991).

Por su parte KALAZICH *et al.* (2003), señalan que los rendimientos promedios para papa de guarda en un sector de secano de la décima región es de 44 ton/ha, siendo que en esta misma zona con un mayor nivel tecnológico, especialmente de riego, los rendimientos promedios se elevarían alrededor de las 73 ton/ha.

2.6.1.2 Requerimiento interno. El requerimiento interno se define como la concentración crítica mínima de fósforo en la biomasa total del cultivo con una nutrición fosforada óptima en el momento de la cosecha (RODRÍGUEZ, 1993).

Esta concentración se puede considerar una constante de los diferentes cultivos en el momento de la cosecha. Sin embargo, la concentración de un nutriente en forma orgánica en la planta disminuye a través de su ciclo fisiológico, debido a que las plantas adultas derivan una mayor cantidad de fotosintatos hacia la producción de material de soporte estructural libre de estos nutrientes. Esto es importante de considerar en el caso de cultivo de papa, ya que dependiendo el objetivo productivo, estas pueden ser destinadas para papas primores o para papas tardías donde las

primeras se tiene que considerar un requerimiento interno de fósforo mayor que las segundas, aumentado así la demanda de nutrientes de estas (RODRÍGUEZ, 1993).

2.6.1.3 Índice de cosecha. Los rendimientos de los cultivos, por lo general, se expresan en materia seca del producto cosechado. Para realizar este cálculo es necesario conocer los parámetros que determinan el rendimiento, estos son el índice de cosecha (IC) y la humedad de cosecha (HC) (RODRÍGUEZ, 1993).

El índice de cosecha es un parámetro que mide la eficiencia agronómica de la conversión de la biomasa total producida, en producto cosechable (PINOCHET, 1988).

Las diferencias del IC entre los cultivos tiene una base fisiológica y bioquímica. El IC esta determinado por la composición de carbohidratos, proteínas y lípidos de las semillas o productos cosechados. Las relaciones de conversión de producto (g de producto / g de glucosa) indican que sería de 0,82 para los carbohidratos, 0,62 para las proteínas y 0,33 para los lípidos. En relación a esto, los cultivos como las papas y remolacha acumulan en sus productos principalmente carbohidratos, mostrando una alta productividad de la biomasa y altas relaciones de conversión de IC (RODRÍGUEZ, 1993).

$$\text{Índice de cosecha} = \frac{\text{kg MS producto cosechado}}{\text{kg MS parte aérea} + \text{kg MS producto cosechado}} \quad (2.3)$$

Según ALVAREZ *et al.* (1999), con pequeñas aplicaciones de fósforo en el suelo se aumenta de un 57% a 64% el contenido de materia seca en los tubérculos, pero una vez alcanzado un nivel adecuado de nutrición en la planta el índice de cosecha no se ve afectado. A su vez MCCOLLUM (1978a) indica un efecto similar, registrando valores superiores de IC de un 70 a 75% con un óptimo de nutrición y de un 60 a 56% con bajas aplicaciones de P.

Como el índice de cosecha es una relación entre el producto cosechado y el total producido por el cultivo, en la práctica, se produce a una variación de este parámetro debido a que la planta pierde constantemente material durante el desarrollo

de su ciclo. Es por esto que MACKERRON y HEILBRONN (1985), señalan que un valor referencial de índice de cosecha en papa estaría cercano al 80%.

2.6.2 Suministro de fósforo. El suministro de fósforo es la cantidad de este elemento que esta disponible desde la fracción lábil del suelo, pudiendo ser absorbido por el cultivo durante su desarrollo (PINOCHET, 1988).

Una manera funcional de explicar el sistema del fósforo en el suelo, es a través de tres fracciones, estas son: P de la solución, P lábil y P no lábil. La absorción de las plantas se realiza desde la solución del suelo, en el cual el fosfato se encuentra inmediatamente disponible, produciendo una disminución en la concentración de la solución la cual tiene que ser repuesta por el P de la fracción lábil, debido a que el tamaño de esta fracción es pequeña y la concentración es muy baja oscilando entre 0,006 y 0,03 ppm (PINOCHET, 1988). El fósforo de la fracción lábil proviene de las reacciones de adsorción y precipitación, principalmente, en la superficie de las arcillas y se encuentra en equilibrio rápido con el P de la solución del suelo. Es por esto, que el P lábil determina la disponibilidad de P en el suelo para los cultivos. Por otra parte, el P de la fracción no lábil es el resultado de reacciones de adsorción en que el P queda retenido en el interior de las arcillas, formando complejos con óxidos de Fe y Al, sumado a reacciones de precipitación muy insolubles y de reacciones ligadas a la materia orgánica estabilizada en el suelo. La fracción no lábil se caracteriza por no estar en equilibrio directo con el P de la solución y por lo tanto no participa en la disponibilidad de P en la temporada del cultivo (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

Debido a las interrelaciones que ocurren en el sistema suelo, entre el fosfato y la matriz del suelo, puede existir distintos grados de disponibilidad de este elemento para la planta (PINOCHET, 1988).

$$SP = P_{ex} * E_c \quad (2.4)$$

donde:

SP suministro de fósforo (kg P ha⁻¹)

P_{ex} fósforo extractable (P-Olsen ppm)

E_c Eficiencia de absorción de P del cultivo (kg P absorbibles/ppm P-Olsen)

2.6.2.1 Fósforo extractable. Para la cuantificación del P lábil no existe un método adecuado posible de rutinar, ya que se debería extraer solamente el P adsorbido en la superficie de las arcillas (RODRÍGUEZ, 1993). Debido a esta dificultad para medir directamente el P lábil del suelo, se ha conducido a la utilización de un índice de esta fracción que corresponde al P extractable por el método Olsen (NaHCO₃ 0,5M, pH 8,5). El valor del P extractable Olsen (ppm P) representa una proporción del P lábil del suelo que se correlaciona con el P absorbido por los cultivos. De este modo, el P extractable Olsen es un indicador de la disponibilidad de P del suelo y tiene como ventaja de presentar un comportamiento similar en diferentes tipos de suelos, no siendo esta extracción influenciada dentro de un rango normal de valores de pH, CaCO₃ y capacidad amortiguadora de P del suelo (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001; RODRÍGUEZ, 1993).

El factor que condiciona los niveles de P lábil es el manejo de la fertilización fosforada de los suelos. Los suelos si no son fertilizados tienen un bajo contenido de P lábil, manteniéndose un equilibrio mínimo con aportes naturales provenientes de intemperizaciones de minerales primarios como apatitas. Las variaciones que se observan sólo son consecuencia de un nivel de fertilización diferente (RODRÍGUEZ, 1993).

Existe un efecto inmediatamente después de una aplicación de P al suelo, donde P extractable Olsen comienza a disminuir a través del tiempo debido a las reacciones de adsorción hacia el interior de la matriz coloidal. A este proceso se ha denominado efecto residual de la fertilización fosforada, que ha sido descrita como una función potencial dependiente del tiempo y la temperatura. Es por esto que la agregación de P no solo tiene efecto durante el año de aplicación, sino que los cultivos

de los años venideros recibirán una proporción, cada vez menor, del P agregado el primer año (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001; RODRÍGUEZ, 1993).

2.6.2.2 Eficiencia de absorción de fósforo. La eficiencia de absorción se define como la capacidad de los cultivos de absorber el fósforo disponible desde el suelo. Encontrándose una relación lineal entre el contenido de fósforo disponible (P-Olsen) en el suelo y los rendimientos máximos de los cultivos en distintos agroecosistema (RODRÍGUEZ, 1993).

Como el requerimiento interno de fósforo es muy semejante en los distintos cultivos y sus tasas de absorción de fósforo por cm de raíz no difieren mayormente, la eficiencia de absorción depende de la densidad de su sistema radical. La densidad es sacada de la relación entre el volumen de raíces por volumen de suelo (cc/cc), teniendo el cultivo de papa una densidad radical baja comparada con otros cultivos explorando solo entre 1-2% del volumen de suelo (RODRÍGUEZ, 1993). Esto hace que frente a un mismo valor de P-Olsen en el suelo, los cultivos sean capaces de recuperar distintas cantidades de P, de acuerdo a su habilidad para interceptar zonas de alta concentración de P, dada por los gránulos remanente de los fertilizantes (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

La eficiencia de absorción se ve afectada en suelos que presentan alguna limitación para en desarrollo adecuado de las raíces, como también por factores que alteren el transporte del P de la solución a la superficie de las raíces. Así el manejo del régimen hídrico del suelo, las condiciones físicas del exceso de laboreo en los cultivos permanentes, las deficiencias de otros nutrientes, etc. modifican la eficiencia de absorción de los cultivos así como también la producción máxima alcanzable (RODRÍGUEZ, 1993).

Según SCHACHTMAN *et al.* (1998), otros factores importantes que afectan la absorción de P en los suelos son las micorrizas, estas a través de las hifas de los hongos incrementan sustantivamente el volumen de suelo explorado. En ciertas

especies de plantas, forman raíces noduladas en respuesta a la limitaciones de P. Estas raíces especializadas exudan altos contenidos de ácidos orgánicos, produciendo una acidificación y quelatación de iones metálicos alrededor de la raíces, obteniendo una movilización de P y de algunos micronutrientes. Relacionado a esto COVARRUBIAS *et al.* (2005), estudiaron el efecto de la inoculación de una rizobacteria (*Bacillus subtilis*) sobre los tubérculos, obteniendo un incremento significativo en la cinética de la absorción y eficiencia de P, lo cual contribuyó a obtener mayores rendimientos.

2.6.3 Eficiencia de fertilización fosforada. La eficiencia de fertilización fosforada es la relación existente entre el P aplicado en la fertilización fosforada y el P que es capaz de absorber el cultivo durante su estación de crecimiento y desarrollo. Esta diferencia se relaciona con el grado de competencia del cultivo a los procesos que ocurren en el sistema cultivo-suelo-atmósfera que transforman el nutriente en disponible. Existen dos elementos fundamentales que determinan el grado de recuperación del P desde el suelo: las pérdidas del fósforo en el sistema desde el punto de vista de la disponibilidad para el cultivo y la capacidad del sistema radical de explorar un volumen de suelo que contiene al P disponible (PINOCHET, 1988).

Luego de una aplicación de fertilizantes fosforados solubles, los gránulos generan una esfera de influencia con distintas concentraciones de P de acuerdo a la capacidad de retención de P de los suelos. Así, en suelos con una mayor capacidad de retención de P, la esfera de difusión es menor y de mayor concentración que en un suelo de menor capacidad de retención de P. Por consiguiente, con la misma dosis de P aplicada, en suelos con una alta capacidad de retención de P se obtiene menos P extractable Olsen, que en suelos con baja capacidad de retención de P (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001). Según el mismo autor, la capacidad de retención de P está dado por el grado de reactividad de los suelos que depende principalmente de la mineralogía de las arcillas y la cantidad de estas, como también, en menor grado del contenido presente de óxidos de Fe y Al (RODRÍGUEZ, 1993).

A su vez, RODRÍGUEZ (1993), determinó que el contenido de Al extractable en acetato de amonio (AcNH_4 pH 4,8) tiene una alta correlación con capacidad de

retención de P de los suelos, de esta forma, la capacidad de retención de P (CP) puede ser descrita en la siguiente ecuación:

$$CP = 2,86 * (AI \text{ extractable})^{-0,469} \quad (2.5)$$

De manera de poder transformar el índice de retención de P en kg P/ha aplicados por ppm de P extractable Olsen, es necesario conocer la densidad aparente del suelo y la profundidad de muestreo. Este parámetro se conoce como factor de conversión de P-Olsen (FCO) y permite estimar la distinta cantidad de kg P/ha que debe agregarse para obtener 1 ppm P extractable Olsen en suelos con diferente capacidad de retención de P (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

$$FCO = \frac{\text{Prof. de muestreo} * \text{Densidad aparente suelo}}{CP} \quad (2.6)$$

Según RODRÍGUEZ *et al.* (2001), además del FCO en el suelo, la eficiencia de absorción de P por los cultivos también determina la recuperación del P del fertilizante aplicado. Como se señaló anteriormente, la eficiencia de absorción de por los cultivos depende de sus densidades radicales, pero también a la forma de aplicación del fertilizante. Respecto a esto ALVAREZ *et al.* (2001), señalan que la localización de los fertilizantes fosforados viene a resolver, en parte, el problema de disponibilidad, provocando un aumento de la accesibilidad de este elemento a las raíces de los cultivos particularmente durante los primeros días de desarrollo, cuando el sistema radical es incipiente. Sumado a esto, los cultivos utilizan de forma más eficiente el P del fertilizante cuando este se mezcla con pequeños volúmenes de suelos cercanos a las semillas, que cuando espolvoreado y mezclado con volúmenes mayores de suelo en la zona de exploración radical. Por el contrario HENGNEY y MACPHARLIN (1999), advierten que este efecto presenta mayor relevancia en suelos de alta reactividad, ya que en suelos arenosos de baja fijación de P, la localización del fertilizante puede no ser la mejor técnica de aplicación de los nutrientes.

2.6.4 Estrategias de fertilización fosforada. La fertilización fosforada considera dos tipos de dosis de acuerdo al nivel de disponibilidad de P del suelo, estos son: la dosis de mantención y la dosis de corrección.

2.6.4.1 Dosis de mantención. Una vez alcanzado los niveles de suficiencia de P necesarios para satisfacer la demanda de P de cada cultivo en una rotación, la fertilización fosforada debe tener como objetivo mantener este nivel de suficiencia compensando las pérdidas producidas a través de la exportación de P por los cultivos. Normalmente estas exportaciones corresponden al índice de cosecha ya que los residuos, en general, son incorporados, reciclados por el ganado o quemados y devueltos finalmente al sistema del suelo (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

2.6.4.2 Dosis de corrección. Cuando los niveles de P-Olsen son muy deficientes para satisfacer la demanda de los cultivos, es apropiado considerar la aplicación de una dosis de corrección de P para alcanzar un nivel de suficiencia de P-Olsen en el suelo en un periodo razonable de tiempo. Para el cálculo de la dosis de corrección se debe considerar: el número de años para alcanzar el nivel de suficiencia, P-Olsen inicial del suelo, P-Olsen a alcanzar (dependiente del cultivo y rendimiento alcanzable), el factor de conversión Olsen de cada grupo de suelo, la sumatoria de los efectos residuales de cada aplicación y la dosis de mantención (RODRÍGUEZ *et al.*, 2001).

3 MATERIAL Y METODO

3.1 Material

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Santa Rosa, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile, localizada aproximadamente a 4 kilómetros al norte de la ciudad de Valdivia, XIV Región de Los Ríos.

3.1.1 Características del sitio del ensayo. El lugar donde se realizó el ensayo corresponde a un suelo conocido localmente como trumao, de la serie Valdivia, clasificado como Medial Mesic Typic Hapludand (NISSEN, 1974).

3.1.1.1 Características edáficas. La serie Valdivia se encuentra a una altura de 9 a 20 m.s.n.m., con una topografía con pendientes dominantes de 3 a 8% y sectores ligeramente ondulado de 2 a 5%. Estos suelos se caracterizan por ser profundos; presentan color pardo oscuro hasta los 70 cm y de pardo a pardo intenso en profundidad; texturas moderadamente finas en superficie y finas en profundidad; sueltos, friables, ligeramente plásticos y adhesivos en superficie y duros, firmes, plásticos y adhesivos en profundidad (IREN CORFO UACH, 1978).

3.1.1.2 Características climáticas de la zona. El sector de Valdivia, por su cercanía a la costa y a cuencas hidrográficas de los ríos Cruces y Valdivia, posee un clima con características marítimas (HUBER, 1970).

Su régimen térmico se caracteriza por una temperatura media anual de 12,2 °C con una máxima media del mes más caluroso (enero) de 23,3 °C y una mínima media del mes más frío (agosto) de 4,6 °C. El periodo libre de heladas que se extiende de noviembre a marzo. La suma anual de temperaturas, base 5 °C, es de 2613 grados días acumulados (MONTALDO y FUENTES, 1980).

El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 2532 mm. La evaporación promedio anual de 807 mm con un máximo mensual en enero de 152 mm y un mínimo mensual en junio de 11 mm. (MONTALDO, 1983).

3.1.1.3 Características climáticas de la temporada 2002 - 2003. Durante la temporada de establecimiento del ensayo se recopiló datos de precipitación y evaporación media mensuales mostrados en la Figura 1, y datos de temperaturas máximas y mínimas media mensuales en la Figura 2, estos registros fueron tomados por la estación climática del Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile.

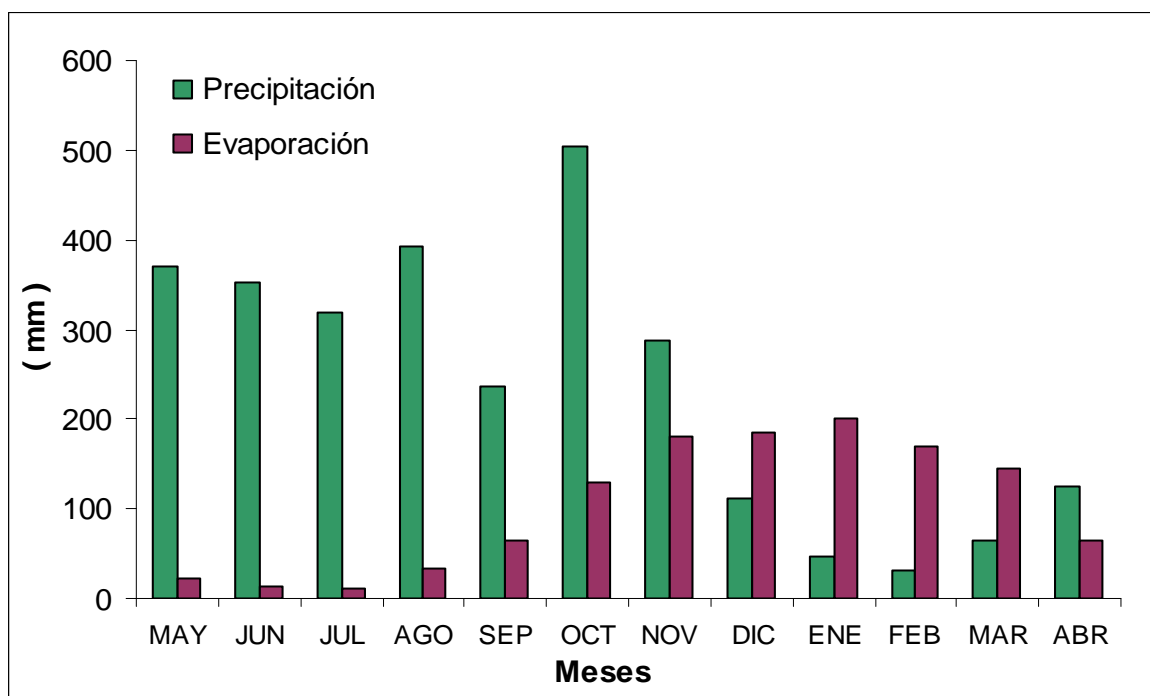


FIGURA 1 Precipitación y evaporación media mensual (mm) registrada durante la temporada del cultivo (mayo 2002 - abril 2003).

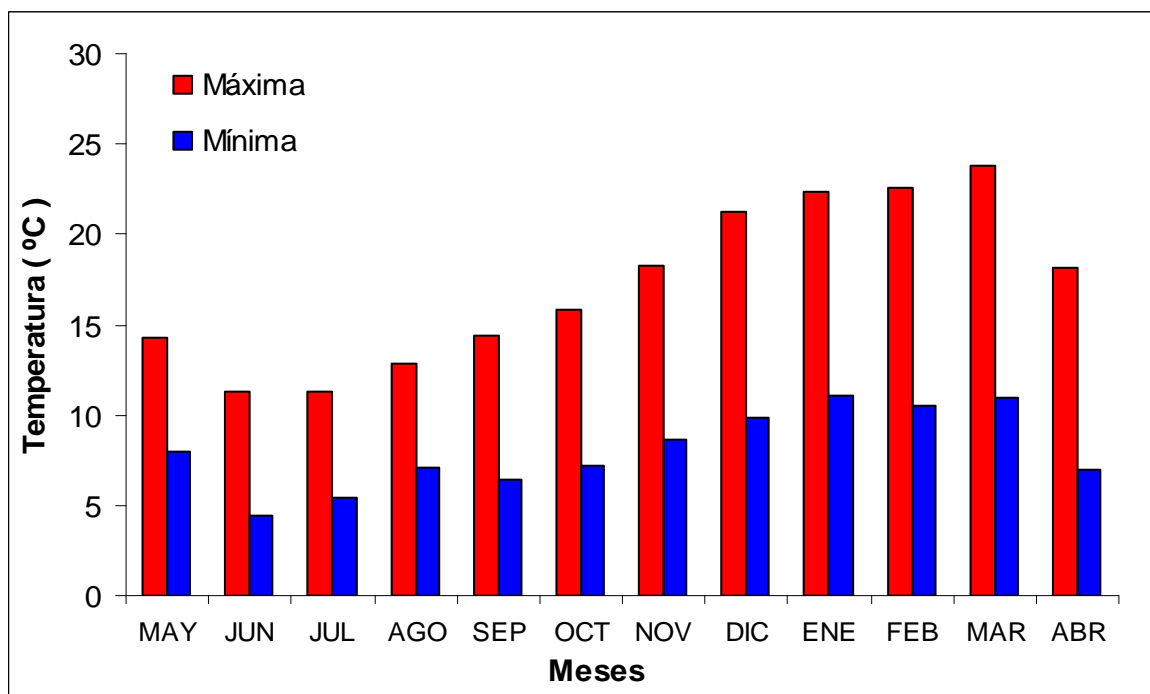


FIGURA 2 Temperatura máxima y mínima media mensual (°C) registrada durante la temporada del cultivo (mayo 2002 - abril 2003).

3.1.1.4 Suma térmica. Con los datos del registro de temperaturas se calculó la suma térmica que presentó el ensayo, desde el establecimiento hasta la cosecha, expresado en los días en que se efectuó las colectas. Este cálculo se realizó utilizando la temperatura media diaria acumulada con una base de 0 °C.

CUADRO 1 Suma térmica en grados días acumulados (GDA) registrado durante el desarrollo del cultivo de papa.

	Días después de plantación							
	47	54	61	68	75	82	89	96
GDA	559	652	745	847	963	1079	1176	1277
	103	110	117	124	131	138	145	
GDA	1396	1515	1627	1743	1866	1986	2106	

3.1.1.5 Características químicas. Los primeros 20 cm de suelo donde se realizó el ensayo, presentó las siguientes características químicas y fue determinado en el laboratorio de análisis de suelos del Instituto Ingeniería Agraria y Suelos de la Universidad Austral de Chile.

CUADRO 2 Análisis químico del área del ensayo.

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

3.1.2 Fertilizantes. Los fertilizantes aplicados en el ensayo corresponden a fertilizantes granulados de origen mineral, previamente tamizados a 3 mm. En el suministro de los macronutrientes primarios se utilizó: en el caso del fósforo una aplicación de superfosfato triple (46% P₂O₅), el nitrógeno se aplicó en forma de Nitram magnesico (26% N) y el potasio en forma de cloruro de potasio (60% K₂O).

El aporte de macronutrientes secundarios y micronutrientes se realizó a través de una aplicación de 20 kg ha⁻¹ de una mezcla comercial Frölich (Cuadro 3) junto con 10 kg ha⁻¹ de Boronatrocalcita (NaCaB₅O₉*8H₂O), contribuyendo estos con los siguientes elementos Fe, Mg, Zn, Cu, B, S, Cl y Mo.

Como enmienda calcárea se utilizó una cal dolomítica Magnecal 7 ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_4$) que a su vez aporta magnesio. Esta cal tiene características de finura inferior a 0,150 mm en el 90-95% del producto.

CUADRO 3 Composición química de la mezcla comercial Frölich.

Compuesto	g/100g
Carbonato de calcio	28
Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)	25 (22 B)
Sulfato de magnesio	20
Oxido de magnesio	10
Sulfato de zinc	10
Sulfato de cobre	6
Trióxido de molibdeno	1

3.1.3 Material vegetal. Los tubérculos utilizados corresponden a semilla de tipo corriente del cultivar Desirée con características de semitardía, periodo vegetativo de 140 días, alto rendimiento, buen almacenaje y susceptible a la sequía. Produce tubérculos grandes, ovalados alargados, con piel colorada y pulpa amarilla clara. Posee resistencia de campo a tizón tardío, pero es susceptible al enrollamiento y a la sarna común. Es una variedad de consumo directo con muy buenas características culinarias (BANSE y KALAZICH, 1977).

3.2 Método

La metodología empleada en el presente estudio se detalla a continuación.

3.2.1 Tratamientos de fertilización fosforada. El ensayo tuvo un diseño para evaluar el comportamiento del cultivo de papa bajo distintos niveles de P, para realizar esto, se aplicó una fertilización fosforada baja, media y alta correspondiendo a una dosis equivalentes de 60 (T_2), 180 (T_3) y 300 (T_4) $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente, dejando un cuarto tratamiento de control sin aplicación de fertilizante fosforado (T_1).

3.2.2 Diseño experimental. Consistió en un diseño de bloques completos al azar de cuatro tratamientos y tres repeticiones (Figura 3).

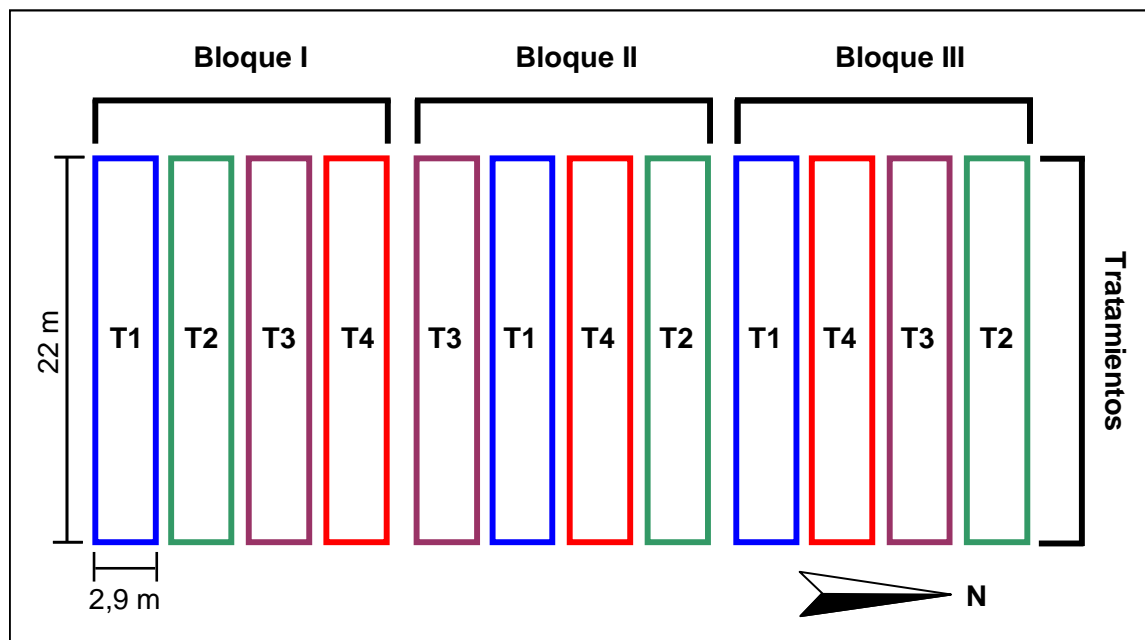


FIGURA 3 Diagrama del ensayo.

3.2.3 Tamaño de parcela. La superficie que se utilizó para el ensayo fue de 34,8 metros de ancho y 22 metros de largo, subdividido en parcelas de 2,90 metros de ancho para dar lugar a las repeticiones.

3.2.4 Preparación de suelo y fertilización. Antes del establecimiento, se realizó una enmienda calcárea, incorporada en los primeros 20 cm de suelo, en todo el sector del ensayo el día 10 de mayo de 2002 con una dosis de equivalente a 4 ton ha⁻¹ de Magnecal 7 (90-95% de CaCO₃).

La fertilización del ensayo se realizó el mismo día de plantación, esta se efectuó de forma incorporada en los primeros 20 cm de suelo con un rotovator. El fertilizante que define los cuatro tratamientos es el fósforo aplicándose en dosis de 0, 60, 180, 300 kg P₂O₅ ha⁻¹. Los demás nutrientes mantuvieron dosis constantes para todos los tratamientos. La dosis de nitrógeno fue de 230 kg N ha⁻¹ aplicados de forma parcializada: 30 kg N ha⁻¹ en la plantación y 200 kg N/ha el día 19 de noviembre. La

dosis de potasio aplicada fue de 200 kg K₂O ha⁻¹. Además se aplicó 30 kg MgO ha⁻¹, 20 kg ha⁻¹ de micronutrientes Frölich y 10 kg ha⁻¹ de Boronatrocita, todos estos aplicados el día del establecimiento del ensayo.

Se realizó una aplicación de herbicida pre-emergente (1,5 L ha⁻¹ de Metribuzina) para el control de malezas anuales de hoja ancha el día 8 de octubre de 2002.

Para el control de preventivo enfermedades del follaje como: tizón temprano (*Alternaria solani*) y tizón tardío (*Phytophthora infestans*) se aplicó un fungicida con acción de contacto y sistémica Tattoo C (2,6 L ha⁻¹ de Propamocarb-HCl + Chlorothalonil) el día 3 de diciembre de 2002.

3.2.5 Fecha y método de plantación. El ensayo se estableció el 25 de septiembre de 2002. El sistema de plantación consistió en parcelas rectangulares con una superficie de 64 m² por parcela. Cada una de las 12 parcelas, correspondiente a 4 tratamientos de 3 repeticiones cada una, esta constituida por 3 hileras de plantas bajo un marco de plantación de 0,8 m entre hilera y de 0,18 m sobre hilera. El tubérculo semilla se plantó a una profundidad de 12 cm.

