



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA INSTITUTO DE HORTICULTURA

FACTORES FISIOLÓGICOS Y CULTURALES PARA PROMOVER LA TUBERIZACIÓN EN CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.)



TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

PRESENTA:

ROMÁN FLORES LÓPEZ



Diciembre del 2008

Chapingo, Estado de México

FACTORES FISIOLÓGICOS Y CULTURALES PARA PROMOVER LA TUBERIZACIÓN EN CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) TESIS REALIZADA POR EL MC. ROMÁN FLORES LÓPEZ BAJO LA DIRECCIÓN DEL COMITÉ ASESOR INDICADO, APROBADA POR EL MISMO Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



DR. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

ASESOR:



DR. J. ENRIQUE RODRÍGUEZ PÉREZ

ASESOR:



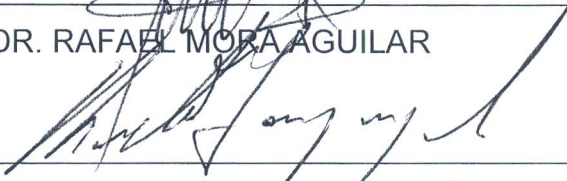
DRA. MARÍA TERESA COLINAS LEÓN

ASESOR:



DR. RAFAEL MORA AGUILAR

ASESOR:



DR. HECTOR LOZOYA SALDAÑA

LECTOR
EXTERNO:



DR. JUAN MARTÍNEZ SOLÍS

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Chapingo por las facilidades otorgadas para mi formación académica en el posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado durante mi formación académica.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y pecuarias por el apoyo durante mi desarrollo profesional.

A los académicos del Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo por los conocimientos compartidos.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo por la atinada dirección de la presente investigación.

Al Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez por su valiosa orientación, apoyo en el análisis estadístico y sugerencias al presente trabajo.

A la Dra. María Teresa Colinas León por el apoyo y orientación para la realización de esta investigación.

Al Dr. Rafael Mora Aguilar por su apoyo y sugerencias al presente trabajo.

Al Dr. Héctor Lozoya Saldaña por sus acertadas observaciones a esta investigación.

Al Dr. Juan Martínez Solís por las sugerencias y tiempo dedicado en la revisión del presente manuscrito.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado en la etapa de escritura de este documento.

Al Químico Cecilio Bautista Bañuelos por su apoyo durante el trabajo de laboratorio.

DATOS BIOGRAFICOS DEL AUTOR

ROMÁN FLORES LÓPEZ es originario de Uruapan, Michoacán, Nació el 18 de diciembre de 1960.

Realizó sus estudios de licenciatura en la escuela de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en la ciudad de Morelia, Michoacán. Realizó la tesis de licenciatura en el Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México y obtuvo el grado de Licenciado en Biología en 1984.

Estudió la Maestría en Ciencias en el Colegio de Postgraduados de 1988 a 1990, obteniendo el grado el 10 de diciembre de 1990.

Ingresó al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias en 1985, en donde actualmente se desempeña como investigador titular de tiempo completo, trabajando en el sistema producto papa.

FACTORES FISIOLÓGICOS Y CULTURALES PARA PROMOVER LA TUBERIZACIÓN EN CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE PAPA

(*Solanum tuberosum* L.)

PHYSIOLOGICAL AND CULTURAL FACTORS TO PROMOTE TUBERIZATION IN HIDROPONICS CULTURE OF POTATO

(*Solanum tuberosum* L.)