3.2.6 Forma de los muestreos. Se tomó un total de 15 muestras las cuales fueron recolectadas semanalmente a partir del día 11 de noviembre de 2002 hasta la madurez fisiológica del cultivo el día 17 de febrero del 2003.

La colecta consistió en extraer dos plantas por cada repetición de los tratamientos de la hilera central e ir intercalando dos plantas por medio semanalmente, luego estas muestras se colocaron en bolsas plásticas, previamente rotuladas, para posteriormente ser llevadas al laboratorio.

3.3 Variables de medición directa. Las variables de medición directa se obtuvieron de los datos procesados en el laboratorio que permitieron evaluar el ensayo, estos son: la biomasa como materia seca y la concentración de fósforo.

3.3.1 Determinación de biomasa como materia seca. Después de cada colecta, se lavó las muestras con abundante agua potable para luego efectuar un último lavado y enjuague con agua destilada en el laboratorio. Realizada esta labor, se colocaron las muestras en bolsas de papel y fueron llevadas a un horno de aire forzado con una temperatura de 60 °C hasta que las muestras registraran un peso constante (48-64 horas). Una vez que las muestras se enfriaron fueron pesadas para determinar la materia seca total, posteriormente las muestras se separaron en los siguientes órganos: hojas, tallos, tubérculos y estolones; los cuales fueron nuevamente pesados para determinar el peso individual y la contribución porcentual en el total de la muestra. Luego fueron puestas en bolsas de papel con su respectivo rótulo.

3.3.2 Determinación de la concentración de fósforo. La determinación de la concentración de P se realizó para todos los órganos mediante el método de calcinación descrito por SAAVEDRA (1975). Para esto, se tomó 2 gramos de cada muestra, previamente molidas en un molinete Thomas Willey 3383-L40 con tamiz de 0.9 mm y se depositó en crisoles, los cuales se llevaron a una mufla a 500 °C por un tiempo de 4 horas. Una vez pasado este tiempo, las muestras se humectaron con 1 ml de agua destilada y se les agregaron 10 ml de mezcla ácida (HCl y HNO₃), luego se llevaron los crisoles al plato caliente, hasta que hirvieron. Seguido a esto, la solución resultante se filtró y se trasvasijó en matraces para aforar a 50 ml. De éste matraz, se tomó 10 ml y se mezcló con 20 ml de la solución desarrollo color (vanadato - molibdato) y se dejó reposar por una hora para luego nuevamente aforar con agua destilada hasta los 50 ml. Para poder determinar la concentración existente de fósforo, se extrajo parte de esta solución (alícuota) y se puso en cubetas de vidrio para ser leídas con espectrofotómetro UV/Visible (en una longitud de onda de 420 nm) previamente calibrado con concentraciones de P conocidas.

3.4 Variables derivadas

Estas variables de la nutrición fosforada se determinaron a partir de las variables de medición directas.

3.4.1 Absorción de fósforo. Se obtuvo la absorción de fósforo para los cuatro tratamientos a partir de la concentración de fósforo de los análisis foliares y el peso de la materia seca correspondiente de cada órgano evaluado.

$$P_{\text{abs } \text{órgano}} \text{ (kg)} = \%P_{\text{órgano}} * MS_{\text{órgano}} \text{ (kg)} \quad (3.1)$$

3.4.2 Tasa de crecimiento. Las tasas de crecimiento se obtuvieron ajustado primeramente los datos de materia seca de cada órgano a regresiones no lineales de tipo Boltzmann sigmoideas y Gaussianas, dependiendo de su comportamiento en la acumulación y a las pérdidas de material sufridas por estas. Luego se calculó las tasas a partir de los datos de materia seca acumulada de cada órgano entre dos tiempos sucesivos de muestreos (semanalmente) para obtener tasas de crecimiento diarias en cada órgano.

3.4.3 Tasa de absorción. Las tasas de absorción de fósforo se obtuvieron a partir de los análisis foliares que se realizaron para los cuatro tratamientos durante todas las semanas que duró el cultivo, estos datos al igual que las tasas de crecimiento, se ajustaron a regresiones no lineales de tipo Boltzmann sigmoideas y Gaussianas, dependiendo del comportamiento de las acumulaciones y desacumulaciones de P presentadas por cada órgano. Luego estas tasas se obtuvieron por diferencia entre la absorción de P para cada órgano entre dos momentos sucesivos (una semana). De esta manera se obtuvieron tasas de absorción de fósforo diarias.

3.5 Parámetros de la fertilización fosforada.

Para determinar una fertilización razonada, es necesario conocer ciertos parámetros de la nutrición fosforada como: requerimiento interno de fósforo, índice de cosecha e índice de extracción de fósforo.

3.5.1 Requerimiento interno de fósforo. Se calculó el requerimiento interno de fósforo (RP) durante todo período de desarrollo del cultivo. Este parámetro se determinó de la relación entre la absorción total y la materia seca total acumulada.

$$RP = \frac{P \text{ abs}_{\text{total}} \text{ (kg)}}{MS_{\text{total}} \text{ (kg)}} \quad (3.2)$$

3.5.2 Índice de cosecha. El índice de cosecha (IC) se determinó de la relación que existe entre el producto cosechado, que en este caso correspondió a los tubérculos, y el total de materia seca producido por la planta, el cual se expresó como porcentaje.

$$IC = \frac{MS_{\text{tubérculos}} \text{ (kg)}}{\text{kg } MS_{\text{total}} \text{ (kg)}} * 100 \quad (3.3)$$

3.5.3 Índice de extracción de fósforo. Se determinó semanalmente el índice de extracción de P (IEP) de la relación producida entre el fósforo absorbido por el tubérculo y el fósforo absorbido por el total de la planta. Este parámetro se expresó de forma porcentual y se realizó para todos los tratamientos.

$$IEP = \frac{P \text{ abs}_{\text{tubérculos}} \text{ (kg)}}{P \text{ abs}_{\text{total}} \text{ (kg)}} * 100 \quad (3.4)$$

3.6 Análisis estadístico

Todos los datos obtenidos se sometieron inicialmente a un test de normalidad y homogeneidad de varianza, luego en el programa estadístico Statgraphics 2.0, se realizó un análisis de varianza (Andeva simple) para determinar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en los distintos momentos de colecta. Se utilizó la prueba de Tukey como comparación de las diferencias entre las medias de los muestreos.

El ajuste de las curvas de crecimiento y absorción de P acumuladas a regresiones no lineales, se realizó a través del programa estadístico GraphPad Prism 4.0, donde además de la ecuación se obtuvo el valor de R^2 y el valor del error estándar de la ecuación (Sy.x).

4 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Variables de medición directa evaluadas

Las variables medidas directamente en este estudio fueron: la producción acumulada de materia seca y la concentración de fósforo en cada órgano. Los resultados son presentados por cada órgano en forma independiente y como total producido por el cultivo de papa.

4.1.1 Producción de materia seca por órgano y total. Se determinó la materia seca acumulada en función del tiempo para el total del cultivo (hoja, tallo, estolón y tubérculo) y para cada órgano en forma independiente.

4.1.1.1 Materia seca de hojas. La producción de materia seca de las hojas, en los cuatro tratamientos, fue creciente desde el inicio de los muestreos, desde el día 47 después de plantación (ddp) hasta los 110 días ddp. Luego de este máximo de acumulación de materia seca de hojas, decreció a través del tiempo hasta la madurez fisiológica. Sin embargo, se observó una mayor disminución en los tratamientos de mayor y media fertilización fosforada y una menor disminución en los tratamientos de menor y sin fertilización fosforada (testigo). Este efecto puede deberse a un retraso en la fenología del cultivo de papas observado con los menores niveles de fertilidad fosforada (Figura 4).

Se detectaron diferencias significativas en la producción de biomasa de hojas solo en 5 de las 15 colectas realizadas. Las diferencias estadísticas se presentaron a los 75, 82, 103, 117 y 124 ddp entre el tratamiento de mayor fertilización ($300 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) y el tratamiento testigo (Cuadro 4), quedando los otros tratamientos en una situación intermedia. De esta forma, la biomasa de hojas producida se ordenó en función de las dosis de fósforo aplicadas, siendo mayor la producción de hojas con el aumento de las dosis de P.

Al momento de cosecha (día 145) la producción de materia seca de las hojas se incrementó entre 11 y 14 veces respecto al primer muestreo a los 47 días.

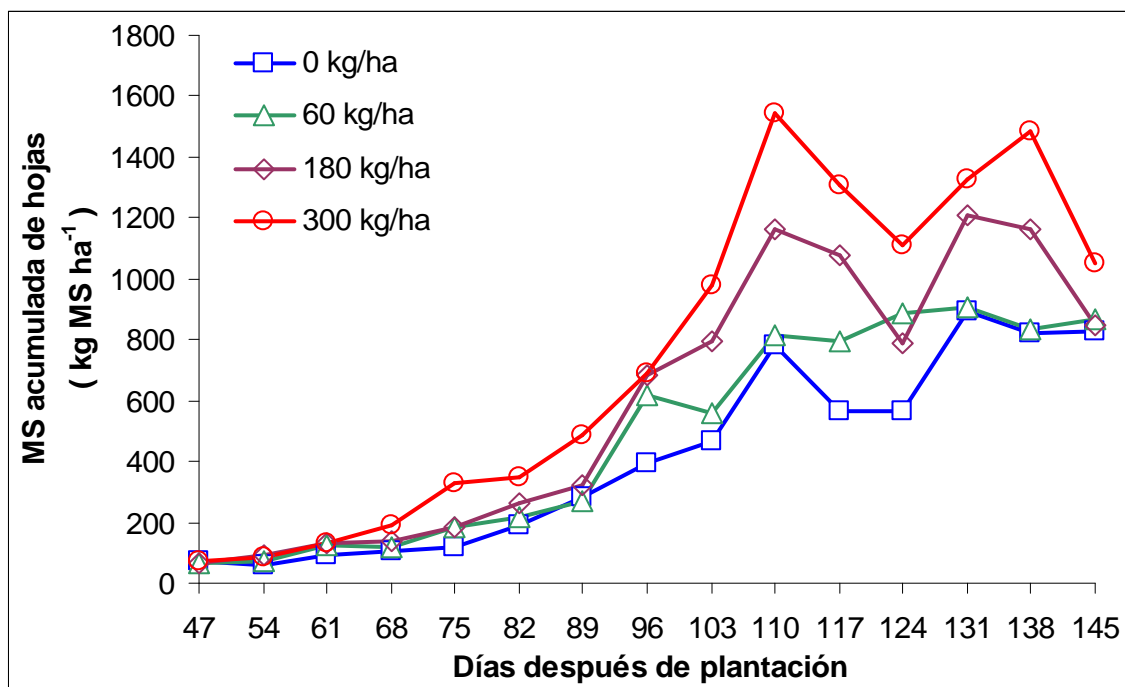


FIGURA 4 Biomasa producida por las hojas (kg MS ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

La tendencia descrita en este estudio por la biomasa de hojas fueron similares a estudios en órganos aéreos realizados por MCCOLLUM (1978a), quien analizó la acumulación de materia seca bajo diferentes dosis de fósforo (cultivar Pungo) en USA, atribuyendo el descenso de materia seca producida en hojas principalmente a la caída de hojas senescentes, como también a la removilización de minerales y carbohidratos hacia órganos de reserva. Sin embargo, MCCOLLUM (1978a) obtuvo un máximo de acumulación de materia seca entre los 65 y 75 ddp para luego decrecer hasta cosecha, lo cual fue diferente a este estudio dado que el máximo fue a los 110 ddp en los tratamientos de mayor y media fertilización fosforada y a los 131 ddp en los tratamientos de menor y sin fertilización fosforada, debido posiblemente, a que Pungo es cultivar de ciclo de madurez corto (100-110 días).

4.1.1.2 Materia seca de tallos. La biomasa de los tallos presentó un lento incremento en todos los tratamientos, llegando a un máximo a los 110 días después de plantación

(Figura 5). De este momento se observó una disminución que se mantuvo hasta la cosecha (madurez fisiológica).

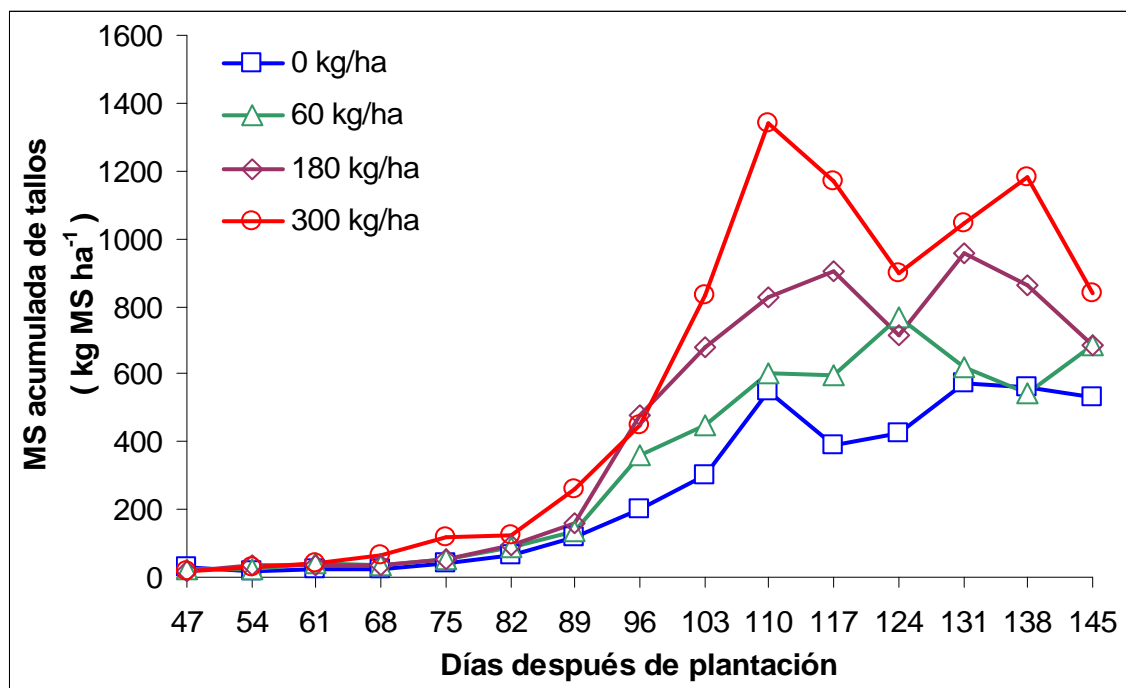


FIGURA 5 Biomasa producida por los tallos (kg MS ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

Se determinaron diferencias significativas principalmente entre el tratamiento de mayor fertilización y el testigo a los 54, 68, 75, 103 y 117 días después de plantación. A la cosecha del cultivo la biomasa de los tallos varió entre 532 y $840 \text{ kg MS ha}^{-1}$, no existiendo diferencias debido a la variabilidad que presentó éste órgano (Cuadro 4).

Durante los cuatro muestreos iniciales se observó un lento crecimiento de los tallos en todos los tratamientos hasta los 61 días (inicio de tuberización), una semana después la producción incrementó linealmente, la cual varió entre 22 y 66 kg MS ha^{-1} , ordenándose ésta en función de la dosis de P aplicada, hasta un máximo a los 110, 117, 124 y 131 días para cada tratamiento respectivamente, ordenándose en función de la dosis de P aplicada. El máximo del tratamiento de mayor fertilización fosforada coincide con el que se observó en la producción de hojas (110 días), donde la

producción de las hojas fue de 1,4 veces mayor a la de los tallos. Las tendencias de crecimiento de estos órganos concuerdan con los antecedentes recopilados por KOLBE y STEPHAN-BECKMANN (1997a), donde señalan que el comportamiento de la acumulación de materia seca en tallos, incluida la etapa de removilizaciones en senescencia, es paralela al crecimiento de las hojas, siendo ésta un 25% inferior en tallos, con la obtención de un máximo anticipado en relación al presente estudio cercano a los 95 ddp. Por otra parte, en un estudio realizado en Australia por MAIER *et al.* (2002a), evaluaron el efecto de la aplicación de carbonato de calcio y fertilización fosfatada (superfosfato simple) donde obtuvieron como resultado efectos significativos en el incremento de materia seca y el largo que presentan los tallos, no así la relación de número de éstos por planta al aplicar una dosis de 170 kg P₂O₅ ha⁻¹. Esta dosis se aproxima a la del tratamiento de media fertilización fosfatada, el cual no presentó diferencia significativa con el tratamiento testigo en la última colecta.

4.1.1.3 Materia seca de estolones. La materia seca de los estolones independiente de los tratamientos presentó un comportamiento errático que no marcó ningún tipo de tendencia durante su desarrollo (Figura 6). Se observó que los valores fluctuaron entre 15 y 60 kg MS ha⁻¹, siendo este órgano el que tuvo el menor aporte al total de materia seca producido por el cultivo. Estos resultados son inferiores (0,6 g/planta) a los reportados por Raeuber y Engel (1966) citados por KOLBE y STEPHAN-BECKMANN (1997b), quienes mostraron un crecimiento lineal de materia seca producida por los estolones desde los 15 hasta los 45 días después de emergencia para luego mantenerse constante en un valor aproximado a los 4 g de materia seca por planta hasta la cosecha. No existe una explicación clara para esta diferencia, dada la escasa información en la literatura con respecto al crecimiento de estolones. Sin embargo, debe considerarse que los cultivares pueden variar genéticamente en su capacidad de presentar estolones.

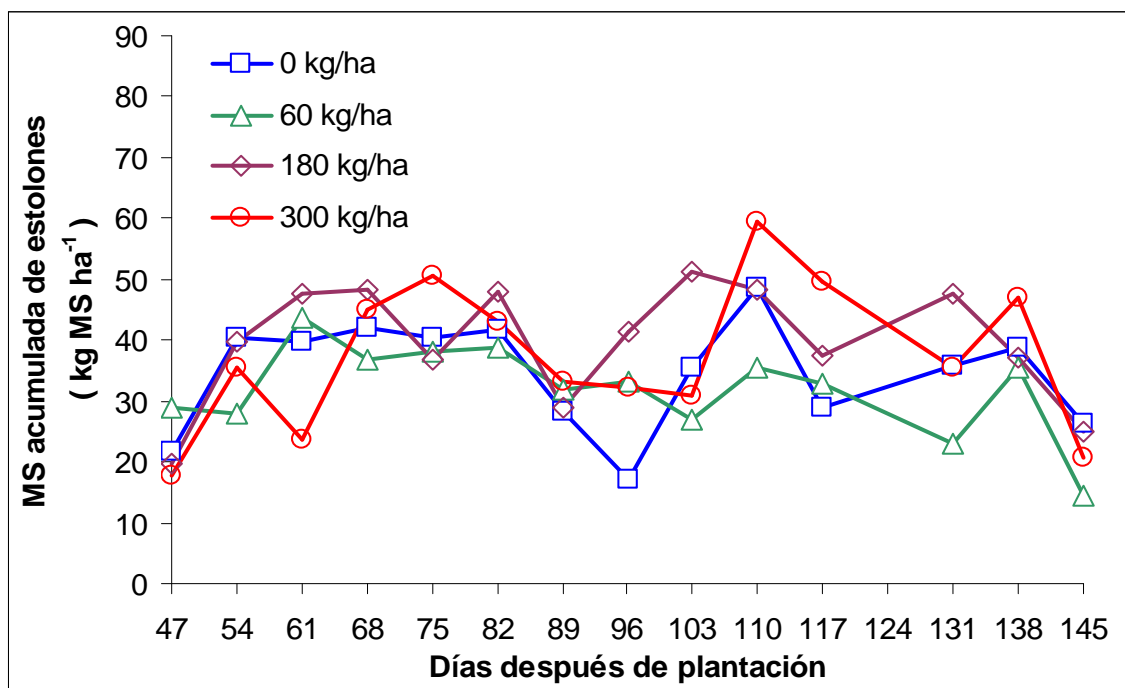


FIGURA 6 Biomasa producida por los estolones (kg MS ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

A los 124 días después de la plantación se extravió la muestra de los estolones, razón que explica la falta de estos datos en la figura presentada para este órgano.

4.1.1.4 Materia seca de tubérculos. La biomasa producida por los tubérculos desde el inicio de los muestreos presentó una curva creciente en todos los tratamientos hasta un máximo a los 138 días, momento que coincide con el inicio de la maduración (Figura 7). Luego de este momento existió la tendencia a mantener la producción relativamente constante hasta cosecha.

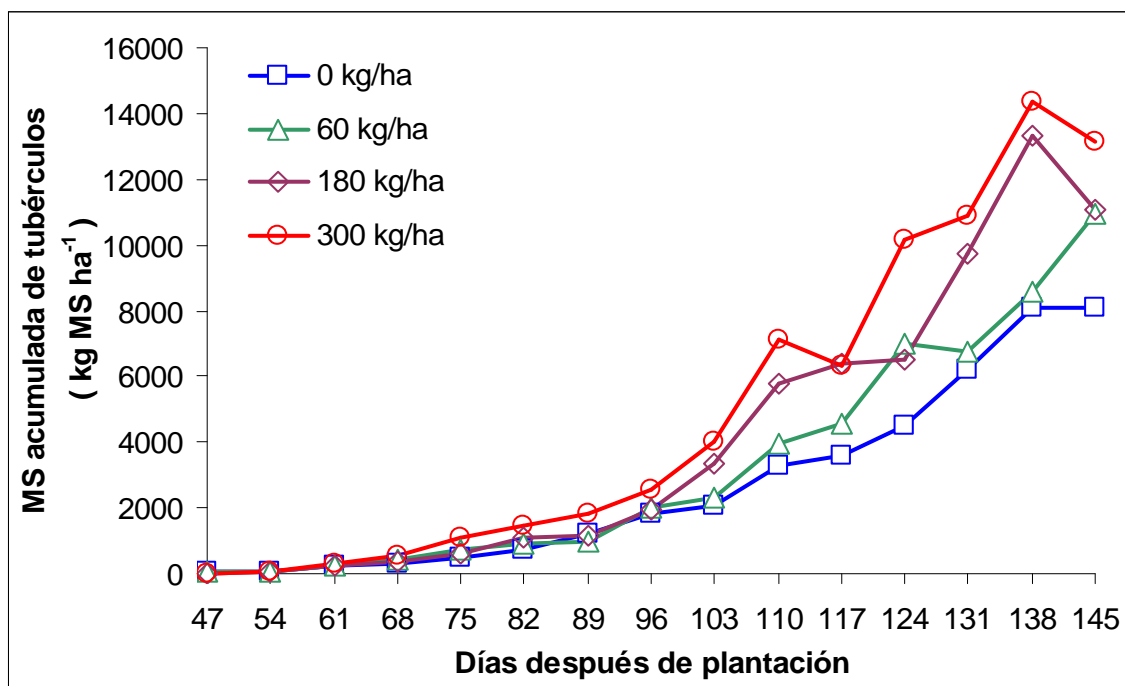


FIGURA 7 Biomasa producida por los tubérculos (kg MS ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

Se observó un incremento paulatino desde el inicio de los muestreos hasta los 61 días, donde ésta producción aumento entre 5 a 6 veces más respecto a la semana anterior (inicio de tuberización). De este momento se observa un aumento sostenido de la materia seca en todos los tratamientos que llega al máximo determinado a los 138 días de plantación con valores entre 8100 y $14300 \text{ kg MS ha}^{-1}$ para mantenerse relativamente constante hasta la cosecha (madurez fisiológica)

El estudio presentó diferencias estadísticamente significativas los días 82, 110, 124, 131 y 145 después de plantación entre el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el tratamiento testigo (Cuadro 4).

Se analizó el efecto que presentó cada tratamiento en función del tiempo (Anexo 1), observándose que en los dos últimos muestreos no hubo diferencias significativas para cada tratamiento, sugiriendo de esta manera, que las curvas presentaron un comportamiento sigmoideo en relación a la producción de materia

seca, siendo independiente del tratamiento. En un estudio de campo realizado por FREEMAN *et al.* (1998), en Australia, evaluaron el efecto de la fertilización fosforada en distintos sitios con diferentes disponibilidades de P Olsen, reportando una respuesta significativa en 11 de 12 y 6 de 9 sitios en los cultivares Russet Burbank y Kennebec, respectivamente, al aumento de rendimiento de los tubérculos. Las causas que los autores señalan es que existe un aumento significativo en el número de tubérculos por planta, como también un incremento en el tamaño de 1,4 veces en Russet Burbank y 1,8 veces en Kennebec. Por su parte GUERRA y CUBELO (1985), observaron una mayor acumulación de materia seca a medida que la planta se acerca al momento de cosecha, desde los 90 ddp la movilización de nutrientes pasa con mayor intensidad de las hojas a los tubérculos.

4.1.1.5 Materia seca total. Desde el primer muestreo existió un aumento de la materia seca total (incluyendo la parte radical) en todos los tratamientos, alcanzando un máximo a los 138 días después de plantación (inicio de maduración) para mantener esta producción relativamente constante hasta cosecha (Figura 8).

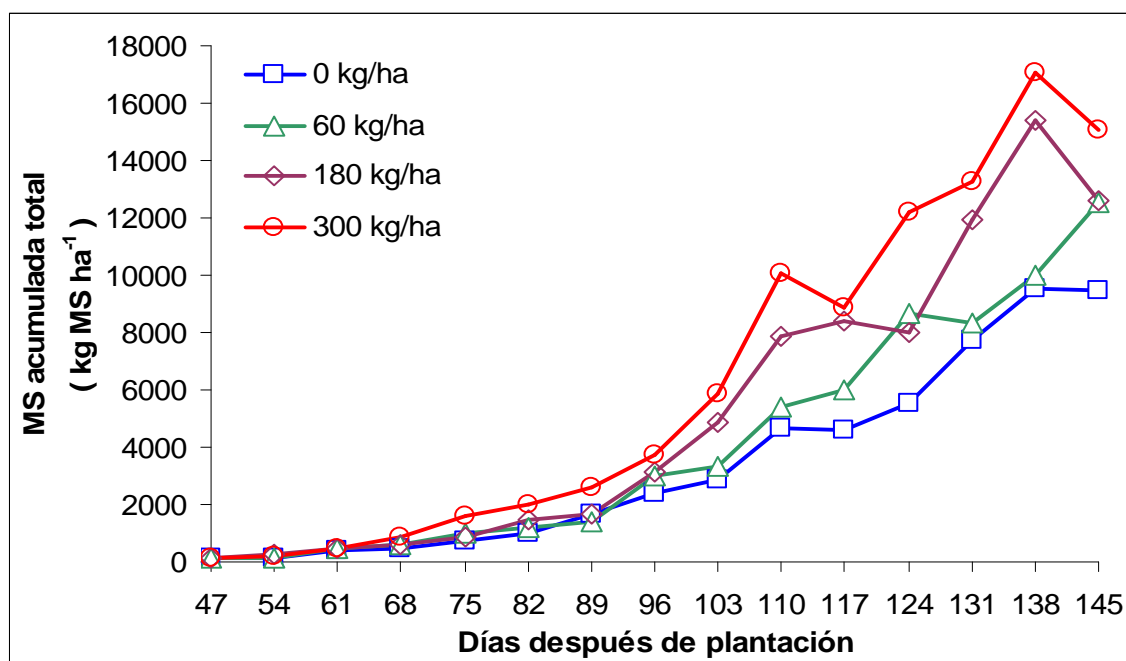


FIGURA 8 Biomasa total producida (kg MS ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

Desde los 75 días hasta la cosecha existió diferencias significativas entre los tratamientos de mayor fertilización con P y el tratamiento sin aplicación de P, a excepción de los 86, 96 y 138 días después de plantación (Cuadro 4).

El máximo de biomasa producido coincide con el máximo determinado para los tubérculos, en el momento y es similar en la producción alcanzada, indicando que éste órgano es el de mayor participación en la producción de biomasa total. Del máximo de producción hasta cosecha, no hubo diferencias significativas de los tratamientos en función del tiempo (Anexo 2), sugiriendo, al igual que en los tubérculos, un comportamiento sigmoideo en todos los tratamientos. Este comportamiento concuerda con el estudio realizado por MCCOLLUM (1978b), donde analizó el crecimiento del cultivo de papa en diferentes dosis de P, señalando que plantas en dosis altas de P producen en menor tiempo (75 ddp) el doble en su máximo de índice de área foliar, por lo tanto, estas plantas son más eficientes en convertir la energía solar durante una mayor parte del ciclo de producción. Esto llevó que a los 95 ddp obtuvo dos veces más materia seca total acumulada entre el tratamiento de mayor fertilización y el de menor (con una diferencia de 165 kg P_2O_5), comparado al presente estudio donde la máxima diferencia fue de 1,8 veces presentada a los 138 ddp entre el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el tratamiento testigo, esto indica que en forma relativa el cultivar de este estudio es menos eficiente que el cultivar Pungo.

Se observó que a los 124 ddp el tratamiento de media dosis de P es menor que el tratamiento de baja dosis de P, este efecto estuvo presente en la producción de materia seca de todos los órganos, donde no existieron diferencias significativas entre los tratamientos.