Román Flores López¹ y Felipe Sánchez del Castillo²

RESUMEN

La producción de tubérculo - semilla de papa en invernadero requiere del aprovechamiento óptimo de la superficie. La tuberización es influenciada por el genotipo, condiciones ambientales y sistema de producción. El propósito de esta investigación fue determinar el efecto de la radiación solar, densidad de población y retardadores del crecimiento. Se evaluaron 100, 70, 50 y 40 % de radiación solar; 45, 25, 16 y 8 plantas m⁻² y una aplicación de Paclobutrazol, Uniconazol o Cycocel. 50 % o más de sombra, incrementaron altura de planta y disminuyeron número de tubérculos, biomasa y los índices de eficiencia en estudio. 45 Plantas m⁻² dio el mayor rendimiento por unidad de superficie con 470 tubérculos y 1648 g m⁻² de biomasa de tubérculo. 150 ppm de Paclobutrazol ó 20 ppm de Uniconazol redujeron la altura del tallo y el índice de área foliar sin afectar el número y biomasa de tubérculos.

Palabras clave: Radiación solar, densidad, inhibidores del crecimiento.

¹ Tesista

² Director

ABSTRACT

Greenhouse tuber-seed production requires optimum usage of ground area. Tuberization is influenced by genotype, environmental conditions and production system. The aim of this research was to evaluate the effect of solar radiation, population density and growth inhibitors. 100, 70, 50 and 40 % of solar radiation, 45, 25, 16 and 8 plants m⁻² and one application of Paclobutrazol, Uniconazol or Cycocel, Shade of 50 % or higher increased plant height and reduced tuber number, biomass and growth efficiency indexes. 45 Plants m⁻² gave the highest yield with 470 minitubers m⁻² and 1648 g m⁻² of tuber biomass. Paclobutrazol at 150 ppm or Uniconazol at 20 ppm reduced plant height and Leaf area index without effect on number and tuber biomass.

Key words: Solar radiation, density, growth inhibitors.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
Objetivos	11
Hipótesis	11
REVISIÓN DE LITERATURA	12
Origen e Importancia.....	12
Radiación Solar y Crecimiento	14
Control Hormonal de la Tuberización.....	17
I. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA PRODUCCIÓN DE SEMILLA-TUBÉRCULO DE PAPA (<i>Solanum tuberosum</i> L) BAJO CULTIVO SIN SUELO	20
RESUMEN.....	20
SUMMARY	21
INTRODUCCIÓN.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
CONCLUSIONES	36

LITERATURA CITADA	37
II. DENSIDAD DE POBLACIÓN EN CULTIVO HIDROPÓNICO PARA LA PRODUCCIÓN DE TUBÉRCULO - SEMILLA DE PAPA (Solanum tuberosum L.)	40
RESUMEN	40
SUMMARY	41
INTRODUCCIÓN	42
MATERIALES Y MÉTODOS	44
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
CONCLUSIÓN	58
LITERATURA CITADA	58
III. EFECTO DE PACLOBUTRAZOL, UNICONAZOL Y CYCOCEL EN LA PRODUCCIÓN DE TUBÉRCULO-SEMILLA DE PAPA (Solanum tuberosum L.) EN CULTIVO HIDROPÓNICO	62
RESUMEN	62
SUMMARY	63
INTRODUCCIÓN	64

MATERIALES Y MÉTODOS.....	67
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
Caracteres Morfológicos.....	69
Rendimiento y Distribución de Biomasa	72
LITERATURA CITADA	78
DISCUSIÓN GENERAL	82
CONCLUSIONES GENERALES.....	86
LITERATURA CITADA.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Comparación de las variables morfológicas en cuatro niveles de radiación sobre papa (<i>Solanum. tuberosum</i> L.) var. Gigant.	29
Cuadro 1.2. Fotosíntesis neta ($\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$) en plantas de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) var. Gigant expuestas a cuatro niveles de radiación. $\bar{x}$ = media, CV= Coeficiente de variación.	30
Cuadro 1.3. Parámetros estimados del modelo logístico para describir el comportamiento de acumulación de biomasa de órganos de plantas de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) bajo cuatro niveles de radiación.	31
Cuadro 1.4. Comparación de medias de número y biomasa de tubérculos en papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) var. Gigant.	35

Cuadro 2.1.	Altura, Índice de área foliar y área foliar en cuatro densidades de siembra en papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) var. Gigant.	49
Cuadro 2.2.	Parámetros estimados del modelo logístico para describir el comportamiento de acumulación de biomasa de órganos de plantas de papa en cuatro densidades de plantación.	51
Cuadro 2.3.	Efecto de cuatro densidades de plantación sobre el número y peso seco de tubérculos, peso seco de estolones por planta, peso seco total, e índice de cosecha a los 75 DDE en papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) var. Gigant.	56
Cuadro 3.1.	Comparación de medias a los 15 y 45 DDA de caracteres morfológicos con cinco concentraciones de inhibidores del crecimiento en papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) en cultivo sin suelo.	70

Cuadro 3.2.	Comparación de medias a los 15 DDA de variables de rendimiento y distribución de biomasa de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) con cinco concentraciones de inhibidores del crecimiento en cultivo hidropónico.	73
Cuadro 3.3.	Comparación de medias a los 45 DDA de variables de rendimiento y distribución de biomasa de en papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) con cinco concentraciones de inhibidores del crecimiento en cultivo hidropónico.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1. Acumulación de biomasa (tubérculo (a), vástago (b) y total (c)) y tasa absoluta de crecimiento: tubérculo (d), vástago (e) y total (f) en papa (*Solanum tuberosum* L.) Var. Gigant. en cuatro niveles de radiación. **32**
- Figura 1.2. Tasa de asimilación neta (a) y tasa de asimilación económica neta (b) de papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Gigant en cuatro niveles de radiación en invernadero. **34**
- Figura 2.1. Tasa absoluta de crecimiento; vástago (a), total (b) y tubérculo (c); tasa de asimilación neta ((d), tasa económica de asimilación neta (e) y tasa de crecimiento del cultivo (f) en papa (*S. tuberosum* L.) Var. Gigant en cuatro densidades de siembra. **52**

INTRODUCCIÓN

La producción de tubérculos – semilla de papa (*Solanum tuberosum* L.) en invernadero es un sistema intensivo, que requiere el mayor aprovechamiento por unidad de superficie y tiempo, así como ausencia de plagas y enfermedades. Sin embargo, su rendimiento es variable dependiendo del origen de la plántula empleada (*in vitro* o minitubérculos), genotipo, densidad de población, condiciones ambientales y nutrición del cultivo (Wurr *et al.*, 1997); factores que afectan la tuberización.

Una hoja de papa se satura con $1200 \mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de densidad de flujo de fotones que es aproximadamente el 60 % de la radiación solar en un día claro; sin embargo, no todas las hojas de la planta se saturan con esta radiación, ya que para iluminar todas a ese nivel se requiere una radiación mucho mayor (Dwelle, 1985). La cantidad de la radiación interceptada por planta depende de la intensidad de la misma, superficie de área foliar, duración de área foliar, filotaxia y densidad de población. Se menciona que existe una relación lineal entre el índice de área foliar y la interceptación de la radiación, el IAF óptimo para un cultivo como la papa es del orden de 4, donde se capta más del 90 % de la radiación incidente (Gardner *et al.*, 1990), no obstante en invernadero, con el uso de altas densidades, este IAF se sobrepasa con frecuencia lo que provoca el mayor sombreo, que conduce a condiciones no favorables para la tuberización.

La concentración endógena de giberelinas antes de la tuberización es alta y decrece durante la misma (Carrera *et al.*, 1999). El empleo de agentes antagonistas de las giberelinas se ha usado ampliamente, observando que aplicaciones exógenas de inhibidores del crecimiento favorecen la tuberización (Vreugdenhil y Sergeeva, 1999; Rodríguez-Falcón *et al.*, 2006). Su uso en invernadero está enfocado, además, a obtener plantas de porte bajo que faciliten el manejo del cultivo.

Existen varios sistemas de producción de minitubérculos en invernadero, de los cuales el cultivo hidropónico aporta a la planta un ambiente subterráneo óptimo para su desarrollo y conlleva a mayor rendimiento por planta, precocidad del cultivo y sanidad de los tubérculos producidos (Rolot y Seutin, 1999). Sin embargo, las altas densidades de población empleadas provocan la elongación de las plantas dificultando con ello su conducción y el control de plagas y enfermedades.