CUADRO 4 Producción de materia seca acumulada (kg MS ha⁻¹) por órgano en distintos dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación																			
		47			54			61			68			75							
Hojas	0	74	±	36	a	62	±	7	a	89	±	23	a	105	±	34	a	117	±	5	a
	60	67	±	44	a	70	±	26	a	123	±	28	a	121	±	11	a	186	±	79	a b
	180	64	±	24	a	93	±	7	a	130	±	35	a	135	±	49	a	186	±	53	a b
	300	75	±	26	a	87	±	10	a	131	±	47	a	192	±	59	a	329	±	57	b
Tallos	0	27	±	26	a	16	±	3	a	24	±	3	a	22	±	11	a	38	±	6	a
	60	24	±	25	a	22	±	8	a b	40	±	15	a	33	±	5	a	55	±	20	a
	180	19	±	18	a	38	±	7	b	37	±	17	a	37	±	8	a b	51	±	17	a
	300	18	±	12	a	32	±	13	a b	43	±	15	a	66	±	17	b	115	±	35	b
Estolones	0	22	±	15	a	41	±	5	a	40	±	6	a	42	±	10	a	40	±	6	a
	60	29	±	37	a	28	±	10	a	44	±	12	a	37	±	6	a	38	±	1	a
	180	20	±	12	a	40	±	19	a	48	±	15	a	48	±	20	a	37	±	1	a
	300	18	±	7	a	35	±	12	a	24	±	9	a	45	±	12	a	51	±	16	a
Tubérculos	0	37	±	23	a	46	±	43	a	264	±	149	a	321	±	126	a	509	±	82	a
	60	42	±	56	a	45	±	34	a	248	±	77	a	433	±	52	a	727	±	391	a
	180	17	±	12	a	82	±	36	a	254	±	89	a	391	±	117	a	619	±	224	a
	300	11	±	11	a	58	±	30	a	299	±	112	a	568	±	178	a	1077	±	205	a
Total	0	160	±	98	a	164	±	45	a	416	±	175	a	491	±	176	a	705	±	72	a
	60	137	±	145	a	165	±	55	a	454	±	125	a	623	±	52	a	1006	±	491	a b
	180	120	±	63	a	252	±	63	a	468	±	147	a	611	±	182	a	892	±	279	a b
	300	122	±	44	a	212	±	57	a	498	±	154	a	871	±	249	a	1572	±	294	b

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 4.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación																			
		82		89		96		103		110											
Hojas	0	192	±	19	a	281	±	92	a	396	±	112	a	467	±	109	a	783	±	170	a
	60	219	±	15	a	268	±	57	a	619	±	135	a	558	±	76	a	812	±	69	a
	180	265	±	59	a b	323	±	88	a	684	±	118	a	798	±	190	a b	1160	±	256	a
	300	347	±	65	b	483	±	166	a	689	±	173	a	976	±	116	b	1544	±	508	a
Tallos	0	67	±	19	a	116	±	40	a	204	±	21	a	300	±	101	a	547	±	141	a
	60	87	±	41	a	134	±	64	a	360	±	127	a	446	±	100	a b	602	±	182	a
	180	93	±	31	a	161	±	62	a	478	±	114	a	680	±	277	a b	829	±	169	a
	300	127	±	32	a	258	±	110	a	451	±	130	a	833	±	180	b	1340	±	599	a
Estolones	0	42	±	7	a	28	±	13	a	17	±	10	a	35	±	15	a	49	±	18	a
	60	39	±	5	a	32	±	9	a	33	±	4	a	27	±	14	a	36	±	4	a
	180	48	±	18	a	29	±	4	a	41	±	15	a	51	±	18	a	48	±	9	a
	300	43	±	7	a	33	±	22	a	32	±	4	a	31	±	9	a	59	±	9	a
Tubérculos	0	709	±	121	a	1212	±	300	a	1813	±	429	a	2097	±	795	a	3303	±	617	a
	60	884	±	266	a	975	±	297	a	2009	±	25	a	2301	±	545	a	3957	±	902	a
	180	1066	±	259	a b	1160	±	147	a	1933	±	538	a	3367	±	1210	a	5806	±	1693	a b
	300	1488	±	278	b	1847	±	576	a	2547	±	148	a	4038	±	433	a	7122	±	505	b
Total	0	1009	±	84	a	1637	±	439	a	2430	±	546	a	2900	±	598	a	4681	±	927	a
	60	1228	±	224	a	1409	±	339	a	3020	±	274	a	3332	±	690	a b	5407	±	1105	a
	180	1472	±	364	a b	1673	±	300	a	3136	±	765	a	4896	±	1685	a b	7843	±	2119	a b
	300	2005	±	304	b	2622	±	854	a	3718	±	330	a	5878	±	707	b	10065	±	1558	b

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 4.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación																			
		117			124			131			138			145							
Hojas	0	566	±	56	a	567	±	141	a	893	±	104	a	820	±	56	a	826	±	140	a
	60	795	±	89	a b	884	±	148	a b	909	±	252	a	835	±	57	a	866	±	396	a
	180	1080	±	303	a b	785	±	59	a b	1209	±	491	a	1160	±	539	a	850	±	287	a
	300	1308	±	256	b	1110	±	211	b	1324	±	167	a	1484	±	731	a	1052	±	232	a
Tallos	0	392	±	71	a	424	±	185	a	575	±	66	a	564	±	62	a	532	±	63	a
	60	597	±	37	a b	767	±	318	a	621	±	186	a	543	±	35	a	687	±	366	a
	180	905	±	263	a b	712	±	17	a	957	±	275	a	861	±	380	a	685	±	169	a
	300	1170	±	373	b	898	±	193	a	1047	±	129	a	1179	±	681	a	840	±	295	a
Estolones	0	29	±	9	a		±			36	±	3	a b	39	±	5	a	26	±	15	a
	60	33	±	14	a		±			23	±	10	a	35	±	18	a	15	±	6	a
	180	37	±	17	a		±			48	±	10	b	37	±	18	a	25	±	24	a
	300	50	±	18	a		±			36	±	8	a b	47	±	20	a	21	±	15	a
Tubérculos	0	3615	±	1017	a	4513	±	630	a	6215	±	777	a	8106	±	841	a	8103	±	603	a
	60	4570	±	248	a	6998	±	731	a b	6776	±	1883	a b	8604	±	548	a	10970	±	1967	a b
	180	6364	±	911	a	6535	±	806	a b	9750	±	1081	a b	13334	±	2539	a	11069	±	1030	a b
	300	6319	±	1730	a	10168	±	2559	b	10870	±	2416	b	14348	±	3833	a	13134	±	1640	b
Total	0	4601	±	1119	a	5503	±	889	a	7718	±	753	a	9528	±	903	a	9487	±	489	a
	60	5994	±	336	a b	8650	±	316	a	8330	±	2312	a b	10018	±	533	a	12538	±	2689	a b
	180	8386	±	1292	a b	8032	±	735	a	11964	±	1793	a b	15392	±	3466	a	12629	±	878	a b
	300	8848	±	2374	b	12176	±	2352	b	13277	±	2590	b	17058	±	5262	a	15046	±	2138	b

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

4.1.2 Concentración de fósforo. Se determinó la concentración de fósforo para cada órgano de la papa, siendo ésta expresada como porcentaje de fósforo en relación a la materia seca producida.

4.1.2.1 Concentración de fósforo en hojas. La concentración de fósforo de las hojas se determinó desde los 47 ddp hasta la madurez fisiológica (Figura 9).

Desde el inicio de los muestreos la curva de concentración de P disminuyó en todos los tratamientos hasta los 61 días, coincidiendo este momento con el inicio de la tuberización, luego esta concentración incrementó en todos los tratamientos hasta un máximo a los 96 días, momento en que las plantas se encontraban en estado de floración, desde este momento la concentración de fósforo disminuyó constantemente hasta la cosecha.

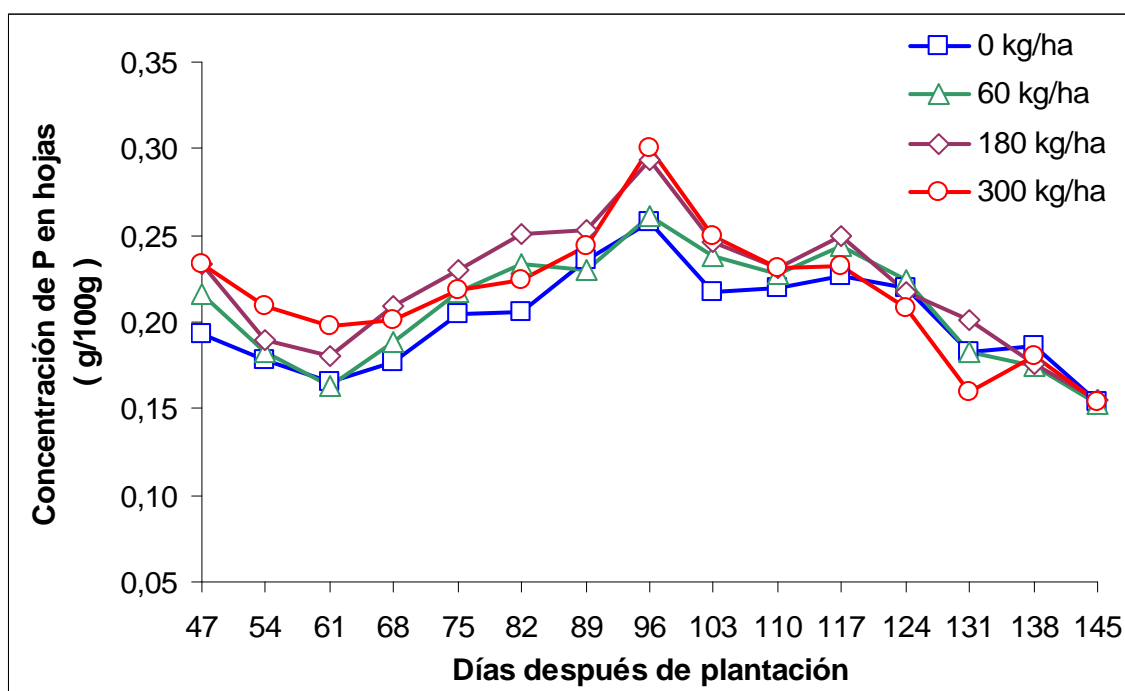


FIGURA 9 Concentración de fósforo en las hojas (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

En el máximo (día 96) la concentración de fósforo varió en un rango de 0,26 a 0,30 g/100g, entre el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el tratamiento testigo, no presentando diferencias significativas entre los estos (Cuadro 5).

Al momento de la cosecha, la concentración de P decreció a valores cercanos a los 0,15 g/100g en todos los tratamientos. Contrariamente a los datos obtenidos en éste estudio KOLBE y STEPHAN-BECKMANN (1997a), describieron que la concentración de P en las hojas decrece exponencial en función del tiempo desde estados tempranos, lo que no fue observado en este estudio. Ello lleva a especular de una potencial deficiencia de P en los estados temprano del cultivo en este estudio.

Datos recopilados por WALWORTH y MUNIZ (1993) indican que valores de deficiencia y suficiencia en hojas varían entre 0,3 y 0,6 g/100g P en estados tempranos, de 0,2 a 0,4 g/100g P en floración y 0,1 a 0,2 g/100g P en estados de senescencia del cultivo. Estos valores indicarían, que en este estudio se presentó una deficiencia nutricional temprana en el contenido de P de las hojas en todos los tratamientos, aunque no se detectó una sintomatología visible en terreno al momento de las colectas. En este estudio el contenido de P se incrementó desde la emergencia paulatinamente hasta los 96 ddp. A partir de este punto se presentaron niveles de suficiencia hasta cosecha de acuerdo a lo señalado por WALWORTH y MUNIZ (1993).

Una probable explicación para la deficiencia inicial o la menor concentración de P en los estados iniciales con respecto a lo determinado por otros autores, estaría en la forma de aplicación del fertilizante. En este estudio se utilizó una aplicación incorporada a los primeros 20 cm de suelo. Esta distribución del fertilizante es homogénea en el perfil de suelo de los primeros 20 cm de suelo y diferente del obtenido a través de una aplicación de fertilizante localizado. En la aplicación localizada se produce un contacto más temprano de las raíces con zonas de altas concentraciones de P, lo que se dificulta en la aplicación incorporada. De ahí que un menor nivel de P en el suelo, produce una menor probabilidad de contacto raíz-fertilizante y un desplace en el tiempo, lo que explicaría las diferencias significativas entre los tratamientos con el testigo y el posterior incremento en el nivel de P de las hojas, al contactar las raíces zonas de alta concentración de P. El hecho de que se

detecte esta “deficiencia” en las hojas y no en tallos se debe a que las hojas son claramente un órgano de acumulación en esta etapa y que posteriormente se transforman en órgano fuente para los tubérculos.

4.1.2.2 Concentración de fósforo en tallos. La concentración de fósforo de los tallos decreció paulatinamente desde el inicio de los muestreos (día 47) hasta la cosecha (Figura 10).

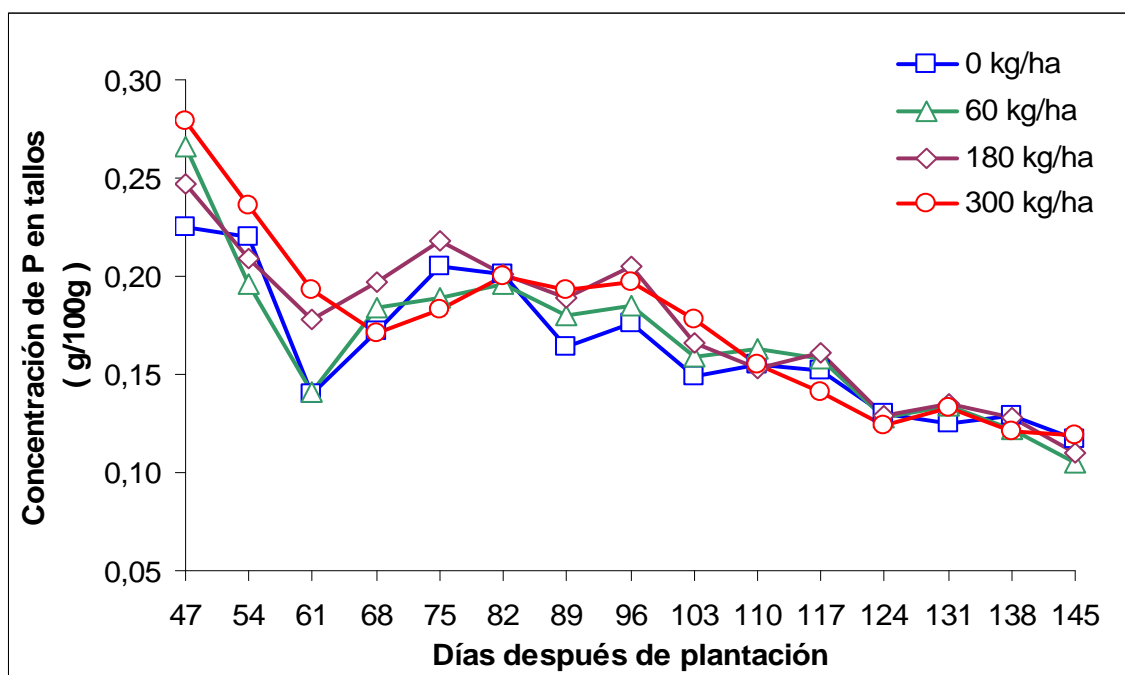


FIGURA 10 Concentración de fósforo en los tallos (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P₂O₅ ha⁻¹).

Las distintas dosis de fósforo no produjeron variaciones en la concentración de fósforo de los tallos entre los tratamientos, ya que no existieron diferencias significativas de ningún momento del desarrollo del cultivo (Cuadro 5)

Al primer muestreo la concentración de P de los tallos presentó un máximo en todos los tratamientos que fluctuó entre 0,23 y 0,28 g/100g, estas concentraciones fueron inicialmente las más altas presentadas en comparación a los otros órganos. En

este momento, las concentraciones de fósforo fueron entre 1,9 y 2,4 veces mayor a las observadas en la madurez fisiológica (día 145).

Según WALWORTH y MUNIZ (1993), una concentración adecuada durante la floración, para el cultivar Russet Burbank, es de 0,31 g/100g P. Por su parte, ROCHA *et al.* (1997), estudiaron las concentraciones críticas de P en diferentes órganos en el cultivar Baraka, indicando una concentración optima en tallos de 0,39 y 0,13 g/100g P a los 20 y 50 días después de emergencia respectivamente. Las concentraciones de P en los tallos del presente estudio, difieren mayormente en estados iniciales como en floración, no siendo esta diferencia relevante en la cosecha. Pese a esto, el estudio presentó un comportamiento a decrecer a través del tiempo acorde a la literatura.

4.1.2.3 Concentración de fósforo en estolones. La concentración de fósforo en los estolones presentó un comportamiento errático durante su desarrollo (Figura 11).

No obstante, se observó que las concentraciones de P oscilaron entre los 0,23 y 0,10 g/100g durante el desarrollo del cultivo. Solo se presentó diferencia significativa el día 145 después de plantación entre el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el tratamiento testigo.

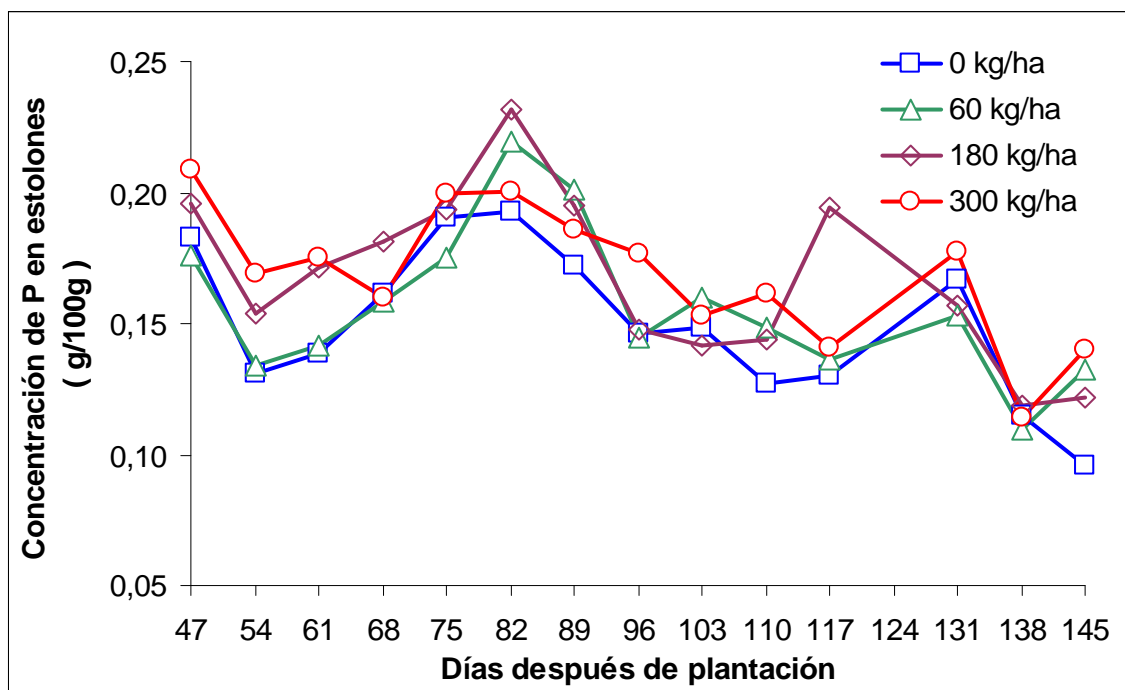


FIGURA 11 Concentración de fósforo en los estolones (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

4.1.2.4 Concentración de fósforo en tubérculos. Inicialmente, la curva de concentración de P de los tubérculos en todos los tratamientos disminuye desde la primera colecta (día 47) hasta un mínimo a los 68 ddp. A continuación, la concentración de P incrementa rápidamente hasta los 96 ddp (floración). Posteriormente, esta aumenta lentamente para alcanzar un máximo cercano a los 110 ddp, en este punto se observó que la concentración de P fluctuó en un rango entre 0,15 y 0,20 g/100g. Luego la concentración de P en los tubérculos decreció paulatinamente hasta la cosecha, momento donde la concentración de P varió de 0,13 a 0,16 g/100g (Figura 12), no presentado diferencias significativas (Cuadro 5). Estas concentraciones junto con la de las hojas son las más altas observadas al momento de cosecha.

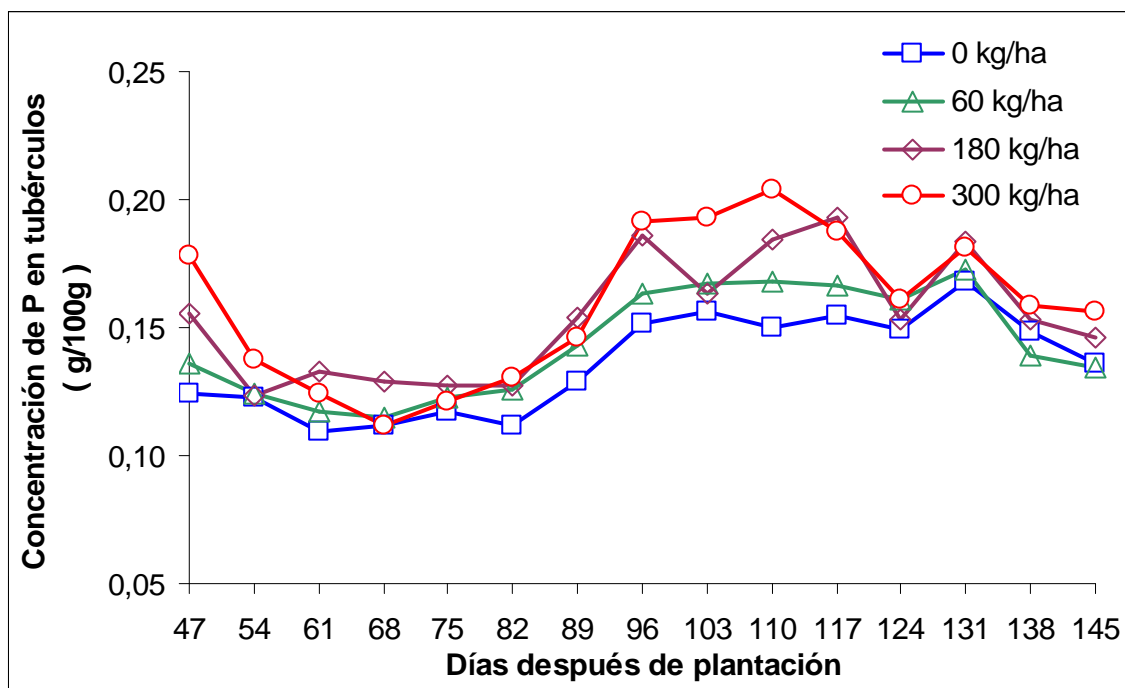


FIGURA 12 Concentración de fósforo en los tubérculos (g/100g) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

La disminución inicial de la concentración de P en todos los tratamientos es coincidente con la determinada para las hojas y similarmente es atribuida a la baja probabilidad por las raíces de contactar zonas de alta concentración de P en los estados iniciales, dado por la forma de aplicación del fertilizante. Esta disminución temprana en la concentración de P, sugiere que el tubérculo también podría indicar deficiencias tempranas de P, al igual que las hojas. En un estudio realizado por MCCOLLUM (1978a), encontró deficiencias nutricionales tempranas de P provocado por un estrés al cultivo durante este periodo, donde este autor atribuyó la disminución inicial de P como consecuencia a la escasez de humedad en el suelo, este caso registrado el año 1969 en Carolina del Norte (USA). El análisis del balance hídrico durante la temporada de establecimiento de este ensayo (Figura 1), descarta que sea esta la causa de alguna deficiencia hídrica.

En discrepancia a los resultados obtenidos en el presente estudio, WALWORTH y MUNIZ (1993), señalan que la concentración de P en los tubérculos disminuye a medida que se desarrolla el cultivo y la magnitud del valor se relaciona con el cultivar que se analice. De acuerdo a esto, JENKINS y HAKOOMAT (1999), obtuvieron concentraciones de 0,24 a 0,27 g/100g de P en el estado de tuberización y de 0,17 a 0,20 g/100g de P a cosecha en el cultivar Desirée, en un estudio de campo realizado en el Reino Unido.

CUADRO 5 Concentración de fósforo (g/ 100g) por órgano en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		47	54	61	68	75
Hojas	0	0,193 ± 0,013 a	0,179 ± 0,028 a	0,165 ± 0,010 a	0,176 ± 0,009 a	0,204 ± 0,032 a
	60	0,216 ± 0,029 a	0,182 ± 0,019 a	0,163 ± 0,031 a	0,188 ± 0,012 a b	0,218 ± 0,032 a
	180	0,234 ± 0,029 a	0,189 ± 0,021 a	0,180 ± 0,007 a	0,209 ± 0,016 b	0,230 ± 0,009 a
	300	0,233 ± 0,033 a	0,210 ± 0,038 a	0,198 ± 0,014 a	0,201 ± 0,008 a b	0,219 ± 0,005 a
Tallos	0	0,225 ± 0,029 a	0,220 ± 0,044 a	0,140 ± 0,011 a	0,172 ± 0,005 a	0,205 ± 0,031 a
	60	0,266 ± 0,071 a	0,196 ± 0,027 a	0,141 ± 0,006 a	0,184 ± 0,034 a	0,189 ± 0,026 a
	180	0,247 ± 0,015 a	0,209 ± 0,031 a	0,178 ± 0,051 a	0,197 ± 0,023 a	0,218 ± 0,010 a
	300	0,279 ± 0,012 a	0,236 ± 0,054 a	0,193 ± 0,023 a	0,171 ± 0,023 a	0,183 ± 0,015 a
Estolones	0	0,183 ± 0,021 a	0,131 ± 0,009 a	0,139 ± 0,009 a	0,162 ± 0,020 a	0,191 ± 0,026 a
	60	0,176 ± 0,007 a	0,134 ± 0,022 a	0,142 ± 0,022 a	0,158 ± 0,019 a	0,175 ± 0,008 a
	180	0,196 ± 0,038 a	0,154 ± 0,014 a	0,172 ± 0,016 a	0,181 ± 0,020 a	0,193 ± 0,021 a
	300	0,209 ± 0,042 a	0,169 ± 0,030 a	0,175 ± 0,024 a	0,160 ± 0,015 a	0,199 ± 0,020 a
Tubérculos	0	0,124 ± 0,011 a	0,123 ± 0,002 a	0,110 ± 0,006 a	0,112 ± 0,005 a	0,117 ± 0,012 a
	60	0,136 ± 0,015 a	0,124 ± 0,023 a	0,117 ± 0,019 a	0,115 ± 0,006 a	0,122 ± 0,005 a
	180	0,156 ± 0,063 a	0,123 ± 0,006 a	0,133 ± 0,011 a	0,129 ± 0,006 b	0,127 ± 0,018 a
	300	0,178 ± 0,039 a	0,138 ± 0,02 a	0,125 ± 0,008 a	0,111 ± 0,004 a	0,121 ± 0,012 a

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 5.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		82	89	96	103	110
Hojas	0	0,206 ± 0,017 a	0,236 ± 0,004 a	0,26 ± 0,020 a	0,217 ± 0,012 a	0,220 ± 0,012 a
	60	0,234 ± 0,013 a b	0,230 ± 0,031 a	0,26 ± 0,034 a	0,238 ± 0,014 a b	0,228 ± 0,016 a
	180	0,250 ± 0,016 b	0,253 ± 0,013 a	0,29 ± 0,026 a	0,246 ± 0,004 a b	0,231 ± 0,023 a
	300	0,224 ± 0,012 a b	0,243 ± 0,016 a	0,30 ± 0,015 a	0,249 ± 0,012 b	0,231 ± 0,011 a
Tallos	0	0,201 ± 0,030 a	0,164 ± 0,009 a	0,18 ± 0,010 a	0,149 ± 0,003 a	0,155 ± 0,009 a
	60	0,196 ± 0,014 a	0,180 ± 0,007 a b	0,19 ± 0,002 a	0,159 ± 0,015 a	0,163 ± 0,004 a
	180	0,201 ± 0,023 a	0,189 ± 0,011 a b	0,20 ± 0,018 a	0,166 ± 0,016 a	0,153 ± 0,014 a
	300	0,200 ± 0,027 a	0,193 ± 0,014 b	0,20 ± 0,014 a	0,178 ± 0,006 a	0,155 ± 0,008 a
Estolones	0	0,193 ± 0,009 a	0,172 ± 0,011 a	0,15 ± 0,022 a	0,148 ± 0,009 a	0,127 ± 0,017 a
	60	0,220 ± 0,011 a	0,201 ± 0,002 a	0,14 ± 0,003 a	0,160 ± 0,038 a	0,149 ± 0,012 a
	180	0,232 ± 0,021 a	0,195 ± 0,032 a	0,15 ± 0,012 a	0,141 ± 0,025 a	0,144 ± 0,010 a
	300	0,201 ± 0,020 a	0,186 ± 0,021 a	0,18 ± 0,021 a	0,153 ± 0,011 a	0,162 ± 0,036 a
Tubérculos	0	0,112 ± 0,003 a	0,129 ± 0,012 a	0,15 ± 0,005 a	0,156 ± 0,016 a	0,150 ± 0,005 a
	60	0,126 ± 0,010 a	0,143 ± 0,010 a	0,16 ± 0,016 a b	0,167 ± 0,014 a	0,168 ± 0,017 a b
	180	0,128 ± 0,010 a	0,154 ± 0,013 a	0,19 ± 0,015 a b	0,163 ± 0,029 a	0,185 ± 0,012 b c
	300	0,130 ± 0,015 a	0,146 ± 0,015 a	0,19 ± 0,016 b	0,193 ± 0,003 a	0,204 ± 0,009 c

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 5.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		117	124	131	138	145
Hojas	0	0,227 ± 0,011 a	0,220 ± 0,022 a	0,182 ± 0,021 a	0,186 ± 0,024 a	0,153 ± 0,009 a
	60	0,244 ± 0,022 a	0,225 ± 0,024 a	0,182 ± 0,012 a	0,174 ± 0,011 a	0,153 ± 0,002 a
	180	0,249 ± 0,025 a	0,218 ± 0,029 a	0,201 ± 0,011 a	0,176 ± 0,004 a	0,155 ± 0,011 a
	300	0,232 ± 0,031 a	0,208 ± 0,014 a	0,160 ± 0,037 a	0,180 ± 0,008 a	0,153 ± 0,002 a
Tallos	0	0,152 ± 0,013 a	0,130 ± 0,004 a	0,125 ± 0,018 a	0,129 ± 0,021 a	0,117 ± 0,005 a
	60	0,158 ± 0,034 a	0,128 ± 0,003 a	0,134 ± 0,009 a	0,122 ± 0,011 a	0,105 ± 0,007 a
	180	0,161 ± 0,022 a	0,129 ± 0,009 a	0,135 ± 0,010 a	0,128 ± 0,006 a	0,110 ± 0,010 a
	300	0,141 ± 0,014 a	0,124 ± 0,011 a	0,133 ± 0,002 a	0,121 ± 0,006 a	0,119 ± 0,007 a
Estolones	0	0,130 ± 0,007 a	±	0,167 ± 0,023 a	0,115 ± 0,011 a	0,096 ± 0,012 a
	60	0,136 ± 0,017 a	±	0,153 ± 0,020 a	0,109 ± 0,012 a	0,132 ± 0,020 a b
	180	0,194 ± 0,056 a	±	0,157 ± 0,013 a	0,119 ± 0,004 a	0,121 ± 0,008 a b
	300	0,141 ± 0,010 a	±	0,178 ± 0,020 a	0,114 ± 0,004 a	0,140 ± 0,021 b
Tubérculos	0	0,154 ± 0,004 a	0,149 ± 0,018 a	0,168 ± 0,012 a	0,148 ± 0,004 a b	0,136 ± 0,015 a
	60	0,167 ± 0,009 a b	0,161 ± 0,013 a	0,172 ± 0,006 a	0,139 ± 0,004 a	0,134 ± 0,003 a
	180	0,193 ± 0,012 c	0,153 ± 0,007 a	0,184 ± 0,013 a	0,153 ± 0,006 b	0,146 ± 0,009 a
	300	0,187 ± 0,009 b c	0,161 ± 0,013 a	0,181 ± 0,022 a	0,159 ± 0,004 b	0,156 ± 0,014 a

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

4.2 Variables derivadas

Las variables derivadas se determinaron a partir de la medición de las variables directas de producción de materia seca y concentración de P en los órganos.