El estudio científico de los factores fisiológicos y culturales que afectan la tuberización es importante; por ello en el presente trabajo se evaluaron niveles de radiación fotosintéticamente activa, densidades de población y la aplicación de inhibidores del crecimiento, buscando aplicaciones prácticas para el mejor manejo y conducción del cultivo encaminado a favorecer la producción de tubérculos en invernadero.

Se realizaron tres experimentos que se presentan en forma de artículos.

En el primero de ellos se determinó la influencia de la radiación solar sobre la producción de tubérculo-semilla de papa en cultivo en perlita, dado que el rendimiento depende de la tasa de crecimiento del tubérculo la cual es afectada por la radiación, cantidad de follaje, temperatura y partición de asimilados, en este trabajo se determinaron las tasas de crecimiento de la planta de papa: TAC, TAN y del tubérculo (TAEN), además del índice de cosecha y número de tubérculos con el propósito de determinar la influencia del nivel de radiación en condiciones de invernadero.

En el segundo artículo, con el apoyo de los indicadores fisiológicos (TAC, TAN, TAEN y TCC) del análisis de crecimiento, se determinó la densidad de población para la mayor producción de minitubérculos en cultivos sin suelo en invernadero, al considerar que es uno de los factores que pueden ser manipulados como lo indica Struik y Wiersema, (1999).

Al incrementar la densidad de población se tiene menor intercepción de radiación fotosintéticamente activa, debido al sombreado mutuo. Ocasionando, síntomas de etiolación que debilitan a las plantas, disminuyen su rendimiento y hacen más difícil su manejo. Por lo anterior, en el tercer artículo se describe la determinación del inhibidor del crecimiento y la dosis de aplicación más adecuada para generar plantas de papa de porte bajo y de menor área foliar, sin disminuir su rendimiento en número de tubérculos por planta.

Objetivos

Determinar y comparar la influencia de cuatro niveles de radiación, provocados por malla de sombra, sobre la tuberización en plantas de papa cultivadas en invernadero y en hidroponía, en términos de acumulación de biomasa y número de tubérculos para su uso como semilla en campo.

Evaluar la influencia de la densidad de población en cultivo hidropónico con perlita bajo invernadero sobre indicadores fisiológicos del crecimiento y el rendimiento de minitubérculos.

Determinar el inhibidor del crecimiento y la dosis de aplicación más adecuada para generar plantas de papa de porte bajo y de menor área foliar, sin disminuir su rendimiento en número de tubérculos por planta.

Hipótesis

A mayor intercepción de radiación fotosintéticamente activa por unidad de superficie foliar y unidad de tiempo mayor producción de asimilados en la fuente y mayor acumulación de biomasa en el tubérculo.

La disminución de crecimiento e índice de área foliar mediante la aplicación de inhibidores del crecimiento incrementará la partición de asimilados al tubérculo y facilitara el manejo del cultivo en invernadero.

REVISIÓN DE LITERATURA

En cada uno de los artículos presentados se hace referencia a citas bibliográficas vinculadas con la temática particular de los mismos. Aquí se presenta una revisión más general que sirve como complemento del marco teórico en que se desarrollo el presente trabajo.

Origen e Importancia

La papa (*Solanum tuberosum* L.) pertenece a la familia de las solanáceas, con dos subespecies; *Solanum tuberosum ssp andigenum* que se originó en el sur de Perú, en la cordillera de los Andes, en los límites con Bolivia a partir del complejo *Solanum brevicaule* y *Solanum tuberosum ssp tuberosum* que se originó en las tierras bajas del centro de Chile (Spooner *et al.*, 2005). La domesticación de plantas silvestres de papa se inició hace 7000 años y ya para el año 500 DC en tierras altas de la cuenca de Ayacucho se ha estimado que este cultivo tenía una productividad de 10 ton ha⁻¹.