4.2.1 Absorción acumulada de fósforo. La absorción acumulada de fósforo se determinó para cada órgano y para el total absorbido por el cultivo de papa.

4.2.1.1 Absorción acumulada de fósforo en hojas. La absorción de P de las hojas se registró desde los 47 ddp, a partir de este momento la absorción de P incrementó hasta un máximo a los 110 ddp para decrecer hasta la madurez fisiológica del cultivo (Figura 13). La disminución de la absorción de P en los tejidos se debe a la translocación hacia los órganos de reserva, siempre que no haber existido pérdida de hojas senescentes (MCCOLLUM, 1978a).

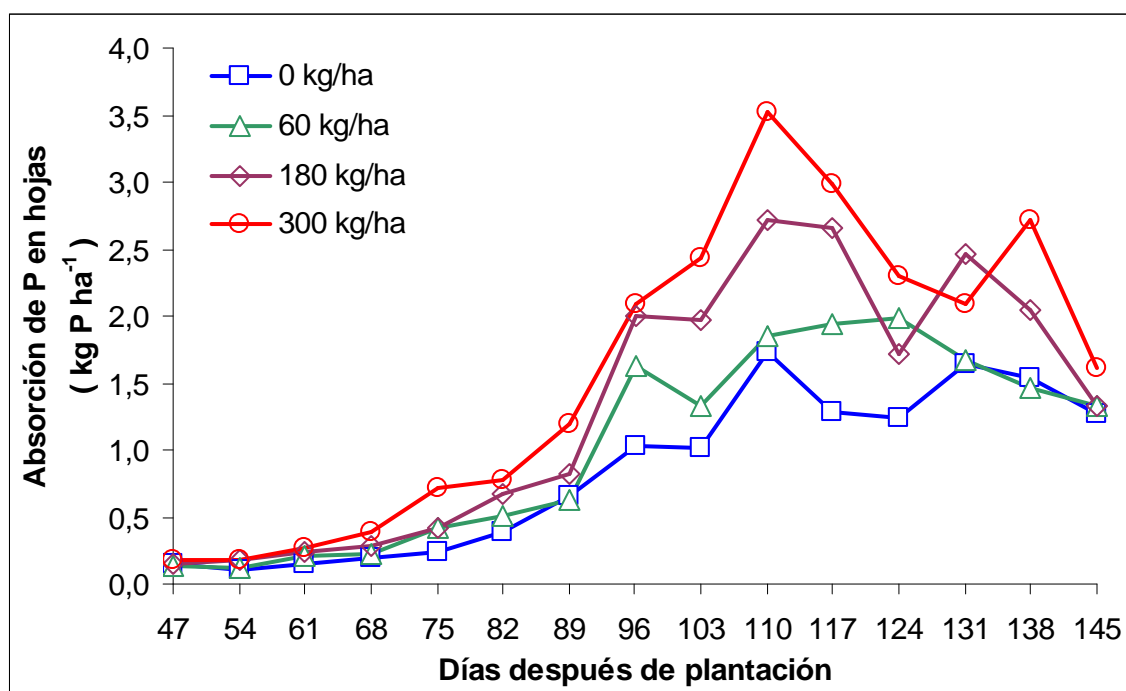


FIGURA 13 Absorción acumulada de fósforo en las hojas (kg P ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

Se observó diferencias significativas a los 75, 82, 103, 117 y 124 días después de plantación entre los tratamientos de mayores fertilizaciones y el tratamiento testigo (Cuadro 6).

A los 110 ddp (máximo observado) la absorción de P osciló entre 1,73 y 3,53 kg P ha⁻¹, ordenándose en función de la dosis de P aplicada.

4.2.1.2 Absorción acumulada de fósforo en tallos. La curva de absorción de P de tallos incrementó desde el primer muestreo hasta los 110 días en todos los tratamientos. Después de este momento la absorción de P disminuye constantemente hasta la cosecha (Figura 14).

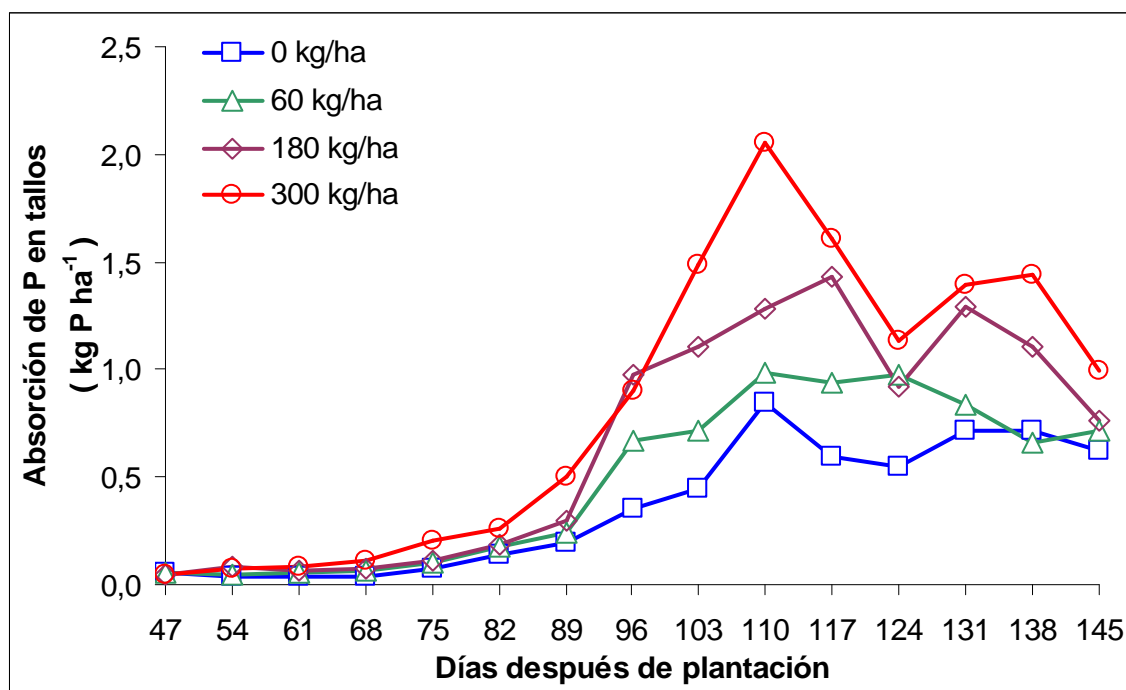


FIGURA 14 Absorción acumulada de fósforo en los tallos (kg P ha⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P₂O₅ ha⁻¹).

Se estableció diferencias significativas a los 54, 68, 75, 96, 103 y 117 días después de la plantación entre los tratamientos de mayores aplicaciones de P y el tratamiento testigo (Cuadro 6).

Se observó que la tendencia en la absorción de P en los tallos es similar al que presentó las hojas. El máximo ocurrió al mismo tiempo en ambos órganos (día 110), siendo entre 1,7 y 2,1 veces mayor en las hojas. Desde este máximo la curva de absorción de P disminuye paulatinamente hasta la madurez fisiológica debido principalmente a movilizaciones de carbohidratos a órganos destino (MCCOLLUM, 1978a). Por otra parte SOLTANPOUR (1969), concluyó que el comportamiento de la curva de absorción se asemeja al de acumulación de materia seca en los órganos aéreos, obteniendo en su estudio un máximo de absorción de P en tallos a los 88 ddp en el cultivar Russet Burbank.

4.2.1.3 Absorción acumulada de fósforo en estolones. Los datos de absorción de fósforo de los estolones no permitieron obtener una tendencia de los tratamientos (Figura 15), debido a que esta absorción se obtuvo a partir de los datos medidos en forma directa que corresponden a la materia seca producida y la concentración de fósforo, que habían presentado un comportamiento errático en este estudio.

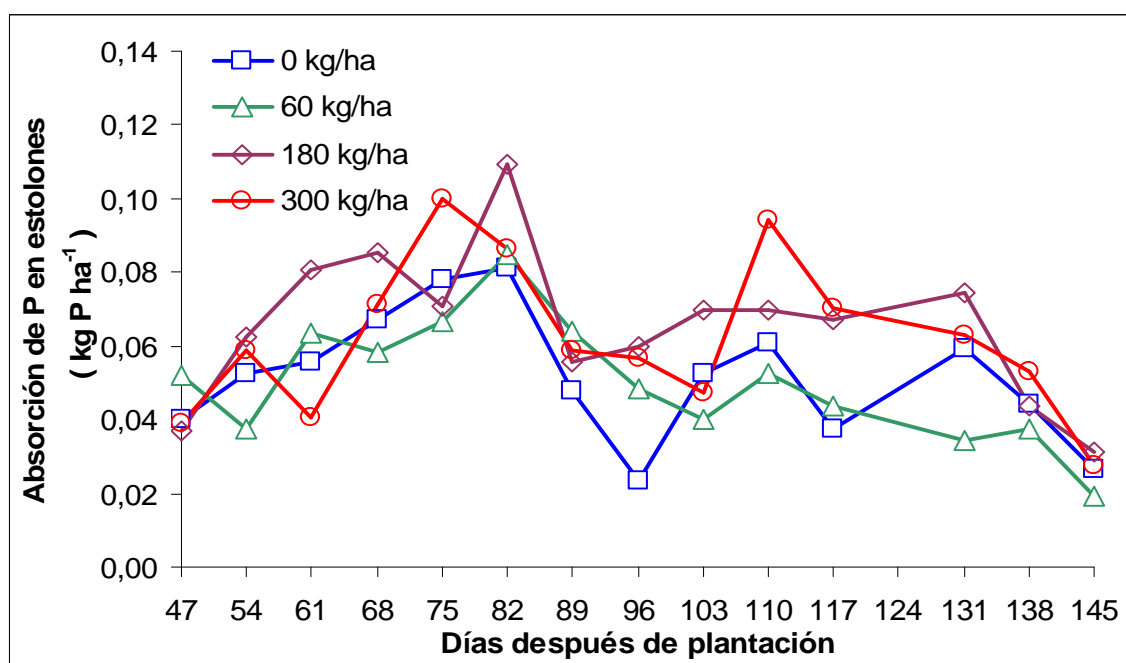


FIGURA 15 Absorción acumulada de fósforo en los estolones (kg P ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

4.2.1.4 Absorción acumulada de fósforo en tubérculos. En general, la absorción de P de los tubérculos incrementó desde el muestreo inicial hasta un máximo a los 138 días, coincidiendo con el inicio de la maduración, desde el cual se mantiene relativamente constante hasta la cosecha (Figura 16).

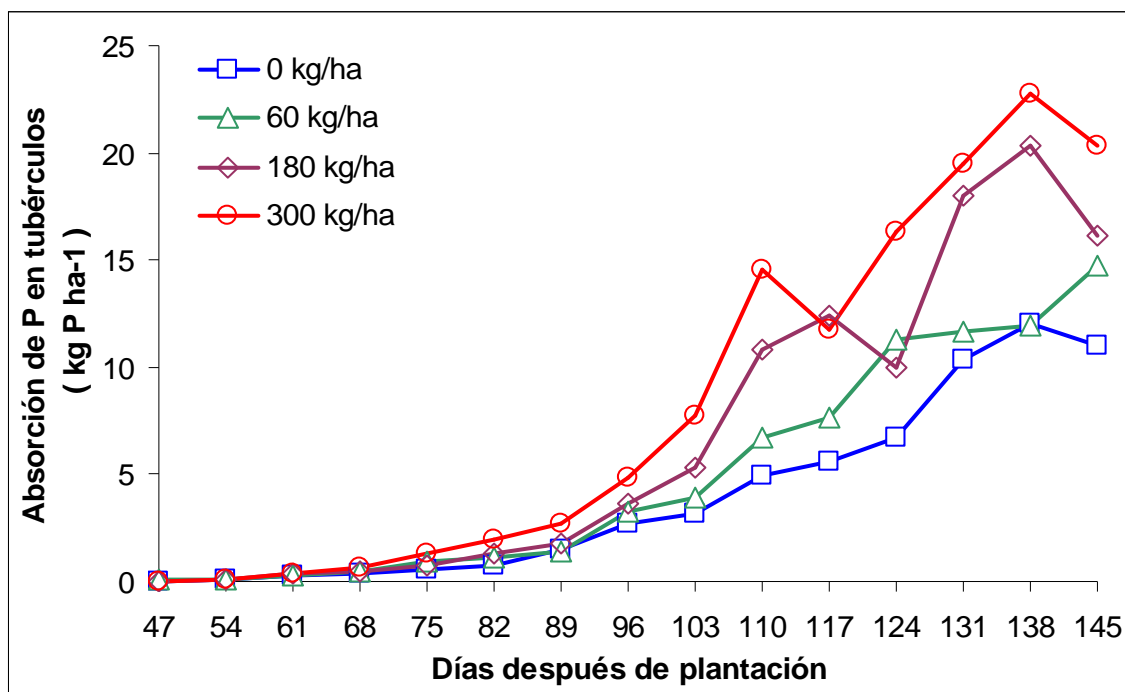


FIGURA 16 Absorción acumulada de fósforo en los tubérculos (kg P ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

En el máximo se observó que la absorción de P varió entre 22,7 y 12,0 kg P ha^{-1} , siendo estos para el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el testigo. Se determinaron diferencias significativas, entre estos tratamientos, desde los 96 ddp hasta la cosecha (Cuadro 6).

Luego de la floración (día 96) los tubérculos manifestaron un continuo aumento en la absorción P, contrariamente a lo presentado en las hojas y tallos. Esto se debió a que los tubérculos son órganos de acumulación y destino de carbohidratos desde los órganos fuente como hojas y tallos (MCCOLLUM, 1978a).

Resultados obtenidos por SOLTANPOUR (1969), en Colorado (USA), sobre la absorción de P por parte de los tubérculos, describió que esta se mantiene creciente hasta la cosecha, llegando al 83 g/100g de P total de la planta, para un cultivar Red McClure. Los rangos obtenidos en este estudio son superiores fluctuando entre 85 y 88 g/100g de P indicando que el cultivar Desirée moviliza un mayor porcentaje de P a sus órganos destino.

4.2.1.5 Absorción total de fósforo. Se observó un comportamiento similar entre todos los tratamientos para la absorción de P total, caracterizándose con una lenta absorción inicial hasta un máximo a los 138 días y de este momento se mantiene relativamente hasta cosecha (Figura 17).

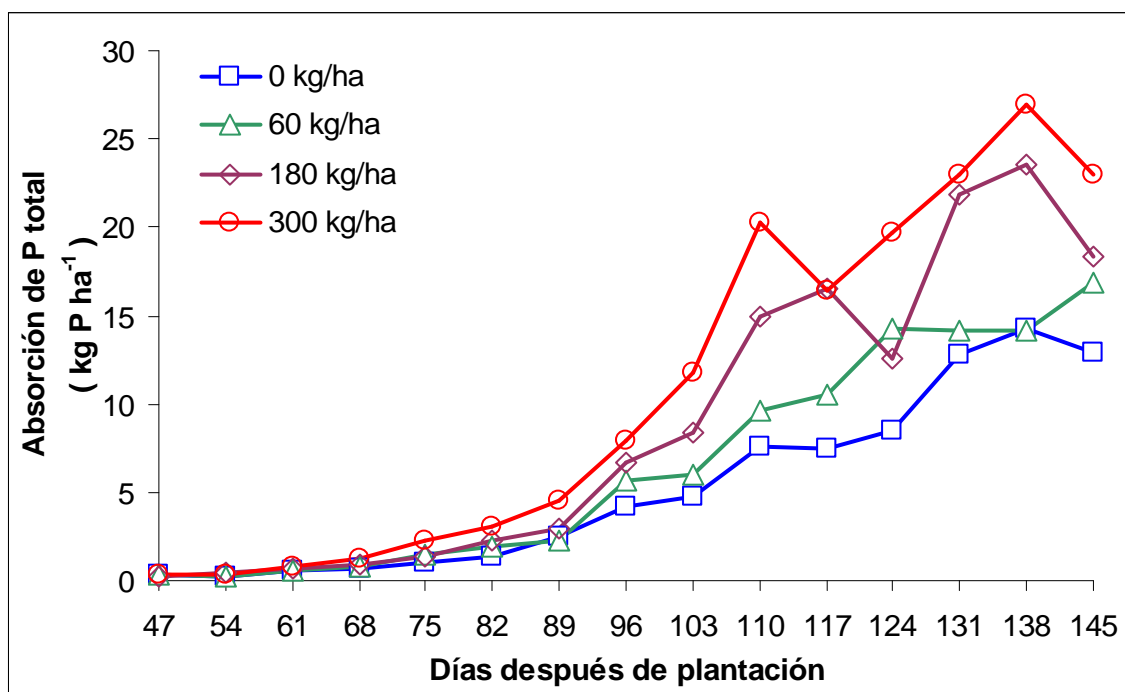


FIGURA 17 Absorción acumulada de fósforo total (kg P ha^{-1}) bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

Se observó que en general los tratamientos de mayor fertilización fosforada absorbieron mayor cantidad de fósforo durante todo el muestreo, pero no se determinaron diferencias significativas entre los tratamiento, debido a una alta

variabilidad de los datos (Cuadro 6), sin embargo, existió una excepción a los 124 días, ya que el tratamiento de media fertilización fosforada presentó una absorción menor a la del tratamiento de baja dosis de P. Este efecto se notó en todos los órganos muestreados.

En función del tiempo, los tratamientos no presentaron diferencias significativas en los dos últimos muestreos, de esta manera, las absorciones de P para cada tratamiento en los dos últimos muestreos fueron relativamente constantes (Anexo 3).

CUADRO 6 Absorción de fósforo (kg P ha⁻¹) por órgano en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		47	54	61	68	75
Hojas	0	0,145 ± 0,061 a	0,110 ± 0,015 a	0,146 ± 0,029 a	0,188 ± 0,055 a	0,239 ± 0,042 a
	60	0,136 ± 0,054 a	0,126 ± 0,036 a	0,205 ± 0,065 a	0,226 ± 0,014 a	0,419 ± 0,208 a b
	180	0,151 ± 0,057 a	0,177 ± 0,025 a	0,235 ± 0,056 a	0,278 ± 0,060 a	0,425 ± 0,091 a b
	300	0,181 ± 0,079 a	0,181 ± 0,032 a	0,263 ± 0,087 a	0,387 ± 0,096 a	0,720 ± 0,108 b
Tallos	0	0,055 ± 0,038 a	0,034 ± 0,004 a	0,033 ± 0,004 a	0,037 ± 0,015 a	0,078 ± 0,012 a
	60	0,054 ± 0,038 a	0,043 ± 0,014 a b	0,057 ± 0,017 a	0,062 ± 0,017 a b	0,102 ± 0,025 a
	180	0,046 ± 0,034 a	0,079 ± 0,014 c	0,067 ± 0,037 a	0,072 ± 0,013 a b	0,111 ± 0,028 a
	300	0,051 ± 0,033 a	0,072 ± 0,010 b c	0,085 ± 0,031 a	0,112 ± 0,022 b	0,208 ± 0,033 b
Estolones	0	0,040 ± 0,025 a	0,053 ± 0,001 a	0,055 ± 0,009 a	0,067 ± 0,009 a	0,078 ± 0,020 a
	60	0,052 ± 0,044 a	0,038 ± 0,014 a	0,063 ± 0,020 a	0,058 ± 0,012 a	0,066 ± 0,004 a
	180	0,037 ± 0,015 a	0,063 ± 0,026 a	0,081 ± 0,013 a	0,086 ± 0,023 a	0,071 ± 0,009 a
	300	0,039 ± 0,020 a	0,059 ± 0,016 a	0,040 ± 0,008 a	0,071 ± 0,011 a	0,100 ± 0,022 a
Tubérculos	0	0,045 ± 0,018 a	0,056 ± 0,034 a	0,284 ± 0,089 a	0,359 ± 0,088 a	0,592 ± 0,020 a
	60	0,061 ± 0,049 a	0,059 ± 0,040 a	0,294 ± 0,083 a	0,495 ± 0,013 a	0,900 ± 0,362 a
	180	0,022 ± 0,009 a	0,102 ± 0,034 a	0,331 ± 0,056 a	0,503 ± 0,091 a	0,761 ± 0,088 a
	300	0,017 ± 0,010 a	0,076 ± 0,024 a	0,378 ± 0,122 a	0,635 ± 0,144 a	1,289 ± 0,072 a
Total	0	0,286 ± 0,245 a	0,252 ± 0,165 a	0,519 ± 0,262 a	0,651 ± 0,416 a	0,987 ± 0,565 a
	60	0,303 ± 0,287 a	0,266 ± 0,187 a	0,620 ± 0,363 a	0,842 ± 0,478 a	1,487 ± 1,204 a
	180	0,255 ± 0,207 a	0,421 ± 0,284 a	0,714 ± 0,417 a	0,939 ± 0,625 a	1,369 ± 0,737 a
	300	0,287 ± 0,226 a	0,388 ± 0,248 a	0,767 ± 0,537 a	1,205 ± 0,803 a	2,317 ± 1,258 a

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 6.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		82	89	96	103	110
Hojas	0	0,392 ± 0,005 a	0,663 ± 0,188 a	1,035 ± 0,325 a	1,022 ± 0,246 a	1,735 ± 0,406 a
	60	0,512 ± 0,052 a b	0,629 ± 0,193 a	1,620 ± 0,421 a	1,324 ± 0,092 a b	1,848 ± 0,086 a
	180	0,668 ± 0,159 a b	0,823 ± 0,232 a	1,994 ± 0,225 a	1,965 ± 0,428 b c	2,711 ± 0,752 a
	300	0,776 ± 0,091 b	1,190 ± 0,415 a	2,084 ± 0,566 a	2,434 ± 0,316 c	3,526 ± 0,814 a
Tallos	0	0,137 ± 0,046 a	0,191 ± 0,059 a	0,357 ± 0,021 a	0,445 ± 0,112 a	0,843 ± 0,155 a
	60	0,172 ± 0,077 a	0,244 ± 0,101 a	0,665 ± 0,179 a b	0,713 ± 0,169 a	0,984 ± 0,231 a
	180	0,186 ± 0,060 a	0,300 ± 0,072 a	0,978 ± 0,206 b	1,106 ± 0,270 a b	1,280 ± 0,306 a
	300	0,258 ± 0,089 a	0,505 ± 0,202 a	0,899 ± 0,277 a b	1,487 ± 0,285 b	2,052 ± 0,594 a
Estolones	0	0,081 ± 0,014 a	0,048 ± 0,016 a	0,024 ± 0,007 a	0,052 ± 0,017 a	0,061 ± 0,011 a b
	60	0,085 ± 0,004 a	0,064 ± 0,015 a	0,048 ± 0,004 a b	0,040 ± 0,011 a	0,053 ± 0,003 a
	180	0,109 ± 0,023 a	0,056 ± 0,006 a	0,060 ± 0,012 b	0,070 ± 0,007 a	0,070 ± 0,012 a b
	300	0,087 ± 0,015 a	0,059 ± 0,024 a	0,057 ± 0,004 b	0,047 ± 0,009 a	0,094 ± 0,015 b
Tubérculos	0	0,791 ± 0,061 a	1,536 ± 0,150 a	2,740 ± 0,389 a	3,198 ± 0,572 a	4,978 ± 0,794 a
	60	1,099 ± 0,181 a	1,382 ± 0,232 a	3,285 ± 0,358 a b	3,877 ± 0,946 a	6,751 ± 1,796 a
	180	1,348 ± 0,170 a b	1,779 ± 0,129 a	3,634 ± 1,066 a b	5,282 ± 0,500 a b	10,836 ± 3,135 a b
	300	1,926 ± 0,240 b	2,748 ± 0,846 a	4,862 ± 0,264 b	7,789 ± 0,790 b	14,568 ± 1,427 b
Total	0	1,402 ± 0,818 a	2,438 ± 1,602 a	4,155 ± 2,699 a	4,717 ± 2,864 a	7,616 ± 4,733 a
	60	1,868 ± 1,141 a	2,319 ± 1,287 a	5,619 ± 2,928 a	5,954 ± 3,234 a	9,635 ± 4,996 a
	180	2,311 ± 1,175 a	2,958 ± 1,545 a	6,666 ± 4,007 a	8,423 ± 4,360 a	14,896 ± 10,253 a
	300	3,047 ± 1,856 a	4,501 ± 2,354 a	7,901 ± 4,796 a	11,757 ± 6,411 a	20,240 ± 10,646 a

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 6.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		117	124	131	138	145
Hojas	0	1,285 ± 0,140 a	1,236 ± 0,247 a	1,640 ± 0,316 a	1,533 ± 0,261 a	1,273 ± 0,223 a
	60	1,938 ± 0,257 a b	1,992 ± 0,405 a b	1,673 ± 0,459 a	1,461 ± 0,168 a	1,327 ± 0,464 a
	180	2,661 ± 0,522 b c	1,717 ± 0,313 a b	2,465 ± 0,896 a	2,051 ± 0,781 a	1,335 ± 0,408 a
	300	2,987 ± 0,074 c	2,298 ± 0,265 b	2,096 ± 0,405 a	2,714 ± 1,191 a	1,611 ± 0,248 a
Tallos	0	0,592 ± 0,068 a	0,551 ± 0,164 a	0,719 ± 0,121 a	0,718 ± 0,065 a	0,626 ± 0,071 a
	60	0,936 ± 0,158 a b	0,976 ± 0,258 a	0,839 ± 0,210 a	0,661 ± 0,071 a	0,718 ± 0,217 a
	180	1,427 ± 0,157 b c	0,917 ± 0,076 a	1,294 ± 0,272 a	1,107 ± 0,343 a	0,761 ± 0,170 a
	300	1,612 ± 0,199 c	1,131 ± 0,256 a	1,395 ± 0,136 a	1,438 ± 0,581 a	0,995 ± 0,192 a
Estolones	0	0,037 ± 0,006 a	±	0,060 ± 0,007 a b	0,044 ± 0,004 a	0,026 ± 0,010 a
	60	0,043 ± 0,012 a	±	0,035 ± 0,010 a	0,037 ± 0,008 a	0,019 ± 0,005 a
	180	0,067 ± 0,010 a	±	0,074 ± 0,011 b	0,044 ± 0,013 a	0,031 ± 0,022 a
	300	0,070 ± 0,019 a	±	0,063 ± 0,011 a b	0,053 ± 0,012 a	0,027 ± 0,011 a
Tubérculos	0	5,594 ± 1,250 a	6,697 ± 0,689 a	10,370 ± 0,350 a	12,001 ± 0,958 a	10,985 ± 1,057 a
	60	7,623 ± 0,692 a b	11,250 ± 1,098 a b	11,635 ± 2,249 a b	11,947 ± 0,746 a	14,767 ± 2,056 a b
	180	12,369 ± 2,157 b	9,988 ± 0,759 a	18,014 ± 2,764 b c	20,363 ± 2,347 a b	16,169 ± 0,884 b c
	300	11,773 ± 2,229 b	16,279 ± 2,700 b	19,481 ± 2,768 c	22,758 ± 4,303 b	20,369 ± 1,113 c
Total	0	7,509 ± 3,911 a	8,484 ± 4,763 a	12,788 ± 7,446 a	14,297 ± 8,321 a	12,911 ± 7,471 a
	60	10,540 ± 6,345 a	14,219 ± 8,256 a	14,182 ± 9,343 a	14,107 ± 8,021 a	16,831 ± 10,768 a
	180	16,524 ± 9,348 a	12,622 ± 7,527 a	21,848 ± 14,129 a	23,565 ± 15,114 a	18,296 ± 10,793 a
	300	16,442 ± 8,413 a	19,708 ± 12,385 a	23,035 ± 14,278 a	26,963 ± 13,100 a	23,003 ± 12,560 a

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

4.2.2 Contribución de cada órgano en la materia seca total producida. Se determinó la contribución porcentual de cada órgano en la materia seca total producida.

4.2.2.1 Contribución de las hojas. La curva que describe la contribución de materia seca de las hojas presentó un patrón similar en todos los tratamientos (Figura 18).