Con la invasión española, la papa fue llevada a Europa, apareció por primera vez fuera de Sudamérica en 1567 y rápidamente se difundió en todo el mundo. La mayoría de los cultivares modernos Europeos tienen predominantemente germoplasma chileno debido al mejoramiento genético (Ames y Spooner, 2008).

Presenta amplia adaptación a diferentes zonas climatológicas, desde el trópico y subtrópico hasta zonas templadas; desde el nivel del mar hasta alturas superiores a los 3500 msnm. Así mismo su adaptación a diferentes condiciones socioeconómicas la han convertido en el cultivo no cereal más importante a nivel mundial, siendo uno de los principales cultivos básicos junto con el trigo (*Triticum aestivum* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) y maíz (*Zea mays* L.) (Struik y Wiersema, 1999).

La producción global de este tubérculo es de 320,711,961 ton, distribuidas de la siguiente manera: Europa 128,608,372; Norteamérica (Canadá y USA) 22,626,283; Latinoamérica 15,985,825; Asia y Oceanía 137,182,946 y África 16,308,530. En el 2007 la producción de los países en desarrollo superó a la producción de los países desarrollados con más de 9,000,000 ton (<http://faostat.fao.org>).

En México se cultivan anualmente 62,000 ha, con una producción total en el 2007 de 1, 530,000 ton (<http://faostat.fao.org>), de las cuales 300,000 ton son empleadas como semilla, el 26 % se destina a la industria y el resto a consumo en fresco, con 16.5 kg de consumo *per cápita*.

El rendimiento promedio es de 24,6 ton ha⁻¹. No obstante contar con regiones donde el rendimiento es superior a 40 ton ha⁻¹, en el Centro del País en condiciones de sierra-temporal el rendimiento es menor de 15 ton ha⁻¹. Esta variación se debe en gran medida a la calidad y disponibilidad de la semilla, pues sólo el 13 % de la superficie nacional (8,000 ha) es cultivada con semilla

certificada, el 87 % restante (54,000 ha) es sembrado con papas que no pasaron por un proceso de certificación de semillas (CONPAPA, 2007); así mismo, el rendimiento se ve afectado por el nivel tecnológico de producción, disposición de agua, plagas y enfermedades, disposición de nutrientes y agroquímicos para su protección.

Radiación Solar y Crecimiento

La luz visible es la porción de la radiación electromagnética que causa reacciones fotoquímicas en las plantas (fotosíntesis) y va de 350 a 730 nm, llamada también RFA (radiación fotosintéticamente activa), expresada en $\mu\text{moles m}^2 \text{s}^{-1}$ que mide la densidad de fotones incidente por unidad de área y tiempo. Mas del 90 % del peso seco de las plantas es originado por el carbón fijado vía fotosíntesis y la asimilación total del mismo por el dosel y su partición al órgano de interés pueden limitar la producción del cultivo (Dwelle, 1985).

Los factores que limitan la captación de la radiación por la planta y el dosel son: área foliar, duración de área foliar, densidad de población, índice de área foliar, coeficiente de extinción del dosel y cantidad de radiación disponible.

La materia seca total es el resultado de la asimilación neta de CO_2 durante el ciclo de cultivo. La conversión de energía luminosa a energía química se mide por la biomasa ganada por unidad de tiempo, para ello, el empleo de índices del análisis de crecimiento permiten determinar el comportamiento de la producción

de asimilados durante el desarrollo de los cultivos y la influencia de diversos factores en el crecimiento y desarrollo del cultivo (Mora, 1996).

El crecimiento es el incremento irreversible en número o dimensión de una célula, tejido, órgano, individuo o comunidad. El análisis cuantitativo del crecimiento permite explicar la relación de los diferentes órganos de la planta durante el ciclo de cultivo, para lo que es necesario observar el comportamiento de los índices de eficiencia fisiológica como: el índice de área foliar (IAF), tasa absoluta de crecimiento (TAC), Tasa de asimilación neta (TAN), Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) e índice de cosecha (IC). Para ello es necesario contar con la superficie foliar y con el peso seco del órgano o planta completa.