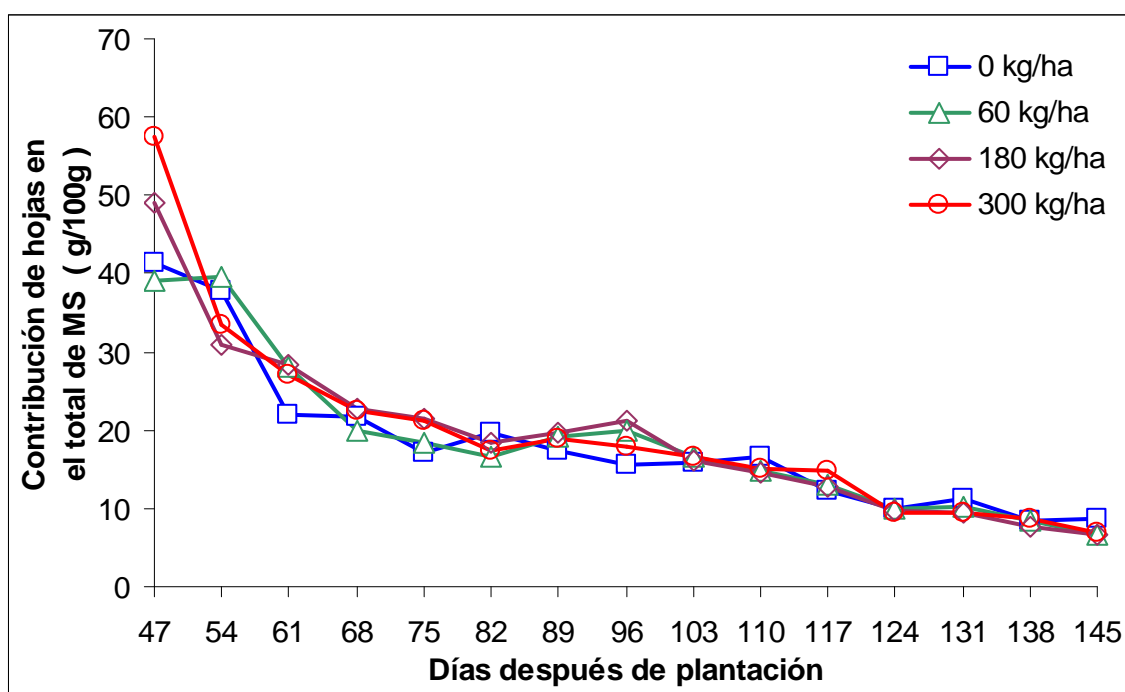


FIGURA 18 Contribución porcentual de las hojas en el total de materia seca producida por el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

En el primer muestreo (día 47) la contribución de MS de las hojas en el total producido presentó un máximo que varió entre 39 y 58 g/100g. Desde este máximo la contribución de MS decreció rápidamente hasta los 68 ddp para luego disminuir constantemente hasta la madurez fisiológica, siendo en este momento cercano a 7 g/100g en todos los tratamientos.

No existieron diferencias significativas entre los tratamientos en todo el momento del muestreo (Cuadro 7), por lo que no se puede afirmar que las diferentes dosis fosfatadas afectaron la contribución porcentual en este órgano.

4.2.2.2 Contribución de los tallos. Los tallos presentaron una contribución porcentual de materia seca, que independiente del tratamiento, se mostró una misma tendencia durante el período de muestreo (Figura 19).

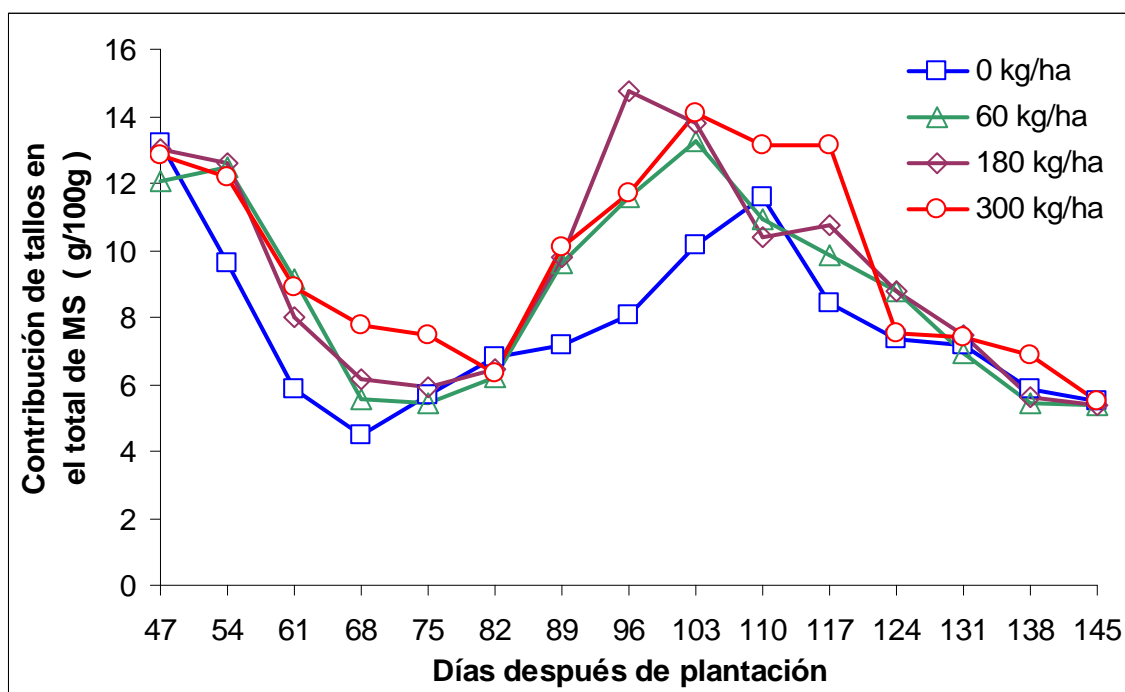


FIGURA 19 Contribución porcentual de los tallos en el total de materia seca producida por el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

Inicialmente se observó una contribución que varió entre 12 a 13 g/100g para decrecer a un primer mínimo cercano a los 75 ddp, siendo esto dos semana después del inicio de la tuberización. De este momento la contribución de MS de los tallos incrementó hasta un segundo máximo a los 103 días, el cual se ordenó en función de las dosis de P aplicadas, pero no presentó diferencias significativas. De este máximo la

contribución de MS disminuyó hasta la madurez fisiológica, con valores cercanos a 5,5 g/100g en todos los tratamientos.

Sólo se presentó diferencias significativas entre los tratamientos de mayores fertilizaciones fosforadas y el tratamiento testigo a los 68, 96 y 117 ddp (Cuadro 7).

4.2.2.3 Contribución de los estolones. Desde el inicio de los muestreos hasta la madurez fisiológica (día 145) la curva que describe la contribución porcentual de MS de los estolones presentó un comportamiento similar en todos los tratamientos (Figura 20).



FIGURA 20 Contribución porcentual de los estolones en el total de materia seca producida por el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$).

Sólo existieron diferencias significativas entre los tratamientos con fertilización fosforada y el testigo a los 82, 96 y 110 ddp, no ordenándose esta necesariamente en función de la dosis de P aplicada al suelo (Cuadro 7).

Desde el primer muestreo la contribución de los estolones incrementó hasta un máximo una semana después del inicio de los muestreos (día 54), después de este momento la contribución decreció hasta los 117 días después de la plantación para mantenerse relativamente constante hasta la madurez fisiológica.

En el máximo, la contribución porcentual de MS osciló entre 18 y 25 g/100g para luego disminuir sustancialmente a los 61 días después de la plantación, momento que coincide con la tuberización.

Al momento de cosecha la contribución de los estolones varió entre 0,1 a 0,3 g/100g, estos valores son inferiores a los registrados por Raeuber y Engel (1966), citados por KOLBE y STEPHAN-BECKMANN (2002b), donde indican que los estolones representan el 1% del total de materia seca producida por la planta.

4.2.2.4 Contribución de los tubérculos. La contribución porcentual de MS de los tubérculos se discutirá dentro de los parámetros de fertilización racional de P como índice de cosecha (Capítulo 4.3.1).

CUADRO 7 Contribución por órgano de la materia seca (g/100g) en el total de producido en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		47	54	61	68	75
Hojas	0	41,3 ± 13,4 a	37,7 ± 8,2 a	22,0 ± 6,3 a	21,8 ± 1,8 a	17,2 ± 2,5 a
	60	39,1 ± 27,8 a	39,6 ± 4,1 a	28,0 ± 2,0 a	20,0 ± 0,9 a	18,5 ± 1,1 a
	180	48,9 ± 14,9 a	31,0 ± 10,8 a	28,3 ± 3,4 a	22,7 ± 1,7 a	21,4 ± 3,6 a
	300	57,5 ± 7,0 a	33,4 ± 9,4 a	27,1 ± 3,7 a	22,6 ± 3,4 a	21,3 ± 1,0 a
Tallos	0	13,2 ± 2,8 a	9,6 ± 2,1 a	5,9 ± 2,4 a	4,5 ± 0,8 a	5,7 ± 1,0 a
	60	12,1 ± 2,2 a	12,5 ± 1,1 a	9,1 ± 2,1 a	5,5 ± 1,1 a b	5,4 ± 0,6 a
	180	13,0 ± 4,3 a	12,6 ± 3,5 a	8,0 ± 2,0 a	6,2 ± 0,5 a b	5,9 ± 0,6 a
	300	12,9 ± 4,2 a	12,2 ± 2,8 a	8,9 ± 2,0 a	7,8 ± 1,8 b	7,5 ± 1,5 a
Estolones	0	16,7 ± 4,6 a	24,8 ± 8,1 a	9,5 ± 3,9 a	8,5 ± 2,3 a	5,7 ± 1,5 a
	60	20,4 ± 11,8 a	18,2 ± 12,5 a	9,4 ± 1,0 a	5,8 ± 1,2 a	3,8 ± 1,6 a
	180	20,6 ± 4,4 a	18,5 ± 5,1 a	10,1 ± 2,4 a	7,8 ± 3,6 a	4,1 ± 1,5 a
	300	18,8 ± 5,4 a	20,7 ± 1,6 a	4,7 ± 2,9 a	5,1 ± 1,3 a	3,2 ± 0,5 a
Tubérculos	0	28,8 ± 8,9 a	27,9 ± 18,3 a	62,7 ± 12,1 a	65,2 ± 3,0 a	71,5 ± 4,6 a
	60	28,5 ± 18,2 a	29,7 ± 14,3 a	53,4 ± 4,3 a	68,6 ± 3,1 a	72,3 ± 3,4 a
	180	17,5 ± 8,9 a	37,9 ± 9,5 a	53,7 ± 2,6 a	63,3 ± 2,0 a	68,6 ± 4,6 a
	300	10,8 ± 9,7 a	33,7 ± 9,1 a	59,3 ± 6,5 a	64,6 ± 4,3 a	68,1 ± 2,7 a

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 7.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		82	89	96	103	110
Hojas	0	19,6 ± 3,1 a	17,4 ± 1,1 a	15,7 ± 2,5 a	15,9 ± 6,2 a	16,6 ± 1,3 a
	60	16,6 ± 2,0 a	19,2 ± 3,2 a	19,8 ± 2,3 a	16,6 ± 2,5 a	14,8 ± 2,5 a
	180	18,5 ± 0,9 a	19,6 ± 1,8 a	21,1 ± 2,3 a	16,2 ± 1,5 a	14,6 ± 1,3 a
	300	17,3 ± 2,7 a	18,8 ± 0,9 a	17,9 ± 3,0 a	16,5 ± 0,7 a	15,2 ± 3,0 a
Tallos	0	6,8 ± 2,5 a	7,2 ± 1,0 a	8,0 ± 1,2 a	10,2 ± 4,7 a	11,6 ± 0,9 a
	60	6,2 ± 3,3 a	9,6 ± 3,8 a	11,6 ± 3,0 a b	13,3 ± 0,5 a	10,9 ± 1,7 a
	180	6,5 ± 0,7 a	9,8 ± 1,9 a	14,7 ± 0,8 b	13,8 ± 1,5 a	10,4 ± 0,6 a
	300	6,3 ± 1,7 a	10,1 ± 1,3 a	11,7 ± 2,5 a b	14,1 ± 1,7 a	13,2 ± 3,9 a
Estolones	0	4,1 ± 0,9 a	1,7 ± 0,4 a	0,7 ± 0,3 a	1,2 ± 0,8 a	1,0 ± 0,2 a
	60	3,3 ± 0,6 a b	2,2 ± 1,2 a	1,1 ± 0,2 a b	0,8 ± 0,5 a	0,7 ± 0,1 b
	180	3,2 ± 0,6 a b	1,7 ± 0,1 a	1,3 ± 0,2 b	1,1 ± 0,1 a	0,6 ± 0,1 b
	300	2,1 ± 0,5 b	1,3 ± 0,7 a	0,9 ± 0,1 a b	0,5 ± 0,1 a	0,6 ± 0,1 b
Tubérculos	0	69,5 ± 6,0 a	73,7 ± 2,1 a	75,6 ± 3,5 a	72,7 ± 11,5 a	70,7 ± 2,1 a
	60	74,0 ± 5,3 a	68,9 ± 7,3 a	67,5 ± 4,8 a b	69,4 ± 2,5 a	73,7 ± 3,4 a
	180	71,8 ± 0,4 a	68,9 ± 3,5 a	62,8 ± 2,8 b	69,0 ± 1,5 a	74,4 ± 1,7 a
	300	74,3 ± 4,4 a	69,9 ± 2,5 a	69,6 ± 5,3 a b	68,9 ± 2,0 a	71,1 ± 6,7 a

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

(Continúa)

Continuación Cuadro 7.

Parte vegetal	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		117	124	131	138	145
Hojas	0	12,2 ± 2,1 a	10,0 ± 1,7 a	11,1 ± 1,9 a	8,5 ± 1,0 a	8,6 ± 8,6 a
	60	13,1 ± 0,7 a	10,0 ± 2,0 a	10,2 ± 0,9 a	8,3 ± 0,8 a	6,8 ± 6,8 a
	180	12,8 ± 2,2 a	9,7 ± 1,5 a	9,4 ± 2,8 a	7,6 ± 1,5 a	6,7 ± 6,7 a
	300	14,7 ± 1,2 a	9,4 ± 3,5 a	9,4 ± 1,1 a	8,6 ± 1,5 a	6,9 ± 6,9 a
Tallos	0	8,4 ± 1,1 a	7,4 ± 2,6 a	7,2 ± 0,9 a	5,8 ± 0,2 a	5,5 ± 5,5 a
	60	9,9 ± 0,9 a b	8,8 ± 4,0 a	6,9 ± 0,5 a	5,4 ± 0,1 a	5,4 ± 5,4 a
	180	10,7 ± 2,0 a b	8,8 ± 0,9 a	7,5 ± 1,4 a	5,6 ± 1,0 a	5,4 ± 5,4 a
	300	13,1 ± 0,6 b	7,6 ± 2,8 a	7,4 ± 1,5 a	6,9 ± 1,7 a	5,5 ± 5,5 a
Estolones	0	0,6 ± 0,3 a	±	0,5 ± 0,1 a	0,4 ± 0,0 a	0,3 ± 0,3 a
	60	0,5 ± 0,2 a	±	0,3 ± 0,1 a	0,4 ± 0,2 a	0,1 ± 0,1 a
	180	0,4 ± 0,2 a	±	0,4 ± 0,1 a	0,2 ± 0,1 a	0,2 ± 0,2 a
	300	0,6 ± 0,0 a	±	0,3 ± 0,0 a	0,3 ± 0,0 a	0,1 ± 0,1 a
Tubérculos	0	78,8 ± 3,1 a	82,6 ± 4,2 a	81,3 ± 2,8 a	85,3 ± 0,8 a	85,6 ± 85,6 a
	60	76,5 ± 0,8 a	81,2 ± 6,0 a	82,6 ± 1,5 a	85,9 ± 0,8 a	87,8 ± 87,8 a
	180	76,0 ± 4,3 a	81,5 ± 2,3 a	82,7 ± 4,0 a	86,5 ± 2,6 a	87,7 ± 87,7 a
	300	71,6 ± 0,8 a	83,1 ± 6,3 a	82,9 ± 2,6 a	84,2 ± 3,2 a	87,5 ± 87,5 a

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

4.2.3 Tasa de crecimiento. La tasa de crecimiento de la materia seca se determinó para cada órgano (hojas, tallos y tubérculos), como para el total producido en base a estimaciones de regresiones no lineales de la producción de materia seca en el tiempo. La tasa de crecimiento correspondió al delta de crecimiento diario (kg MS ha⁻¹ d⁻¹), para la cual se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de crecimiento} = \frac{\text{kg MS acumulada}_{t_2} - \text{kg MS acumulada}_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

Donde, t_2 representan el tiempo posterior y t_1 el tiempo inmediatamente anterior. El intervalo de tiempo corresponde al transcurrido entre cada colecta (7 días).

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

CUADRO 8 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana $[Y=(\text{Area}/(\text{SD}*(2*\text{Pi})^{0,5}))*\exp(-0,5*((X-\text{mean})/\text{SD})^2)]$ del crecimiento de las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Tratamiento (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	60	180	300
AREA	77253	71925	78983	98495
SD	37,3	31,5	28,0	28,2
MEAN	142,1	131	126,5	126,2
R ²	0,87	0,87	0,76	0,79
Sy.x	113,3	132,8	236,5	267,9

Las tasas de crecimiento de las hojas obtenidas de las regresiones (Figura 21), se observa que, todos los tratamientos comienzan con tasas de crecimiento bajas

(cercas a cero) que alcanzan un máximo a los 103 ddp en los tratamientos con fertilización fosforada y un máximo a los 110 ddp el tratamiento sin fertilización, ordenándose en función de la dosis de fósforo aplicada ya que los tratamientos más fertilizados presentaron mayores tasas de crecimiento con una relación de 2,4 veces superior entre el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el testigo. Luego las tasas de crecimiento de las hojas decrecen, donde se observó que desde los 124 ddp las tasas de crecimiento más alta se ordenan en forma inversa a la dosis de fósforo aplicada. Una semana después (entre 131 y 138 días) se observó que los tratamientos fertilizados comienzan con tasas de crecimiento negativas, lo cual evidencia una movilización o translocación de carbohidratos y minerales desde las hojas hacia órganos de reserva, este efecto coincide con lo señalado en la literatura (MCCOLLUM, 1978b).

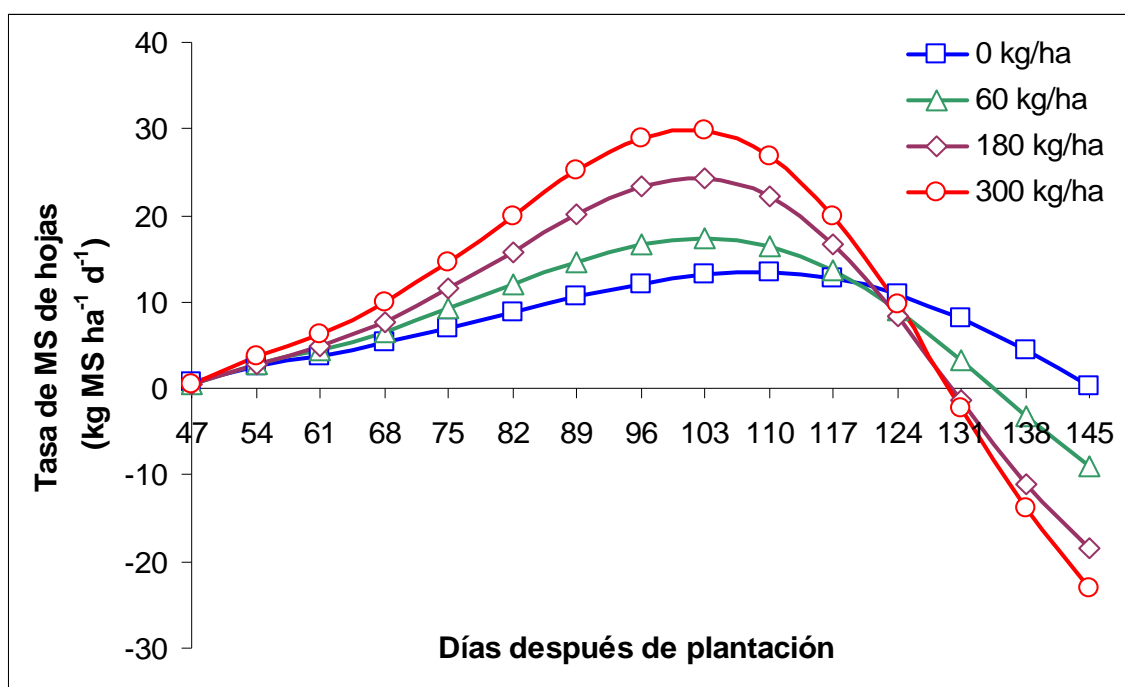


FIGURA 21 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento de las hojas.

Finalmente al momento a la madurez del cultivo (145 días) se mantuvo la tendencia a la desacumulación en los tratamientos fertilizados, estas tasas de

crecimiento oscilaron entre -23 y 0,4 kg MS ha⁻¹ d⁻¹ donde las mayores desacumulaciones las presentaron los tratamientos de mayor fertilización fosforada.

Según los resultados obtenidos por JENKINS y HAKOOMAT (1999) sobre la respuesta de la aplicación de fertilizante fosforado en el crecimiento de un cultivar Desirée, indican que con el incremento de la disponibilidad de fósforo aumenta la tasa de aparición de las hojas, como también el tamaño individual de estas. Además agregan, que el número final de hojas no se ve afectado y sugiere que la producción de nuevas hojas se ven retrasadas con bajos niveles de P. Esto explicaría el retardo en la madurez de los máximos, en una semana, entre los tratamientos fertilizados con respecto al tratamiento testigo.

4.2.3.2. Tasa de crecimiento de tallos. Siguiendo la misma metodología, se ajustaron los datos a una regresión no lineal en base a la producción de MS acumulada de los tallos en función del tiempo. El mejor ajuste resultó ser un modelo sigmoideo (Anexo 5). Los parámetros de la ecuación ajustada se muestran en el Cuadro 9, donde, Y_{máx}: representa la producción máxima de MS acumulada de los tallos; B: corresponde al valor en el tiempo (X) donde se encuentra el punto de inflexión de la curva; C: es un modificador de la pendiente de la curva y S_{y.x}: corresponde al error estándar de la ecuación.

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

Tratamiento (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	60	180	300
Y MAX	536	654	830	1074
B	99,1	96,0	94,8	96,0
C	8,48	6,87	4,85	4,49
R ²	0,88	0,81	0,84	0,76
Sy.x	81,8	137,2	161,0	270,3

Se observó (Figura 22) que las tasas de crecimiento de los tallos comenzaron con valores muy bajos en todos los tratamientos (47 ddp), manteniéndose esta razón

hasta los 61 días, momento que coincide con el inicio de la tuberización. Luego estas tasas de crecimiento de tallos en todos los tratamientos incrementan llegando a un máximo entre 96 y 103 días después de la plantación (floración del cultivo). Desde este momento comienza una disminución en la tasa de crecimiento de los tallos, para llegar a cosecha con valores cercanos a cero.

El crecimiento de los tallos se concentra principalmente entre los 75 a 124 ddp para todos los tratamientos, siendo en este periodo las tasas superiores a $0,92 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

En el máximo observado las tasas de crecimiento se ordenaron en función de las dosis de fósforo aplicadas, fluctuando entre $50,1$ y $15,6 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el testigo sin aplicación de fósforo.

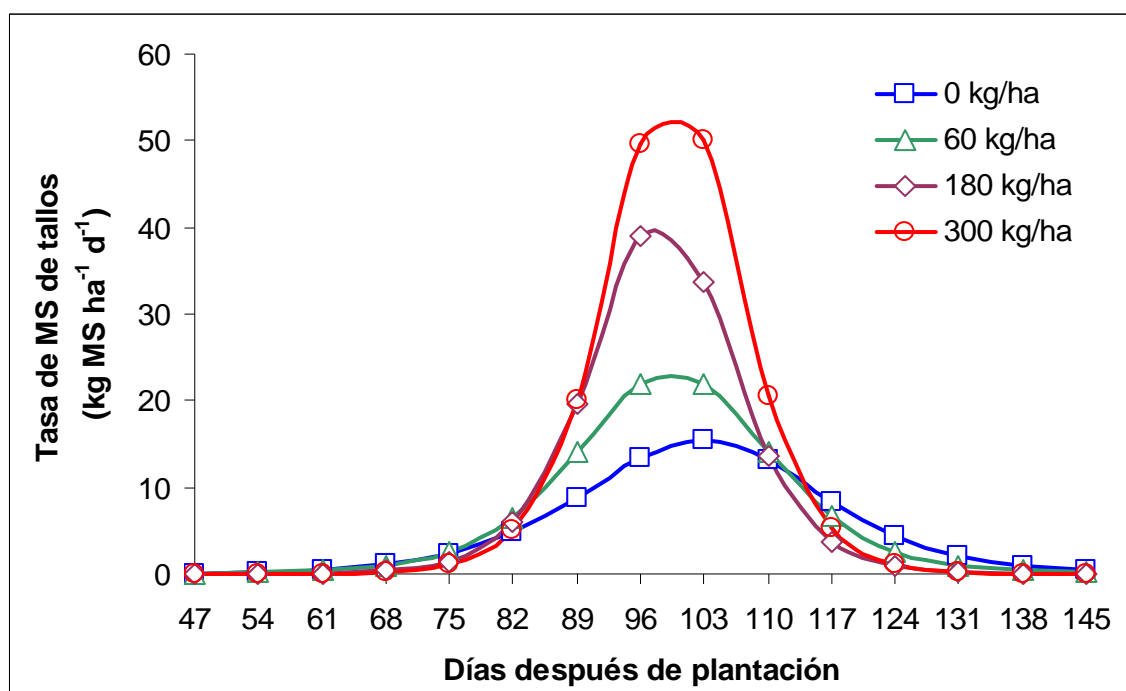


FIGURA 22 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento de los tallos.

Hasta los 117 días las tasas de crecimiento de los tallos son mayores en los tratamientos de mayor dosis de fósforo, condición que se invierte desde este punto hasta la madurez del cultivo (145 días). Este efecto se debe principalmente a dos factores, manifestado también en las hojas, por una parte una mayor traslocación de fotosintatos de los tratamientos de mayor fertilización fosforada hacia los tubérculos, sumado a un retraso del desarrollo en los tratamientos de menor nivel de fertilidad fosforada (MCCOLLUM, 1978b).

4.2.3.3 Tasa de crecimiento de tubérculos. La materia seca acumulada de los tubérculos en el tiempo, al igual que los tallos, se ajustó a un modelo sigmoideo (Anexo 6), donde los parámetros del ajuste se observan en el Cuadro 10.

CUADRO 10 Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo [$Y=Y_{max}/(1+exp((B-X)/C))$] de la materia seca de tubérculos producida en el tiempo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Tratamiento (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	60	180	300
Y MAX	12515	16345	14403	16168
B	131,4	133,9	120,2	118,1
C	18,22	18,56	14,25	14,53
R ²	0,96	0,95	0,93	0,92
Sy.x	548,0	805,4	1194,0	1460,0

Se observó que la curva que describe la tasa de crecimiento de los tubérculos incrementó en todos los tratamientos desde los 47 ddp (Figura 23). Este incremento de la tasa de crecimiento de los tubérculos alcanzó un máximo entre los 117 y 124 días después de plantación para los tratamientos de media y mayor fertilización fosforada.

En los tratamientos testigo y de baja dosis de fósforo se alcanzó un máximo cercano a los 138 ddp. Independiente de los máximos alcanzados por los tratamientos luego de estos momentos se observó que en todos los tratamientos comenzó una disminución en las tasa de crecimiento de este órgano hasta la madurez fisiológica (145 días), siendo esta disminución de un 44% del total alcanzado para el tratamiento de mayor fertilización fosforada y de solo un 6,6% en el testigo.

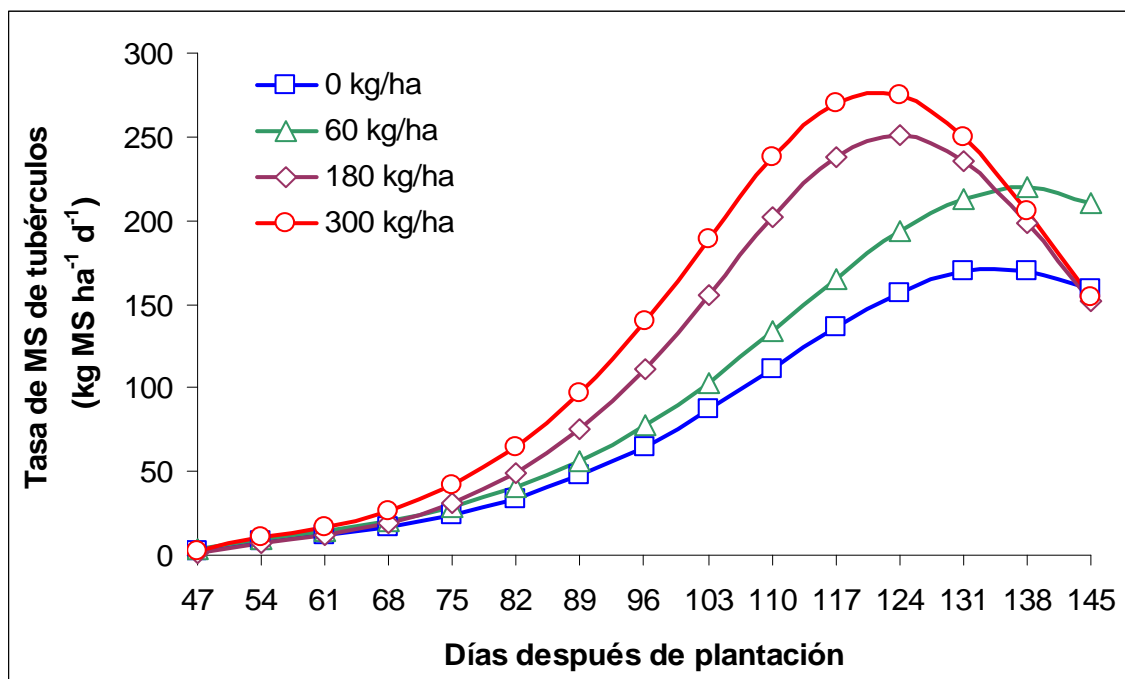


FIGURA 23 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento de los tubérculos.

Se observó la existencia de un desfase en el tiempo de dos semanas entre los máximos del tratamiento de mayor fertilización fosforada y el testigo, esto concuerda con resultados obtenidos por MCCOLLUM (1978b) donde reportó que plantas que crecen en suelos con baja disponibilidad de P, además de presentar una menor tasa de crecimiento, producen un atraso en la iniciación y desarrollo de los tubérculos.

4.2.3.4 Tasa de crecimiento total. Las tasas de crecimiento total se calcularon a partir de la suma de la producción de materia seca acumulada para cada órgano vegetal en función del tiempo cronológico. El total se ajustó a una regresión no lineal de tipo sigmoideo (Anexo 7). Los parámetros del ajuste se observan en el Cuadro 11.

CUADRO 11 Parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo [$Y=Y_{max}/(1+exp((B-X)/C))$] de la materia seca total producida en el tiempo para cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Tratamiento (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	60	180	300
Y MAX	13821	15960	15671	17661
B	127,5	125,3	115	112,2
C	18,96	18,26	14,43	14,29
R ²	0,96	0,94	0,92	0,91
Sy.x	647,2	985,5	1509	1842

Una vez realizado el ajuste y posterior a la desacumulación de la materia seca en los periodos de tiempo, se graficaron las tasas total de crecimiento (Figura 24). Se observó que todos los tratamientos comenzaron con una baja tasa de crecimiento que continuó en un incremento hasta llegar a un máximo a los 117 días después de la plantación para los tratamientos de media y mayor fertilización fosforada, comportamiento similar a lo observado en las tasas de crecimiento de los tubérculos, para luego decrecer hasta la madurez del cultivo, donde las tasa de crecimiento total de estos tratamientos fueron cercanas a los 127 kg MS ha⁻¹ d⁻¹.

Por su parte, los tratamientos de menor fertilización fosforada y el testigo alcanzaron un máximo a los 131 días después de la plantación, luego de este máximo las tasas de crecimiento total de estos tratamientos decrecen hasta la madurez (día 145).

Se observó que desde el inicio de los muestreos (día 47) hasta en día 131 los tratamientos de mayor fertilización fosforada alcanzaron las mayores tasas de crecimiento, las cuales se ordenaron en función de las dosis de fósforo aplicadas.

A partir de los 138 ddp, las tasas de crecimiento total son inferiores a las tasas de crecimiento de los tubérculos en todos los tratamientos con fertilización fosforada, estos resultados son coincidentes con los registrados por MCCOLLUM (1978b).

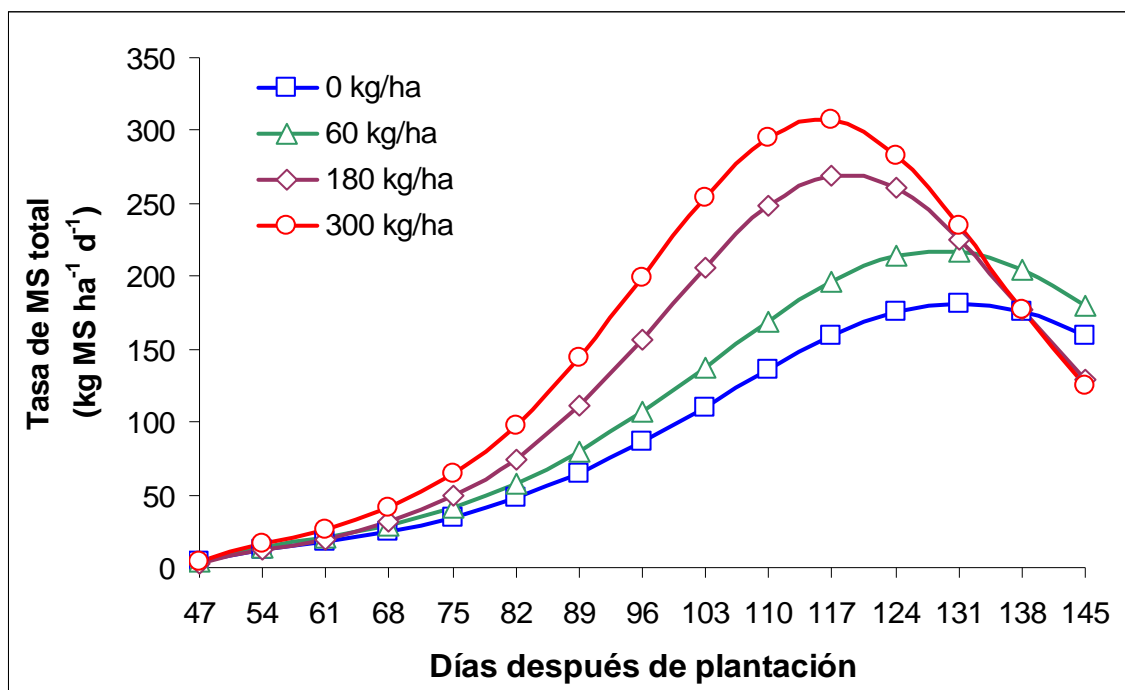


FIGURA 24 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de crecimiento total de materia seca.

4.2.4 Tasas de absorción de fósforo. Las tasas de absorción de fósforo fueron estimadas a partir de regresiones no lineales ajustadas a los valores promedio reales de la absorción de fósforo acumulada en el tiempo en cada órgano (hojas, tallos y tubérculos) en el cultivo de papa.

4.2.4.1 Tasa de absorción de P de hojas. Los datos de absorción de P acumulado de las hojas se ajustaron a una regresión de distribución Gaussiana (Cuadro 12). Donde, Area: corresponde al área bajo la curva; SD: a la desviación estándar; Mean: al valor en el tiempo X donde se produce la mayor producción Y; X: al tiempo en días desde la plantación y $S_{y.x}$: al error estándar. En base al ajuste de la absorción acumulada de P a las regresiones (Anexo 8), se calcularon las tasas de absorción de P de las hojas para los cuatro tratamientos (Figura 22).

CUADRO 12 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana $[Y=(Area/(SD*(2*Pi)^{0,5}))*exp(-0,5*((X-mean)/SD)^2)]$ de la absorción de fósforo en las hojas para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Tratamiento (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	60	180	300
AREA	115,2	123,6	152,5	181,6
SD	29,7	25,4	24,0	24,4
MEAN	126,8	120,6	118,6	117,7
R ²	0,83	0,85	0,76	0,78
Sy.x	0,263	0,299	0,525	0,569

Se observó que desde el inicio de los muestreos (día 47) los tratamientos comenzaron a aumentar sus tasas de absorción de P hasta un máximo a los 96 ddp (coincidiendo con la floración del cultivo). Luego las tasas de absorción de P de hojas decrecieron para llegar entre los 124 y 131 días a tasas de absorción de P cercanas a cero, comenzando a ser negativas, lo cual indicaría una translocación de P a los tubérculos, que aumentó (negativamente) hasta la cosecha (145 días) de forma inversa a la dosis aplicada de fósforo.

En el máximo que se alcanzó por los tratamientos, las tasas de absorción de P de hojas se ordenaron en función de las dosis fosforadas, donde el tratamiento de mayor fertilización fosforada presentó una tasa de 2,3 veces mayor al del tratamiento testigo (Figura 25).

El momento de mayor desacumulación de P en las hojas se presentó al momento de la cosecha (día 145), donde las tasas de absorción de P negativas se ordenan en función de la dosis fosforada, ya que tratamientos de mayor fertilización fosforada presentaron las mayores desacumulaciones de P. En este momento las tasas de absorción de P fluctuaron entre -0,07 y -0,02 kg P ha⁻¹ d⁻¹, entre el tratamiento de mayor fertilización fosforada y el testigo sin aplicación de fósforo.

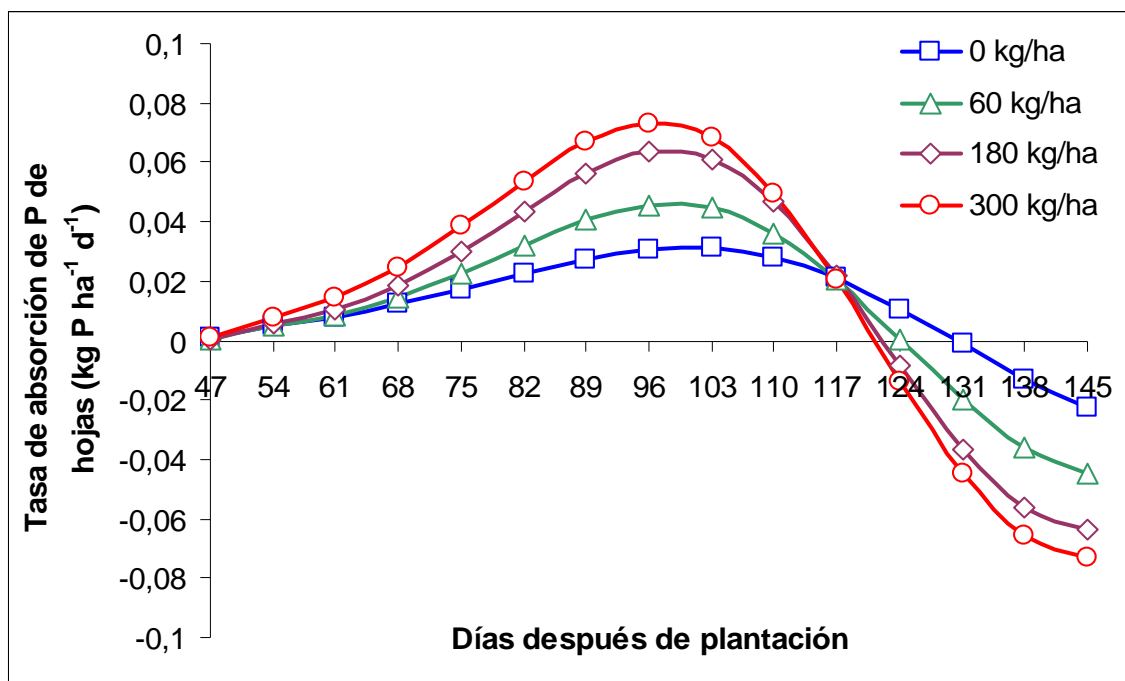


FIGURA 25 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de absorción de fósforo de las hojas.

4.2.4.2 Tasa de absorción de P de tallos. La absorción de P acumulada en los tallos, se ajustó a una regresión de distribución Gaussiana (Anexo 9). Los parámetros y la ecuación se observan en el Cuadro 13, donde; Y corresponde a la absorción de P en kg P ha^{-1} y X al tiempo en días después de la plantación.

CUADRO 13 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución Gaussiana [$Y=(\text{Area}/(\text{SD}*(2*\text{Pi})^{0,5}))*\exp(-0,5*((X-\text{mean})/\text{SD})^2)$] de la absorción de fósforo en los tallos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Tratamiento ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	0	60	180	300
AREA	49,3	56,8	76,2	95,3
SD	27,2	22,9	22,6	22,4
MEAN	128,4	121,1	120,3	119,3
R ²	0,83	0,80	0,80	0,73
Sy.x	0,128	0,187	0,257	0,389

Las tasas de absorción de P calculadas para los tallos en los cuatro tratamientos (Figura 26) presentaron un aumento desde el inicio de la medición (día 47) hasta un máximo a los 103 días en todos los tratamientos. Luego de este máximo, las tasas de absorción de P disminuyeron para llegar prácticamente cero entre los 124 y 131 días después de plantación, desde este momento hasta la madurez fisiológica, se observó que las tasas de absorción de P fueron negativas y se ordenaron en función de la dosis fosforada, ya que tratamientos de mayor fertilización fosforada presentaron mayores desacumulaciones donde predominaría una translocación de carbohidratos y minerales hacia órganos de reserva.

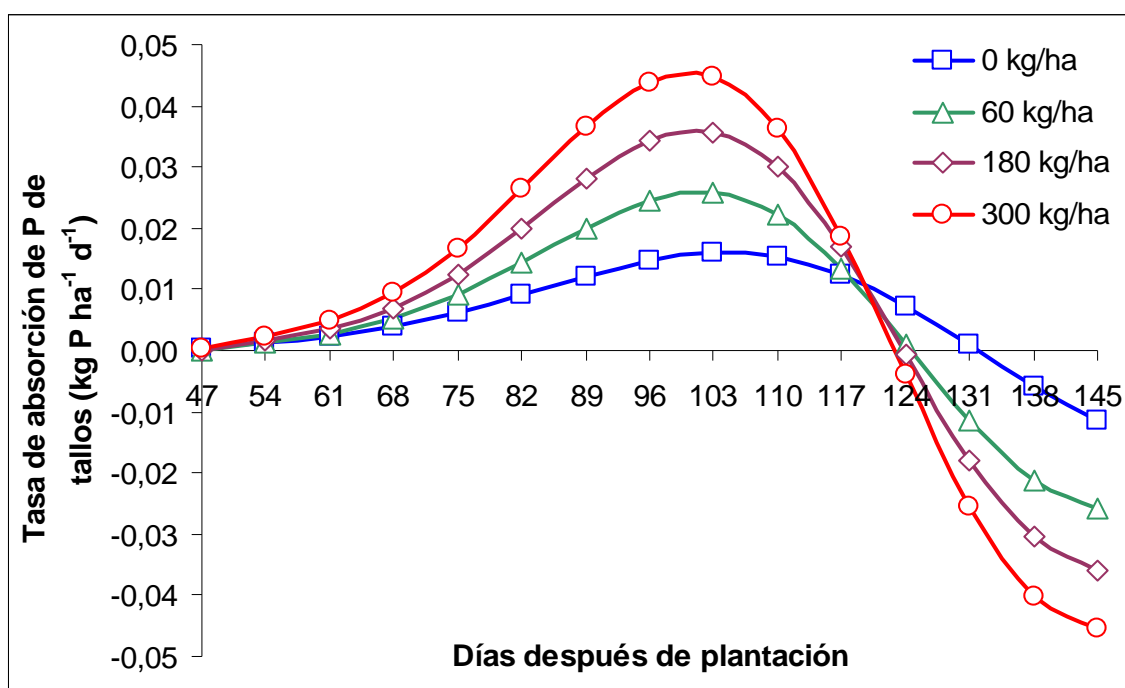


FIGURA 26 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de absorción de fósforo de los tallos.

Se observó que la magnitud de las tasas de absorción de P en los tratamientos con fertilización fosforada son equivalentes en los máximos y los mínimos con valores de 0,026; 0,036 y 0,045 $\text{kg P ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ en los tratamientos de menor, media y mayor fertilización fosforada respectivamente, a excepción del testigo que presentó un máximo de 0,016 y un mínimo a la cosecha de -0,011 $\text{kg P ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

En el máximo, las tasas de absorción de P de los tallos fueron de 1,6 a 1,9 veces menor a las tasas de absorción de P obtenidas por las hojas.

4.2.4.3 Tasa de absorción de P de tubérculos. La regresión para la absorción de P acumulada a través del tiempo en cada tratamiento (Anexo 10) se ajustó al modelo de distribución sigmoidea. La ecuación y parámetros se presentan en el Cuadro 14.

CUADRO 14 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo de distribución sigmoidea $[Y=Y_{\max}/(1+\exp((B-X)/C))]$ de la absorción de fósforo en los tubérculos para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Tratamiento (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	0	60	180	300
Y MAX	14,32	15,37	19,27	22,82
B	121,1	115,1	112,0	110,5
C	14,81	13,05	11,4	12,16
R ²	0,96	0,94	0,91	0,93
Sy.x	0,888	1,274	2,251	2,328

Las tasas de absorción de P de los tubérculos presentaron un incremento desde los 47 días después de la plantación hasta un máximo en los tratamientos fertilizados que se alcanzó a los 117 días, a diferencia del tratamiento testigo que alcanza un máximo de absorción de fósforo una semana después. Luego de estos máximos alcanzados, la absorción de fósforo disminuye hasta la madurez en todos los tratamientos (Figura 27).

Desde el inicio de los muestreos (día 47) hasta el día 131 después de plantación, las absorciones se ordenan en función de las dosis de fertilización fosforada, este comportamiento no se mantiene hasta la madurez, ya que el tratamiento testigo decrece menos de su máximo en un 35 g/100g al momento de cosecha, en comparación al tratamiento de mayor fertilización fosforada que presenta una disminución de 72 g/100g en la tasa de absorción de P.

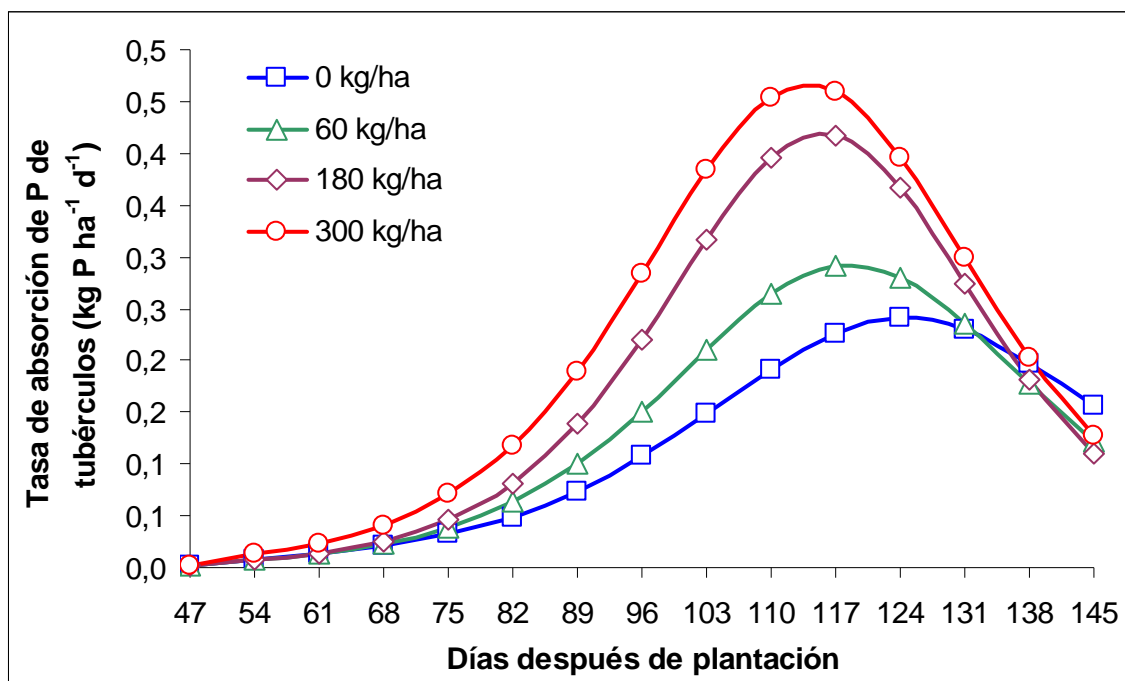


FIGURA 27 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la tasa de absorción de fósforo los tubérculos.

4.2.4.4 Tasa de absorción total de P. La absorción acumulada total de fósforo de cada tratamiento, se ajustó a una regresión de tipo sigmoidea (Anexo 11). En el Cuadro 15 se observan los parámetros de la ecuación, donde Y corresponde a la absorción de P total acumulado (kg P ha^{-1}) y X al tiempo en días después de plantación.

CUADRO 15 Ecuación y parámetros del ajuste a un modelo sigmoideo [$Y=Y_{\text{max}}/(1+\exp((B-X)/C))$] de la absorción total de fósforo para los cuatro tratamientos de fertilización fosforada.

Tratamiento ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$)	0	60	180	300
Y MAX	22,72	23,82	30,63	31,23
B	118,7	111,0	107,8	103,1
C	17,36	13,04	11,02	10,57
R ²	0,75	0,76	0,72	0,75
Sy.x	3,755	4,624	7,158	7,038

En la figura 28 se observó que las tasas de absorción total de P comenzaron inicialmente lentas llegando a un máximo entre los 110 y 124 días después de la plantación. Luego las tasas de absorción de P decrecieron para llegar al momento de madurez con tasas de absorción de fósforo que varió de 0,075 a 0,219 kg P ha⁻¹ d⁻¹.

Los tratamientos de media y mayor fertilización fosforada alcanzaron el máximo de absorción alrededor de dos semanas antes que el resto de los tratamientos, efecto similar al presentado por las tasas totales de crecimiento, y a su vez estas tasas de absorción fueron alrededor de 2,1 y 2,2 veces mayores que el tratamiento testigo, respectivamente.

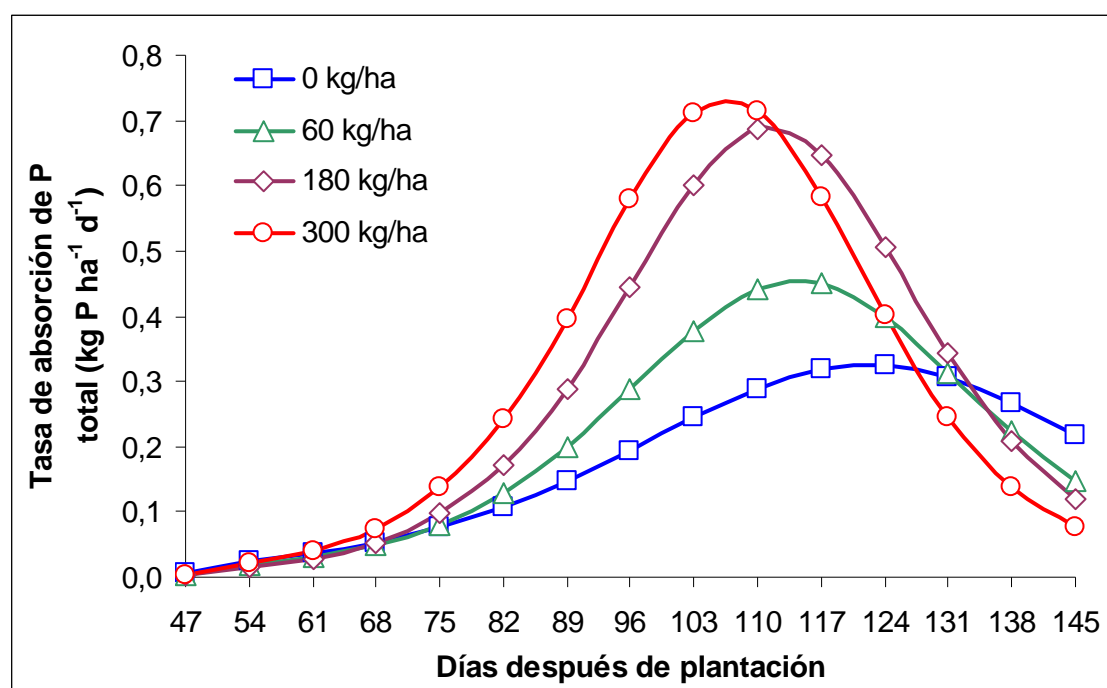


FIGURA 28 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada (kg P₂O₅ ha⁻¹) en la tasa de absorción total de fósforo.

Se observó que sólo el tratamiento de mayor fertilización fosforada presentó una menor tasa total que su propia tasa de absorción de P en los tubérculos, a partir del día 131 hasta la madurez del cultivo.

Datos ajustados del estudio realizado por MUGA (1990), en el cultivar Desirée, mostró un temprano máximo en la tasa de absorción total de P en el día 75 ddp, con una magnitud de $0,6 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ similar al tratamiento de fertilización media, en el presente estudio.

4.3 Parámetros de fertilización racional de P del cultivo de papa

Para cuantificar una fertilización razonada de P en el cultivo de papa, es necesario conocer sus parámetros más relevantes, los que generalmente son medidos al momento de cosecha, estos son: índice de cosecha (IC), índice de extracción de fósforo (IEP) y requerimiento interno de fósforo (RP).

4.3.1 Índice de cosecha. El índice de cosecha es una medida de eficiencia, éste parámetro indica la relación existente entre el producto de cosecha (tubérculo) y el total de biomasa producida por el cultivo. Los índices de cosecha fueron medidos desde el inicio de los muestreos (día 47) hasta la madurez fisiológica (Figura 29).

Se observó que el índice de cosecha presentó una misma tendencia en todos los tratamientos, solo se registró diferencia significativas entre el tratamiento de media fertilización fosforada y el testigo en el día 96 después de plantación (Cuadro 16), momento que coincidió con un aumento en la participación por parte de los tallos (Capítulo 4.2.2.2).

En el primer muestreo se observó el menor IC que varió de 10,8 a 28,8 g/100g, ordenándose en forma inversa a la dosis de P aplicada. Desde este momento, índice de cosecha aumentó rápidamente hasta los 61 días para luego seguir con incrementos más paulatinos hasta el momento de la cosecha (día 145), donde el IC osciló entre 85,6 y 87,8 g/100g, sin ser esta diferencia estadísticamente significativa.

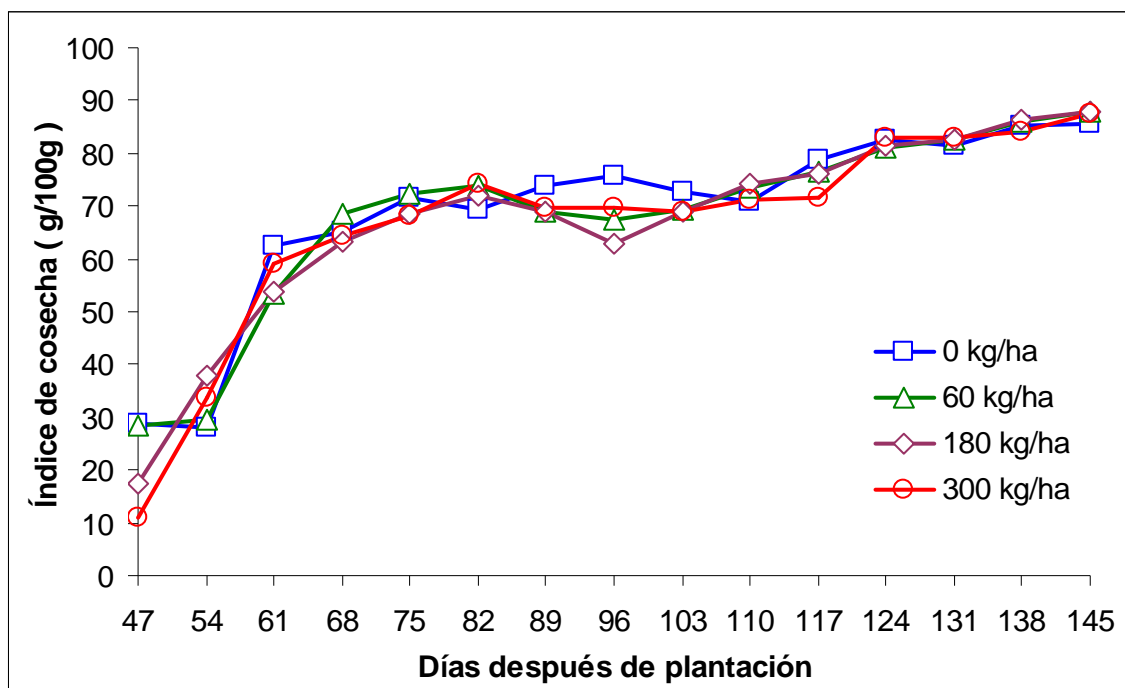


FIGURA 29 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la variación de los índices de cosecha del cultivo de papa.

Estos resultados son similares a los obtenidos por MUGA (1990), donde registró valores de IC entre 83 y 87 g/100g aplicando una dosis de $400 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ y superiores a los reportados por GAUNA (2000), para el cultivar Desirée, que van de 75 a 79 g/100g medios a los 134 días después de plantación.

Se analizó la variación de los IC en función del tiempo (Anexo 12) donde se observó que a los 61 ddp este parámetro cambió significativamente en todos los tratamientos, momento que coincidió con el inicio de la tuberización.

CUADRO 16 Variación de los índices de cosecha (g/100g) en el total producido en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa.

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		47	54	61	68	75
Indice de cosecha	0	28,8 ± 8,9 a	27,9 ± 18,3 a	62,7 ± 12,1 a	65,2 ± 3,0 a	71,5 ± 4,6 a
	60	28,5 ± 18,2 a	29,7 ± 14,3 a	53,4 ± 4,3 a	68,6 ± 3,1 a	72,3 ± 3,4 a
	180	17,5 ± 8,9 a	37,9 ± 9,5 a	53,7 ± 2,6 a	63,3 ± 2,0 a	68,6 ± 4,6 a
	300	10,8 ± 9,7 a	33,7 ± 9,1 a	59,3 ± 6,5 a	64,6 ± 4,3 a	68,1 ± 2,7 a

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		82	89	96	103	110
Indice de cosecha	0	69,5 ± 6,0 a	73,7 ± 2,1 a	75,6 ± 3,5 a	72,7 ± 11,5 a	70,7 ± 2,1 a
	60	74,0 ± 5,3 a	68,9 ± 7,3 a b	67,5 ± 4,8 a	69,4 ± 2,5 a	73,7 ± 3,4 a
	180	71,8 ± 0,4 a	68,9 ± 3,5 b	62,8 ± 2,8 a	69,0 ± 1,5 a	74,4 ± 1,7 a
	300	74,3 ± 4,4 a	69,9 ± 2,5 a b	69,6 ± 5,3 a	68,9 ± 2,0 a	71,1 ± 6,7 a

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		117	124	131	138	145
Indice de cosecha	0	78,8 ± 3,1 a	82,6 ± 4,2 a	81,3 ± 2,8 a	85,3 ± 0,8 a	85,6 ± 85,6 a
	60	76,5 ± 0,8 a	81,2 ± 6,0 a	82,6 ± 1,5 a	85,9 ± 0,8 a	87,8 ± 87,8 a
	180	76,0 ± 4,3 a	81,5 ± 2,3 a	82,7 ± 4,0 a	86,5 ± 2,6 a	87,7 ± 87,7 a
	300	71,6 ± 0,8 a	83,1 ± 6,3 a	82,9 ± 2,6 a	84,2 ± 3,2 a	87,5 ± 87,5 a

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

4.3.2 Índice extracción de fósforo. El índice de extracción de fósforo es la relación existente entre el fósforo absorbido por el tubérculo respecto al total de fósforo absorbido por el cultivo en el momento de cosecha. El índice de extracción de fósforo, en el presente estudio, fue medido durante todo el periodo de desarrollo del cultivo (Figura 30).

Se observó que índice de extracción de fósforo presentó una tendencia similar en todos los tratamientos, donde no hubo diferencias significativas en ningún momento que duró el ensayo. Variando el índice de extracción al momento de cosecha entre un 85,1 y un 88,6 g/100g entre el tratamiento sin aplicación de fósforo y el tratamiento de mayor fertilización fosforada.

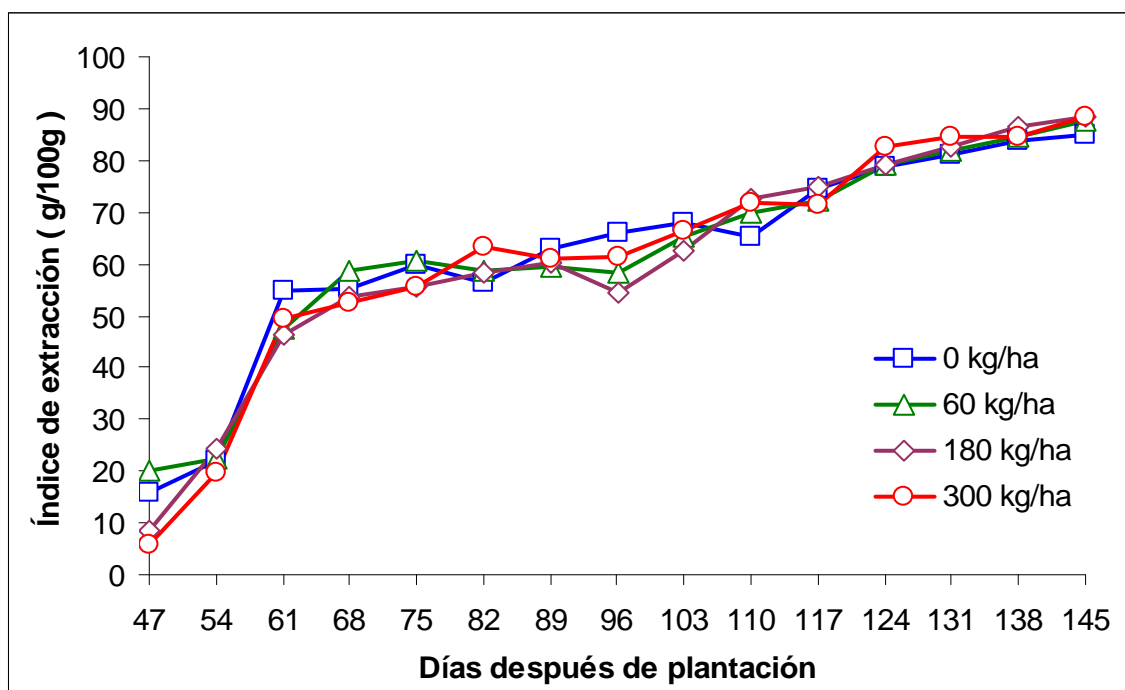


FIGURA 30 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada ($\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) en la variación de los índices de extracción de fósforo del cultivo de papa.

Los resultados de IEP concuerdan con los datos ajustados del estudio realizado por MUGA (1990), donde obtuvo valores que oscilaron entre 43 y 61 g/100g a los 75 días después de plantación y de 80 a 86 g/100g en el momento de cosecha, no

considerando en la absorción total de P, el aporte producido por las raíces y estolones. Por su parte, resultados obtenidos al momento de cosecha por GAUNA (2000), son superiores a los registrados en este estudio, con valores de IEP entre 91 y 94 g/100g, los cuales no se ordenaron en función de la dosis aplicada de P.

Al analizar la variación del índice de extracción de fósforo de cada tratamiento en función del tiempo (Anexo 13) se observa que a los 61 días después de la plantación existe un aumento importante en este índice, lo cual se atribuye a que este momento coincide con el inicio de la tuberización del cultivo. Este comportamiento fue similar al presentado por el índice de cosecha.

CUADRO 17 Variación de los índices de extracción (g/100g) en el total producido en distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa.

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		47	54	61	68	75
Indice de extracción	0	15,8 ± 4,1 a	22,2 ± 14,1 a	54,7 ± 12,3 a	55,2 ± 3,5 a	59,9 ± 5,9 a
	60	20,0 ± 13,8 a	22,3 ± 10,9 a	47,5 ± 3,5 a	58,8 ± 4,1 a	60,5 ± 3,0 a
	180	8,5 ± 3,8 a	24,2 ± 5,9 a	46,3 ± 3,9 a	53,6 ± 1,5 a	55,6 ± 4,5 a
	300	5,9 ± 6,4 a	19,7 ± 4,7 a	49,3 ± 9,1 a	52,7 ± 5,7 a	55,6 ± 4,1 a

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		82	89	96	103	110
Indice de extracción	0	56,4 ± 6,1 a	63,0 ± 3,9 a	65,9 ± 3,7 a	67,8 ± 11,8 a	65,4 ± 3,3 a
	60	58,8 ± 10,5 a	59,6 ± 7,2 a	58,5 ± 4,6 a	65,1 ± 4,8 a	70,1 ± 4,9 a
	180	58,3 ± 2,3 a	60,1 ± 5,1 a	54,5 ± 7,1 a	62,7 ± 2,8 a	72,7 ± 3,1 a
	300	63,2 ± 3,7 a	61,1 ± 3,0 a	61,5 ± 6,1 a	66,2 ± 1,9 a	72,0 ± 4,7 a

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		117	124	131	138	145
Indice de extracción	0	74,5 ± 4,7 a	78,9 ± 3,4 a	81,1 ± 3,5 a	83,9 ± 2,6 a	85,1 ± 3,6 a
	60	72,3 ± 2,6 a	79,1 ± 6,0 a	82,0 ± 2,6 a	84,7 ± 2,4 a	87,7 ± 3,1 a
	180	74,9 ± 4,5 a	79,1 ± 3,8 a	82,5 ± 3,5 a	86,4 ± 3,8 a	88,4 ± 3,7 a
	300	71,6 ± 2,5 a	82,6 ± 6,5 a	84,6 ± 3,0 a	84,4 ± 3,7 a	88,6 ± 1,7 a

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

4.3.3 Requerimiento interno de fósforo (RP). El requerimiento interno de fósforo está definido como la concentración crítica mínima óptima de fósforo en la biomasa total del cultivo al momento de cosecha, que permita la máxima producción económica del cultivo. En este estudio se midió el RP desde el día 47 después de plantación hasta en momento de cosecha (Figura 31).

Durante todo el desarrollo del cultivo, no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 18).

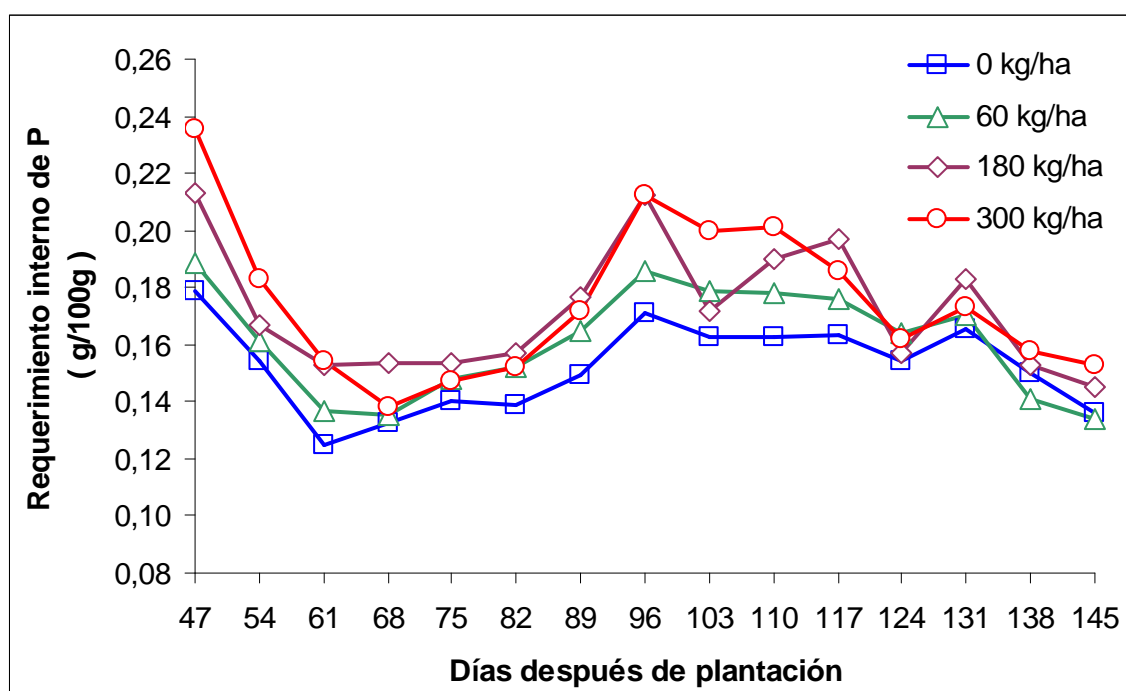


FIGURA 31 Efecto de distintas dosis de fertilización fosforada en la variación del requerimiento interno de fósforo del cultivo de papa.

Se observó que la curva que describe el RP presentó una misma tendencia en todos los tratamientos. En el primer muestreo el RP varió entre 0,18 y 0,24 g/100g entre el tratamiento testigo y el de mayor fertilización fosforada. Luego este RP disminuyó en todos los tratamientos hasta un mínimo a los 61 días (inicio de tuberización). Desde este momento la concentración de P incrementó hasta un segundo máximo a los 96 días, coincidiendo con la floración del cultivo. De este

máximo la concentración de P disminuyó constantemente hasta la madurez fisiológica del cultivo (días 145), donde los valores fluctuaron entre 0,13 y 0,15 g/100g.

El comportamiento de la curva de RP es no concuerda a lo señalado por RODRIGUEZ (1993), donde describe una disminución exponencial del RP, debido a que mientras se desarrolla la planta, una mayor parte de los fotosintatos es dirigido a la síntesis de materiales libres de P requeridos como soporte estructural.

La disminución de la concentración de P en estados iniciales, se pudo deber, a la forma de aplicación del fertilizante, el mismo efecto presentó la concentración de P de las hojas y de los tubérculos donde se expresaron las causas (ver Capítulo 4.1.2.1).

Al momento de madurez fisiológica, el RP es inferior al sugerido por RODRIGUEZ (1993), para cultivares tardíos de 0,18 g/100g. Por otra parte, estudios de campo realizados con el cultivar Desirée, ubicados en mismo sector que el presente estudio, reportaron valores levemente inferiores de RP entre 0,12 y 0,13 g/100g (GAUNA, 2000; MUGA, 1990).

Se debe tener en consideración que este cultivo tiene la posibilidad de destinarse para papa primor, esto implica una cosecha temprana donde el RP es mayor, valores de 0,22 g/100g son propuestos por SINGHT *et al.* (2001), mientras que WALWORTH y MUNIZ (1993) sugieren 0,21 g/100g en un cultivar Green Mountain (semitardío) a los 91 ddp. Los niveles indicados por estos autores son ligeramente superiores con respecto a esta investigación, donde las concentraciones fluctuarían entre 0,16 y 0,20 g/100g si el cultivo es cosechado a los 110 ddp.

CUADRO 18 Variación del requerimiento interno de fósforo (g/100g) producido por distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		47	54	61	68	75
Requerimiento interno fósforo	0	0,179 ± 0,403 a	0,154 ± 0,087 a	0,125 ± 0,012 a	0,133 ± 0,056 a	0,140 ± 0,078 a
	60	0,188 ± 0,466 a	0,161 ± 0,091 a	0,136 ± 0,040 a	0,135 ± 0,080 a	0,148 ± 0,167 a
	180	0,213 ± 0,182 a	0,167 ± 0,218 a	0,153 ± 0,036 a	0,154 ± 0,140 a	0,153 ± 0,028 a
	300	0,236 ± 0,363 a	0,183 ± 0,073 a	0,154 ± 0,205 a	0,138 ± 0,093 a	0,147 ± 0,046 a

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		82	89	96	103	110
Requerimiento interno fósforo	0	0,139 ± 0,088 a	0,149 ± 0,177 a	0,171 ± 0,174 a	0,163 ± 0,145 a	0,163 ± 0,098 a
	60	0,152 ± 0,149 a	0,165 ± 0,068 a	0,186 ± 0,074 a	0,179 ± 0,064 a	0,178 ± 0,051 a
	180	0,157 ± 0,037 a	0,177 ± 0,051 a	0,213 ± 0,095 a	0,172 ± 0,017 a	0,190 ± 0,150 a
	300	0,152 ± 0,073 a	0,172 ± 0,034 a	0,213 ± 0,119 a	0,200 ± 0,082 a	0,201 ± 0,064 a

	Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Días después de plantación				
		117	124	131	138	145
Requerimiento interno fósforo	0	0,163 ± 0,039 a	0,154 ± 0,082 a	0,166 ± 0,078 a	0,150 ± 0,074 a	0,136 ± 0,069 a
	60	0,176 ± 0,115 a	0,164 ± 0,105 a	0,170 ± 0,145 a	0,141 ± 0,076 a	0,134 ± 0,097 a
	180	0,197 ± 0,088 a	0,157 ± 0,102 a	0,183 ± 0,176 a	0,153 ± 0,148 a	0,145 ± 0,076 a
	300	0,186 ± 0,036 a	0,162 ± 0,160 a	0,173 ± 0,109 a	0,158 ± 0,021 a	0,153 ± 0,056 a

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

5 CONCLUSIONES

A mayor nivel de fertilidad fosforada del suelo mayor es la producción de materia seca del cultivo de papa de acuerdo a las dosis de P aplicadas, lo que se reflejó en la cosecha en una mayor producción de tubérculos, sin variación en la producción de hojas, tallos ni estolones. Sin embargo, desde la emergencia hasta los 124 días después de plantación, la producción de hojas y tallos, pero no los estolones, se ordenan en función del nivel de fertilidad fosforada utilizado en este estudio.

Las tasas de crecimiento de cada órgano y de la materia seca total aumentaron en función de los niveles de fertilidad fosforada del suelo. Tanto las hojas como los tallos después de la floración muestran una disminución en sus tasas, atribuido a una redistribución de carbohidratos y minerales a los tubérculos. Adicionalmente, se observó un retardo en la movilización de carbohidratos en los tratamientos de menor nivel de fertilidad fosforada.

La concentración de fósforo en los órganos a través del tiempo varía independientemente de los niveles de fertilidad fosforada del suelo. En los tallos, la concentración de P disminuyó continuamente a través del desarrollo del cultivo, mientras que en las hojas y tubérculos, la concentración de P aumentó, alcanzando un máximo cercano a la floración del cultivo y luego decreció paulatinamente hasta la cosecha. Este efecto fue atribuido a la forma de aplicación del fertilizante.

La absorción acumulada de P en las hojas, tallos y tubérculos, fue similar a la producción de materia seca y aumentó en función de los niveles de fertilidad fosforada mostrando diferencias significativas en la mayoría de las colectas a través del tiempo.

Las tasas de absorción de fósforo de los órganos y del total del cultivo de papa varían con un aumento de la fertilidad P del suelo. La translocación de P hacia los tubérculos desde tallos y hojas fue mayor a mayor nivel de fertilidad fosforada,

mostrando que los tallos y hojas son órganos de acumulación hasta floración y posteriormente se transforman en fuente de nutrientes para el tubérculo.

El índice de cosecha y el índice de extracción de fósforo presentan un valor independiente a las disponibilidades de P en el suelo y ambos parámetros aumentaron hasta la cosecha, no presentado diferencias significativas en las últimas 7 colectas. El rango de índice de cosecha (IC) fluctuó entre 86-88% con un valor promedio de 87%, mientras que el rango de índice de extracción de P (IEP) en la cosecha varió de 85-89%, con un valor promedio de 87%.

El requerimiento interno de fósforo (RP) del cultivo de papa no varió significativamente con los niveles de fertilidad fosforada evaluados. El comportamiento presentado fue similar a la concentración de P encontrada en los tubérculos, debido a la fuerte influencia de este órgano en el total de la planta. Los valores de RP a la cosecha oscilan entre 0,13-0,15%, con un valor promedio de 0,14%.

6 RESUMEN

La fertilización racional es un método para predecir las normas de fertilización de los cultivos. La formulación de una dosis se basa en la determinación de la demanda del nutriente, el suministro del nutriente y la eficiencia de fertilización. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de distintos niveles de disponibilidad de fósforo en el suelo, sobre la evolución de los parámetros de la demanda asociados a la nutrición fosforada del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). Se midió la producción de materia seca y las concentraciones de fósforo en los órganos y a través de ellos se estimaron: la tasa de producción de materia seca y la absorción de P, el índice de cosecha, el índice de extracción de P y el requerimiento interno de P de un experimento realizado en campo en la Estación Experimental Santa Rosa de la Universidad Austral de Chile, sobre un Hapludand (serie Valdivia). El diseño experimental fue de bloques completos al azar y cuatro niveles de fertilidad P. Los tratamientos se obtuvieron a partir de aplicaciones de superfosfato triple de 0, 60, 180 y 300 kg P₂O₅ ha⁻¹. Las colectas de las plantas se realizaron semanalmente, separando los órganos (hojas, tallos, estolones y tubérculos) desde la emergencia hasta la madurez fisiológica del cultivo. Todos los resultados fueron analizados estadísticamente a través de Andeva y pruebas de Tukey ($p < 0,05$) para separar los promedios. En la descripción de las curvas de producción de materia seca y de absorción de fósforo, se ajustaron las curvas a regresiones de tipo no lineales utilizando el programa estadístico GraphPad Prism 4,0. Se concluye que los distintos niveles de fósforo afectan la tasa y producción de materia seca, como la absorción de fósforo en cada órgano y en consecuencia sobre el total. Los parámetros de índice de cosecha, índice de extracción de fósforo y requerimiento interno, utilizados para el cálculo de la dosis por el método racional, no presentan diferencias significativas, por lo tanto, se consideran constantes al momento de cosecha.

SUMMARY

The rational fertilization is a method to predict the norms of fertilization of the cultures. The formulation of a dose is based on the determination of the nutrient demand, nutrient supply and fertilization efficiency. The objective of this research was to evaluate the effect of different soil phosphorus levels, on the evolution of the demand parameters in the potato's (*Solanum tuberosum* L.) phosphorus nutrition. For its accomplishment, it is necessary to measure the production of dry matter and the phosphorus concentrations in the organs to determine the parameters derived like: dry matter accumulation rates, P uptake rates, harvest index, P extraction index and internal P requirement. A field experiment was located in the experimental station Santa Rosa of the Austral University of Chile, over a volcanic ash soil (Hapludand). The experimental design was completely randomized blocks with fourth treatments and three replications. The treatments were obtained with fourth P levels: 0, 60, 180 y 300 kg P₂O₅ ha⁻¹, from triple superphosphate. Each plot were collected weekly and separated by organs (leaves, stems, stolons and tubers) from the emergency to the physiological maturity of the plant. All the results were statistically analyzed through Andeva and Tukey tests (p<0,05) to separate means. Dry matter curves and phosphorus uptake were fitted to nonlinear regressions using GraphPad Prism 4,0 statistical software. The result shows that the different phosphorus availabilities significantly affected the accumulations and rates for the dry matter and P uptake, affecting each organ and the whole plants. The parameters of harvest index, P extraction index and internal P requirement, used for the calculation dose by the rational method, do not present statistically differences, therefore, they are considered constants at the harvest.

7 BIBLIOGRAFIA

ALONSO, F. 1996. El cultivo de la patata. Madrid, España. Mundi-Prensa. 272 p.

ALVAREZ, E., ETCHEVERS. J., ORTIZ, J., NUÑEZ, R., MARTINEZ, A. y CASTELLANOS, J. 2001. Phosphorus nutrition of potato and maize seedlings. Terra 19 (1): 55-65.

ALVAREZ, E., ETCHEVERS. J., ORTIZ, J., NUÑEZ, R., VOLKE, V., TIJERINA, L. y MARTINEZ, A. 1999. Biomass production and phosphorus accumulation of potato as affected by phosphorus nutrition. Journal of Plant Nutrition. 22 (1): 205-217.

BANSE, J. y KALAZICH, J. 1977. Características de las variedades de papa que se certifican en Chile. Estación Experimental Remehue, Chile. Boletín Divulgativo N° 7. 10 p.

BEUKEMA, H. y ZAAG VAN DER, D. 1979. Potato improvement. some factors and facts. International Agricultural Center, Wageningen, The Netherlands. 224p.

CONTRERAS, A. y SILVA, B. 1986. Uso del estiércol como complemento de la fertilización mineral de la papa. Agro Análisis. 21: 9-12.

CONTRERAS, A. 2003. Papa. En: FAIGUENBAUM, H. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Santiago, Chile. pp. 599-696.

CONTRERAS, A. 2001. Ecofisiología del rendimiento de la planta de papa. Revista de la papa. Asociación Chilena de la Papa. 6 (10): 15-16.

- COVARRUBIAS, J., CASTILLO, S., VERA, J., NUÑEZ, R., SANCHEZ, P., AVELDAÑO, R. Y PEÑA, J. 2005. Absorción y eficiencia de uso de fósforo en papa cultivar Alpha con ^{32}P . *Agrociencia*. 39 (2): 127-132.
- FAIGUENBAUM, H. 1987. Producción de cultivos en Chile. Santiago, Chile. Publicitaria Torrelozones Ltda. 332 p.
- FREEMAN, K., FRANZ, P. y JONG, R. 1998. Effect of phosphorus on the yield, quality and petiolar phosphorus concentrations of potatoes (cvv. Russet Burbank and Kennebec) grown in the krasnozem and duplex soils of Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 38 : 83-93.
- GAUNA, C. 2000. Utilización y determinación de parámetros del método racional de fertilización para el N-P-Mg en el cultivo de la papa. Tesis. Lic. Agr. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. Valdivia. 95 p.
- GUERRA, A. Y CURBELO, R. 1985. Fertilización fosfórica de la papa. I. Cambios cualitativos y cuantitativos en el tubérculo durante su desarrollo. *Agrotecnia de Cuba* 17 (1) 95-100.
- HEGNEY, M. y MCPHARLIN, I. 1999. Broadcasting phosphate fertilizers produces higher yields of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) than band-placement on coastal sands. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 39: 495-503.
- 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.
- IREN-CORFO-UACH. 1978. Estudio de suelos de la provincia de Valdivia. 178p.
- JENKINS, P. y HAKOOMAT, A. 1999. Growth of potato cultivars in response to application of phosphate fertiliser. *Annals of Applied Biology*. 135: 431-438.

- KALAZICH, J., LOPEZ, H y SANTOS, J. 2003. KARU-INIA, nueva variedad de papa para Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Remehue. Boletín Informativo N° 40.
- KALAZICH, J. 1995. Principales variedades de papa, aptitudes y usos. En: Curso de manejo y fertilización en papa. Programa de Capacitación de Agentes de Extensión del Programa de Transferencia Tecnológica. INDAP IX Región. 11 y 12 de diciembre 1995. Instituto de investigaciones Agropecuarias Estación Experimental Carillanca. pp. 77-90.
- KOLBE, H. y STEPHAN-BECKMANN, S. 1997a. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). I. leaf and stem. Potato Research 40: 111-129.
- KOLBE, H. y STEPHAN-BECKMANN, S. 1997b. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). II tuber and whole plant. Potato Research 40: 135-153.
- MAC KERRON, D. y HEILBRONN, T. 1985. A method for estimating harvest indices for use in surveys of potato crop. Potato Research. 28:279-282.
- MCCOLLUM, R.E. 1978a. Analysis of the potato growth under differing P regimes. I Tuber yields and allocation of dry matter and P. Agronomy Journal. 70:51-57.
- MCCOLLUM, R.E. 1978b. Analysis of the potato growth under differing P regimes. II Time by P status, interactions for growth and leaf efficiency. Agronomy Journal. 70:58-67.
- MAIER, N.A.; MCLAUGHLIN, M.J.; HEAP, M.; BUTT, M. y SMART, M.K. 2002a. Effect of current-season application of calcitic lime and phosphorus fertilization on soil pH, potato growth, yield, dry matter content, and cadmium concentration. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 33 (13 y 14): 2145-2165.

- MONTALDO, P. y 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.
- MONTALDO, A. 1984. Cultivo y mejoramiento de la papa. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura, Costa Rica. 676 p.
- MUGA, J. 1990. Ritmo de crecimiento, absorción de macronutrientes y sus relaciones nutricionales en el cultivo de la papa. Tesis. Lic. Agr. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. Valdivia. 85 p.
- NETHERLANDS POTATO CONSULTATIVE FOUNDATION, NIVAP. 2007. Factores externos que influyen en la calidad. <http://www.aardappelpagina.nl/es/sobre_patatas/agronom%eda/el_camino_de_la_elaboraci%3n/factores_externos> (24 Ene 2007).
- NISSEN, J. 1974. Estudio agrológico del predio experimental Santa Rosa. Valdivia. Instituto de Suelos y Abonos, Facultad de Agronomía, Universidad Austral de Chile. 40 p.
- OFICINA DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS AGRARIAS, ODEPA. 2006. Situación del mercado de las papas. <<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servlet/contenidos.ServletResumenesScr?idcla=2&idcat=3>> (22 Ene 2007)
- PINOCHET, D. 1988. Modelo simple para la estimación de la fertilización fosforada de los cultivos. Tesis de Magíster en Ciencias Agropecuarias. Pontificia Universidad Católica de Chile. 88 p.
- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE, PUC. 2006. Hortalizas de estación calida. <http://www.puc.cl/sw_educ/hortalizas/html/hortalizas_calidas.html> (20 Dic. 2006).

- ROCHA, F., FONTES, P., FONTES, R. y REIS, F. 1997. Critical phosphorus concentration in potato plant parts at two growth stages. *Journal of Plant Nutrition*. 20 (4 y 5): 573-579.
- RODRIGUEZ, J. 1993. La fertilización de los cultivos. Un método racional. Colección en agricultura. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. 291p.
- RODRIGUEZ, J.; PINICHET, D. y MATUS, F. 2001. Fertilización de los cultivos. Primera edición. LOM ediciones. Santiago, Chile. 117 p.
- SAAVEDRA, N. 1975. Manual de análisis de plantas. Publicación nº 17. Facultad de Agronomía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 130p
- SANTOS, J y KALAZICH, J. 1995. Plantación y prácticas culturales. En: Curso de manejo y fertilización en papa. Programa de Capacitación de Agentes de Extensión del Programa de Transferencia Tecnológica. INDAP IX Región. 11 y 12 de diciembre 1995. Instituto de investigaciones Agropecuarias Estación Experimental Carillanca. pp. 91-101.
- SCHACHTMAN, D., REID, R. YAYLING, S. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiology* 116: 447-453.
- SCHNETTLER, E. 2006. Revista de la papa. Asociación Chilena de la Papa. Chile. Año 8 (26): 16 p.
- SIERRA, C. 1995. Fertilización del cultivo de la papa. En: Curso de manejo y fertilización en papa. Programa de Capacitación de Agentes de Extensión del Programa de Transferencia Tecnológica. INDAP IX Region. 11 y 12 de diciembre 1995. Instituto de investigaciones Agropecuarias Estación Experimental Carillanca. pp. 51-65.

SINGH, S., VINAY, S. y SANDEEP, S. 1996. Critical limit of phosphorus in an Inceptisol for potato. *Annals of Agricultural Research*. 17 (4): 414-415.

SOLTANPOUR, P. 1969. Accumulation of dry matter and NPK by Russet Burbank, Oromonte and Red McClure potatoes. *American Potato Journal*. 46 (4): 111-119.

TAIZ, L. y ZEIGER, E. 2002. Mineral nutrition. In: *Plant Physiology*. 3rd edition. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, USA. pp. 67-86.

WALWORTH, J y MUNIZ, J. 1993. A compendium of tissue nutrient concentrations for field-grown potatoes. *American Potato Journal*. 70 (8): 579-597.

ANEXOS

ANEXO 1 Variación en el tiempo de la acumulación de materia seca en los tubérculos (kg MS ha⁻¹) en el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P₂O₅ ha⁻¹).

Día	Tratamientos (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)			
	0	60	180	300
47	37 ± 23 a	42 ± 56 a	17 ± 12 a	11 ± 11 a
54	46 ± 43 a	45 ± 34 a	82 ± 36 a	58 ± 30 a
61	264 ± 149 a b	248 ± 77 a	254 ± 89 a	299 ± 112 a
68	321 ± 126 a b	433 ± 52 a	391 ± 117 a b	568 ± 178 a
75	509 ± 82 a b c	727 ± 391 a	619 ± 224 a b	1077 ± 205 a
82	709 ± 121 a b c	884 ± 266 a	1066 ± 259 a b	1488 ± 278 a
89	1212 ± 300 a b c	975 ± 297 a	1160 ± 147 a b	1847 ± 576 a b
96	1813 ± 429 b c d	2009 ± 25 a b	1933 ± 538 a b	2547 ± 148 a b
103	2097 ± 795 c d e	2301 ± 545 a b c	3367 ± 1210 b c	4038 ± 433 a b c
110	3303 ± 617 d e f	3957 ± 902 b c	5806 ± 1693 c d	7122 ± 505 c d e
117	3615 ± 1017 e f	4570 ± 248 c d	6364 ± 911 c d	6319 ± 1730 b c d
124	4513 ± 630 f	6998 ± 731 d e	6535 ± 806 d	10168 ± 2559 d e f
131	6215 ± 777 g	6776 ± 1883 d e	9750 ± 1081 e	10870 ± 2416 e f
138	8106 ± 841 h	8604 ± 548 e f	13334 ± 2539 f	14348 ± 3833 f
145	8103 ± 603 h	10970 ± 1967 f	11069 ± 1030 e f	13134 ± 1640 f

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

ANEXO 2 Variación en el tiempo de la acumulación total de materia (kg MS ha⁻¹) en el cultivo de papa bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P₂O₅ ha⁻¹).

Día	Tratamientos (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)			
	0	60	180	300
47	160 ± 98 a	137 ± 145 a	120 ± 63 a	122 ± 44 a
54	164 ± 45 a	165 ± 55 a	252 ± 63 a	212 ± 57 a b
61	416 ± 175 a	454 ± 125 a b	468 ± 147 a	498 ± 154 a b
68	491 ± 176 a	623 ± 52 a b	611 ± 182 a	871 ± 249 a b
75	705 ± 72 a b	1006 ± 491 a b	892 ± 279 a	1572 ± 294 a b
82	1009 ± 84 a b	1228 ± 224 a b	1472 ± 364 a b	2005 ± 304 a b
89	1637 ± 439 a b c	1409 ± 339 a b	1673 ± 300 a b	2622 ± 854 a b
96	2430 ± 546 b c	3020 ± 274 a b c	3136 ± 765 a b	3718 ± 330 a b c
103	2900 ± 598 c d	3332 ± 690 b c	4896 ± 1685 b c	5878 ± 707 b c d
110	4681 ± 927 d e	5407 ± 1105 c d	7843 ± 2119 c	10065 ± 1558 d e f
117	4601 ± 1119 d e	5994 ± 336 c d e	8386 ± 1292 c d	8848 ± 2374 c d e
124	5503 ± 889 e	8650 ± 316 e f	8032 ± 735 c d	12176 ± 2352 e f g
131	7718 ± 753 f	8330 ± 2312 d e f	11964 ± 1793 d e	13277 ± 2590 e f g
138	9528 ± 903 f	10018 ± 533 f g	15392 ± 3466 e	17058 ± 5262 g
145	9487 ± 489 f	12538 ± 2689 g	12629 ± 878 e	15046 ± 2138 f g

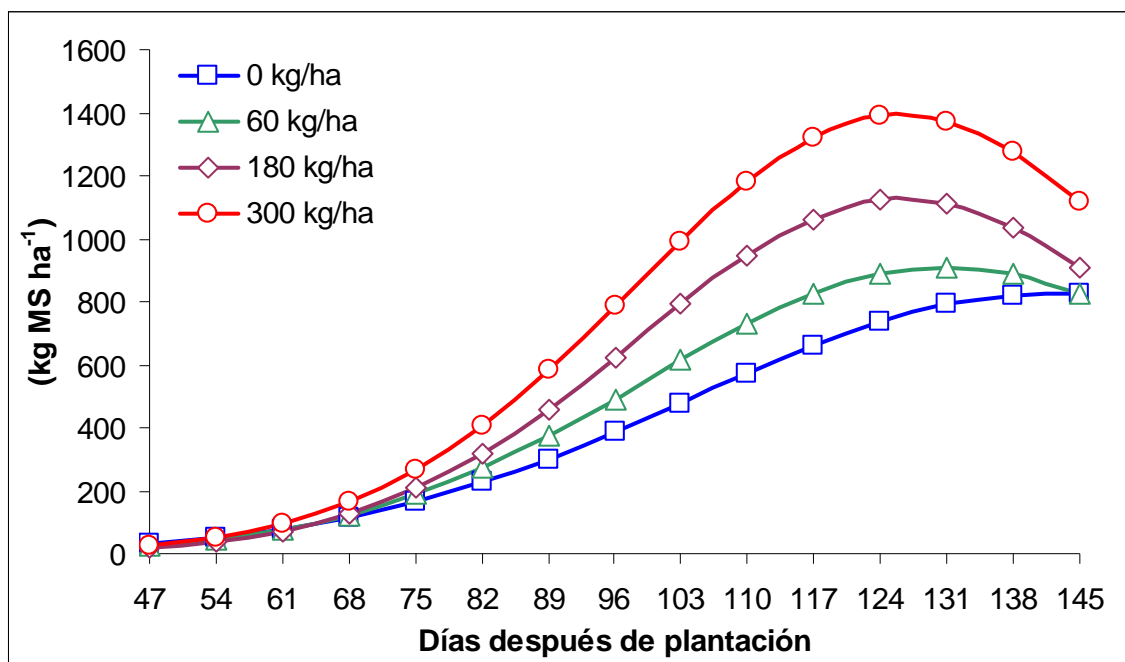
Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas (p<0,05; Tukey).

ANEXO 3 Variación en el tiempo de la absorción acumulada de fósforo total (kg P ha⁻¹) bajo distintas dosis de fertilización fosforada (kg P₂O₅ ha⁻¹).

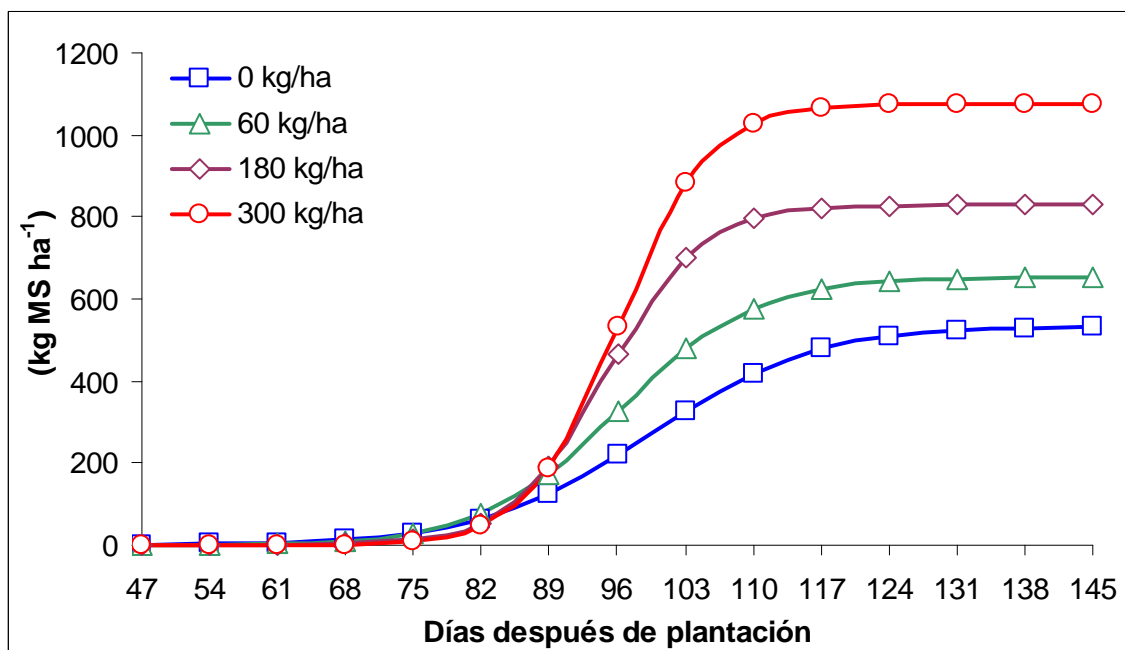
Días	Tratamientos (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)			
	0	60	180	300
47	0,286 ± 0,245 a	0,303 ± 0,287 a	0,255 ± 0,207 a	0,287 ± 0,226 a
54	0,252 ± 0,165 a	0,266 ± 0,187 a	0,421 ± 0,284 a	0,388 ± 0,248 a
61	0,519 ± 0,262 a	0,620 ± 0,363 a	0,714 ± 0,417 a	0,767 ± 0,537 a b
68	0,651 ± 0,416 a	0,842 ± 0,478 a	0,939 ± 0,625 a	1,205 ± 0,803 a b
75	0,987 ± 0,565 a	1,487 ± 1,204 a	1,369 ± 0,737 a	2,317 ± 1,258 a b
82	1,402 ± 0,818 a	1,868 ± 1,141 a b	2,311 ± 1,175 a b	3,047 ± 1,856 a b
89	2,438 ± 1,602 a	2,319 ± 1,287 a b	2,958 ± 1,545 a b	4,501 ± 2,354 a b c
96	4,155 ± 2,699 a b	5,619 ± 2,928 a b c	6,666 ± 4,007 a b	7,901 ± 4,796 a b c d
103	4,717 ± 2,864 a b c	5,954 ± 3,234 a b c	8,423 ± 4,360 a b	11,757 ± 6,411 a b c d
110	7,616 ± 4,733 a b c	9,635 ± 4,996 a b c d	14,896 ± 10,253 a b c	20,240 ± 10,646 b c d
117	7,509 ± 3,911 a b c	10,540 ± 6,345 a b c d	16,524 ± 9,348 a b c	16,442 ± 8,413 a b c d
124	8,484 ± 4,763 a b c	14,219 ± 8,256 c d	12,622 ± 7,527 a b c	19,708 ± 12,385 c d
131	12,788 ± 7,446 b c	14,182 ± 9,343 c d	21,848 ± 14,129 c	23,035 ± 14,278 d
138	14,297 ± 8,321 c	14,107 ± 8,021 b c d	23,565 ± 15,114 c	26,963 ± 13,100 d
145	12,911 ± 7,471 b c	16,831 ± 10,768 d	18,296 ± 10,793 b c	23,003 ± 12,560 d

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

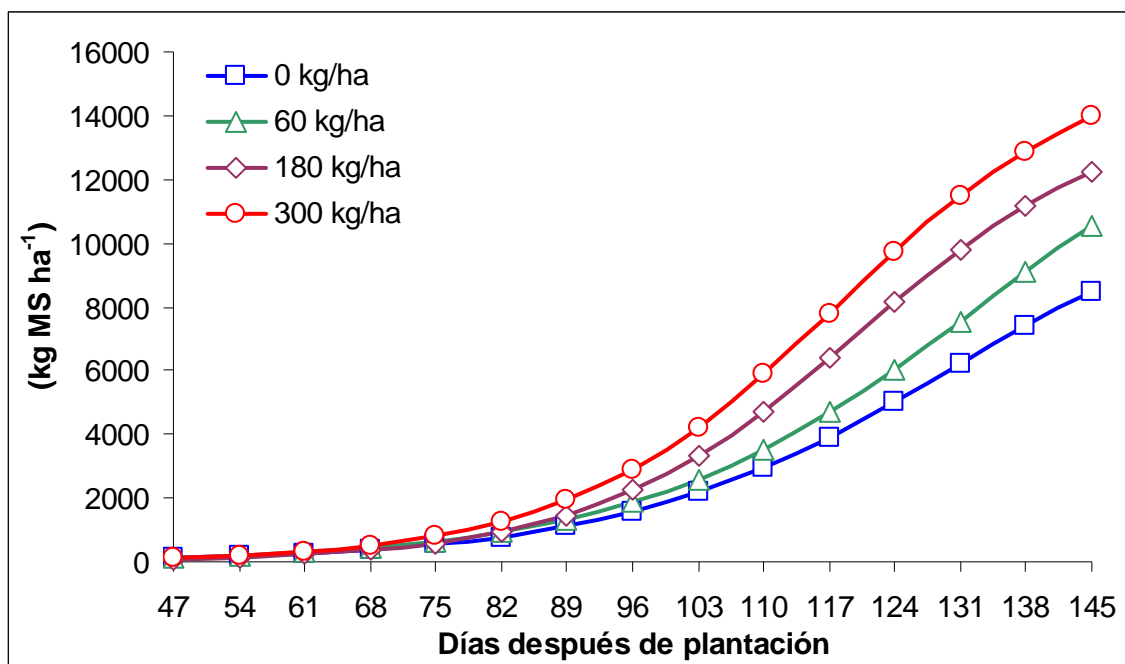
ANEXO 4 Ajuste de la producción de materia seca de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para distintas dosis de fertilización fosforada.



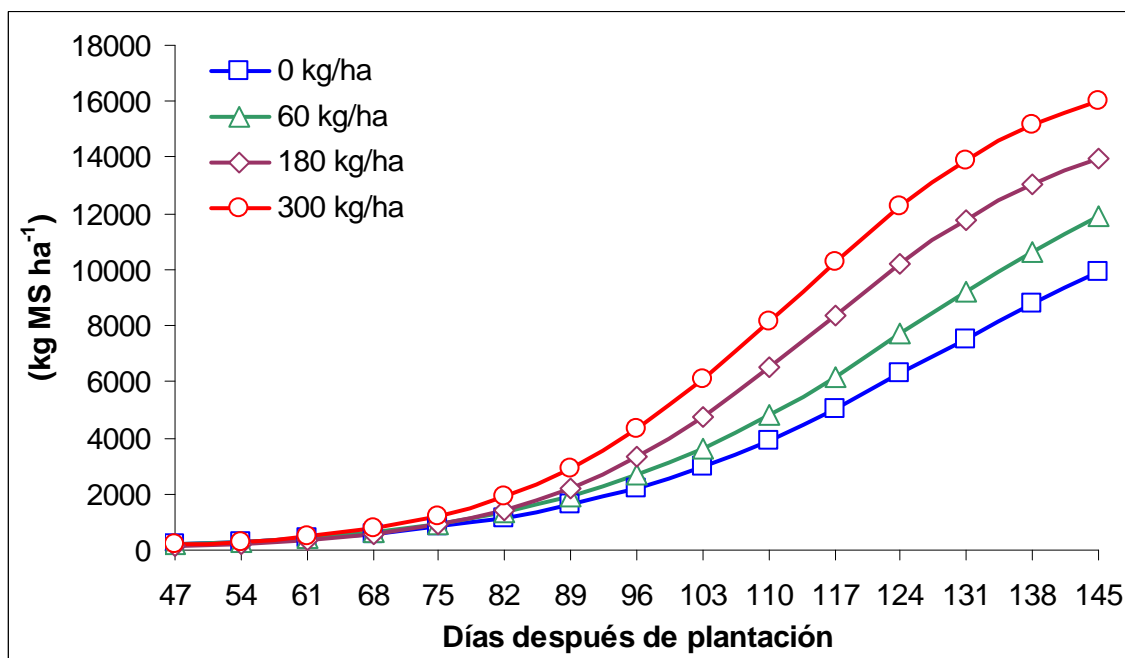
ANEXO 5 Ajuste de la producción de materia seca de los tallos a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada.



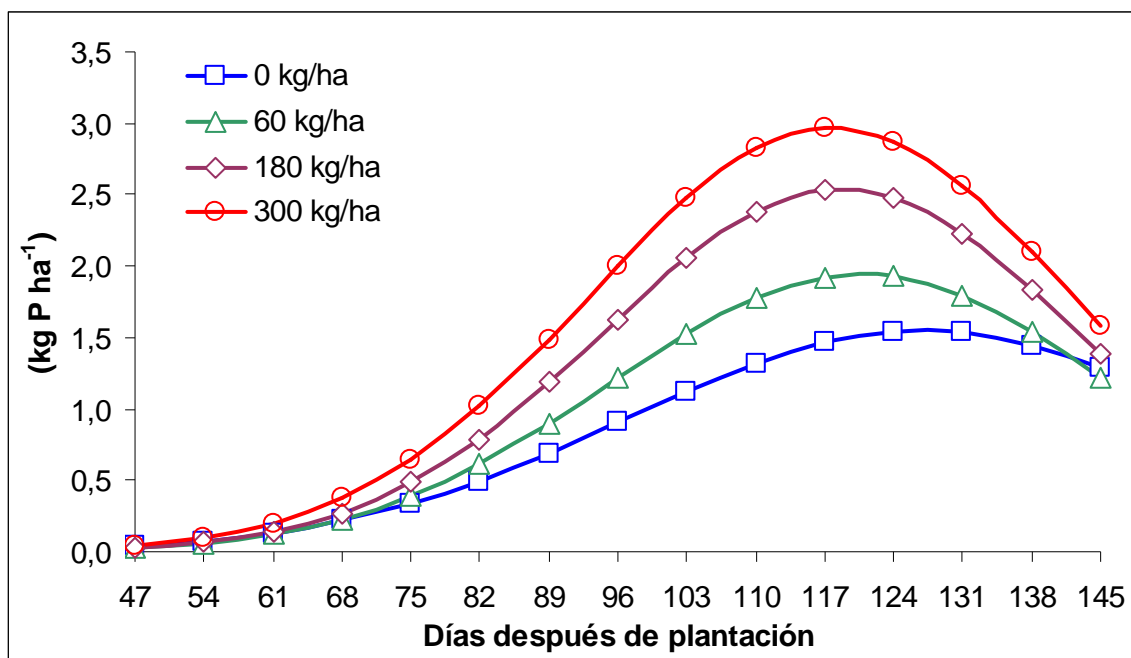
ANEXO 6 Ajuste de la producción de materia seca de los tubérculos a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada.



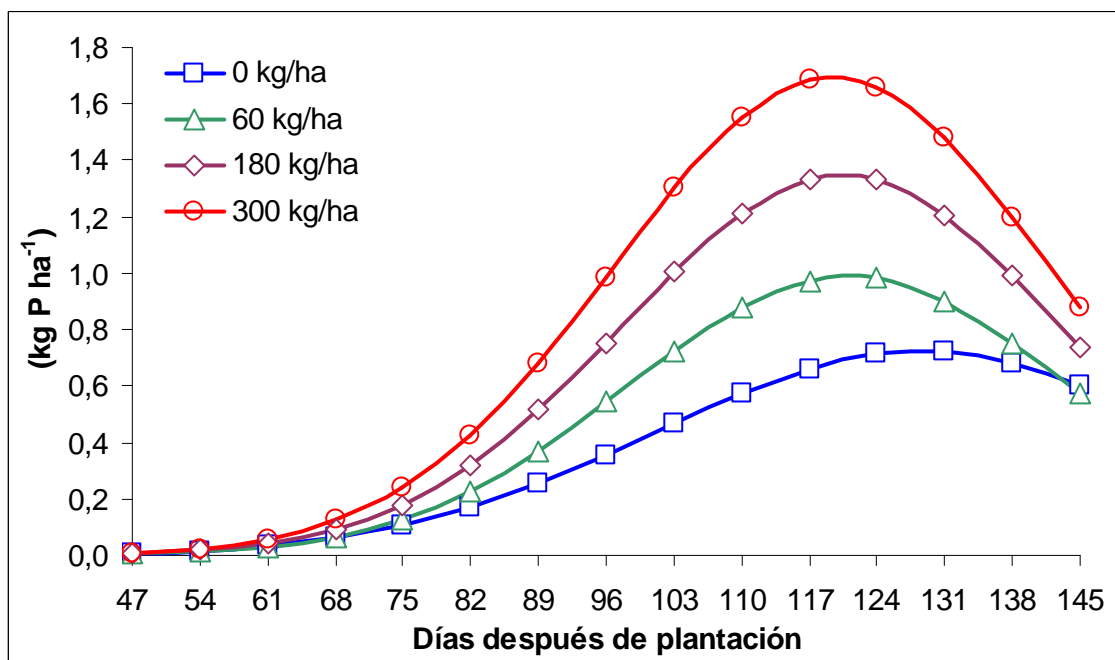
ANEXO 7 Ajuste de la producción de materia seca total a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada.



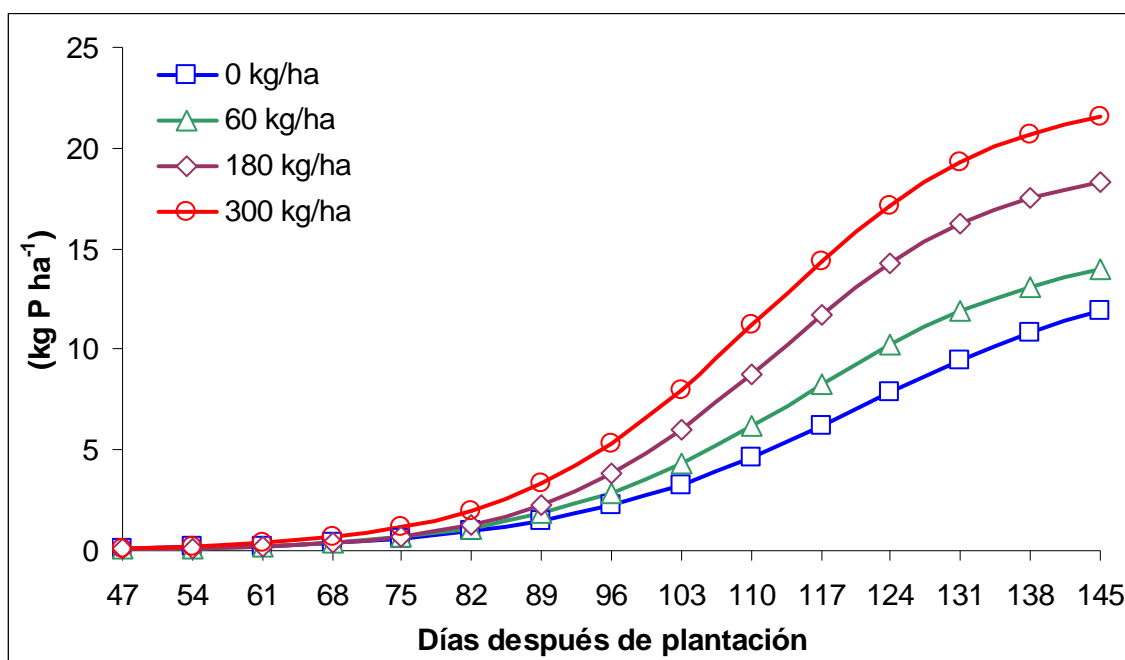
ANEXO 8 Ajuste de la absorción de P de las hojas a un modelo de distribución Gaussiana para distintas dosis de fertilización fosforada.



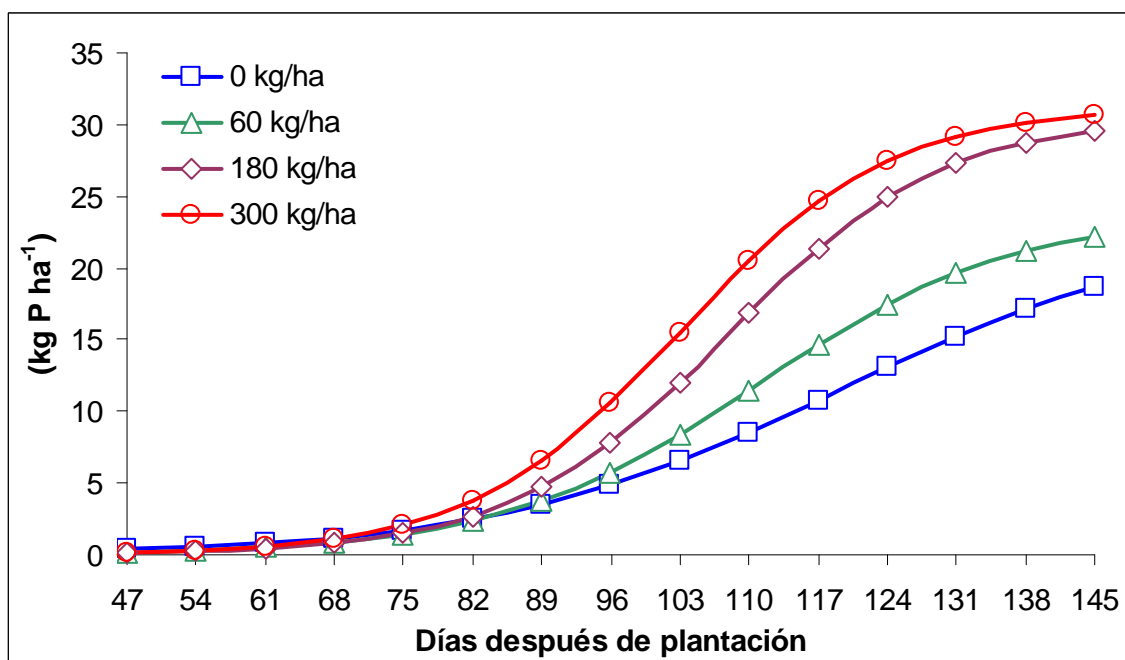
ANEXO 9 Ajuste de la absorción de P de los tallos a un modelo de distribución Gaussiana para distintas dosis de fertilización fosforada.



ANEXO 10 Ajuste de la absorción de P de los tubérculos a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada.



ANEXO 11 Ajuste de la absorción de P total a un modelo de distribución sigmoidea para distintas dosis de fertilización fosforada



ANEXO 12 Variación en el tiempo de los índices de cosecha del cultivo de papa para distintas dosis de fertilización fosforada.

	Días	IC %			
		Tratamientos (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)			
		0	60	180	300
IC	47	26,7 ± 8,9 a	13,9 ± 18,2 a	15,8 ± 8,9 a	10,2 ± 9,7 a
	54	24,6 ± 18,3 a	27,3 ± 14,3 a	36,4 ± 9,5 b	32,0 ± 9,1 b
	61	59,5 ± 12,1 b	53,3 ± 4,3 b	53,4 ± 2,6 c	58,7 ± 6,5 c
	68	64,5 ± 3,0 b c	68,5 ± 3,1 b c	63,3 ± 2,0 c d e	64,2 ± 4,3 c
	75	71,2 ± 4,6 b c	71,2 ± 3,4 b c	68,0 ± 4,6 d e	68,0 ± 2,7 c d
	82	69,2 ± 6,0 b c	73,3 ± 5,3 b c	71,9 ± 0,4 d e f g	74,0 ± 4,4 c d e f
	89	73,9 ± 2,1 b c	68,4 ± 7,3 b c	69,3 ± 3,5 d e f	70,2 ± 2,5 c d e
	96	75,5 ± 3,5 b c	67,8 ± 4,8 b c	62,4 ± 2,8 c d	69,8 ± 5,3 c d e
	103	71,2 ± 11,5 b c	69,1 ± 2,5 b c	68,7 ± 1,5 d e f	69,0 ± 2,0 c d
	110	70,9 ± 2,1 b c	73,3 ± 3,4 b c	74,1 ± 1,7 d e f g h	71,7 ± 6,7 c d e
	117	78,3 ± 3,1 b c	76,5 ± 0,8 c	76,2 ± 4,3 e f g h i	71,5 ± 0,8 c d e
	124	82,6 ± 4,2 c	81,2 ± 6,0 c	81,5 ± 2,3 f g h i	83,1 ± 6,3 d e f
	131	81,1 ± 2,8 b c	82,5 ± 1,5 c	83,1 ± 4,0 g h i	82,6 ± 2,6 d e f
	138	85,3 ± 0,8 c	85,9 ± 0,8 c	86,9 ± 2,6 h i	84,9 ± 3,2 e f
145	85,6 ± 2,3 c	88,2 ± 3,4 c	87,7 ± 3,8 i	87,6 ± 1,8 f	

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

ANEXO 13 Variación en el tiempo de los índices de extracción de fósforo del cultivo de papa para distintas dosis de fertilización fosforada.

Días	IEF %			
	Tratamientos (kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)			
	0	60	180	300
47	15,7 ± 4,1 a	12,1 ± 13,8 a	8,3 ± 3,8 a	6,4 ± 6,4 a
54	19,6 ± 14,1 a	19,7 ± 10,9 a	23,1 ± 5,9 b	18,9 ± 4,7 a
61	52,0 ± 12,3 b	47,6 ± 3,5 b	46,6 ± 3,9 c	49,2 ± 9,1 b
68	54,5 ± 3,5 b c	58,8 ± 4,1 b c	53,5 ± 1,5 c d	52,2 ± 5,7 b c
75	60,1 ± 5,9 b c d	59,7 ± 3,0 b c	55,6 ± 4,5 c d	55,8 ± 4,1 b c
82	56,3 ± 6,1 b c	58,3 ± 10,5 b c	58,6 ± 2,3 c d	63,2 ± 3,7 b c d
89	63,6 ± 3,9 b c d e	59,9 ± 7,2 b c	60,7 ± 5,1 d e	61,1 ± 3,0 b c d
96	66,1 ± 3,7 b c d e f	59,0 ± 4,6 b c	53,6 ± 7,1 c d	62,1 ± 6,1 b c d
103	67,1 ± 11,8 b c d e f	64,4 ± 4,8 b c d	63,0 ± 2,8 d e f	66,4 ± 1,9 c d
110	65,4 ± 3,3 b c d e f	69,3 ± 4,9 c d e	72,4 ± 3,1 e f g	72,4 ± 4,7 d e
117	73,9 ± 4,7 c d e f	72,3 ± 2,6 c d e f	74,7 ± 4,5 f g h	71,3 ± 2,5 d e
124	79,2 ± 3,4 d e f	79,0 ± 6,0 d e f	79,0 ± 3,8 g h i	82,0 ± 6,5 e f
131	81,1 ± 3,5 e f	82,1 ± 2,6 d e f	82,9 ± 3,5 g h i	84,4 ± 3,0 e f
138	83,9 ± 2,6 e f	84,6 ± 2,4 e f	86,9 ± 3,8 h i	85,1 ± 3,7 e f
145	85,0 ± 3,6 f	88,1 ± 3,1 f	88,5 ± 3,7 i	88,7 ± 1,7 f

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

ANEXO 14 Rendimiento y distribución de calibres de los tubérculos producidos bajo distintas dosis de fertilización fosforada en el cultivo de papa.

La determinación del rendimiento y de sus calibres se realizó al momento de cosecha (145 ddp) correspondiendo al promedio de 15 plantas por repetición expresados en una hectárea.

Dosis (Kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	Rendimiento de tubérculos (ton ha ⁻¹)	Distribución (%)		
		Consumo	Semilla	Desecho
0	37,8 ± 1,8 a	48,2 ± 8,3	39,0 ± 7,4	12,7 ± 1,4
60	41,9 ± 5,4 a	51,5 ± 11,7	39,6 ± 10,5	8,9 ± 1,3
180	46,1 ± 7,2 a	60,2 ± 7,7	31,5 ± 8,7	8,3 ± 1,3
300	49,2 ± 3,5 a	51,5 ± 6,0	37,4 ± 3,3	11,1 ± 3,3

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