El índice de área foliar es el ratio del área foliar del dosel y del área de suelo ocupada por el mismo. $IAF = AF / As$ donde, AF es el área foliar del dosel de un solo lado de la lámina foliar y As es el área del suelo ocupada por la planta, generalmente se expresan en m^{-2} (Gardner *et al.*, 1990).

La tasa absoluta de crecimiento es el incremento de peso seco de una planta u órgano en gramos por día, es producto de la acumulación de biomasa por unidad de tiempo expresado en $g\ d^{-1}$, está en función de la cantidad de material inicial presente y de la tasa de crecimiento *per se*. Al graficarla en función del tiempo adopta una curva sigmoideal (Mora, 1996).

La tasa de asimilación neta es definida como la cantidad de materia seca producida por el dosel por unidad de área foliar y unidad de tiempo, y es una medida indirecta de la fotosíntesis (Charles-Edwards *et al.*, 1986)

$TAN = (1 / A) dw / dt$, en donde A es el total de área foliar de la planta y dw / dt es la tasa absoluta de crecimiento. La TAN es más alta cuando las plantas son pequeñas y todas las hojas están expuestas a la radiación directa, conforme crece la planta y se incrementa el índice de área foliar, mayor número de hojas es sombreado y disminuye la tasa de asimilación neta.

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se expresa en términos de aumento de peso por unidad de superficie de suelo y tiempo ($g\ m^2\ d^{-1}$), se origina del producto de la tasa de asimilación neta por el índice de área foliar. En ambiente óptimo la TCC es una función lineal de la cantidad de radiación solar interceptada (Mora, 1996).

El índice de cosecha (IC) es la proporción de la distribución de asimilados entre el órgano de interés económico y la biomasa total de la planta completa al final del ciclo de cultivo. Se puede usar para describir la respuesta de la fijación de carbono a cambios en el ambiente (Beadle, 1988).

Estos indicadores fisiológicos han sido empleados para entender el efecto de diversos factores bióticos y abióticos sobre el cultivo de la papa (McCollum, 1978; Mora *et al.*, 2006), en la evaluación de genotipos (Aguilar *et al.*, 2006), sobre el efecto de diferentes condiciones de humedad del suelo y determinación de la eficiencia de fósforo (McCollum, 1978).

Control Hormonal de la Tuberización

La tuberización es controlada por la interacción hormonal en el estolón (Lulai, 2004), las hormonas juegan un papel preponderante, regulando eventos morfológicos en el ápice de estos; como, división, alargamiento celular y orientación de los micro túbulos celulares (Vreugdenhil y Sergeeva, 1999). Las giberelinas son de gran importancia, ya que se ha observado que alta concentración endógena inhibe la tuberización, mientras que baja concentración de éstas la favorece, estando estrechamente relacionada a condiciones ambientales inductivas (baja temperatura nocturna y fotoperiodo corto) y no inductivas, respectivamente (Hannapel *et al.*, 2004).

Así mismo el ácido indolacético se presenta en baja concentración endógena justo antes del inicio de la tuberización y se incrementa conforme inicia (Stallknecht, 1985), mientras que la concentración de cinétinas se eleva en condiciones inductivas en comparación con plantas en condiciones no inductivas (Mauk y Langille, 1978). El ácido absícico presenta una concentración interna similar durante el desarrollo del estolón y del tubérculo, sin embargo, favorece la tuberización por su acción contraria a las giberelinas (Xu *et al.*, 1998).

Los inhibidores del crecimiento vegetal son compuestos sintéticos, usados para reducir la longitud del tallo de las plantas sin modificar el patrón de desarrollo o ser fitotóxicos. Lo que es debido a la detención de la elongación celular y a la disminución de la tasa de división celular (Radenmacher, 2000). Su efecto

sobre estructuras morfológicas de las plantas es antagonista a la acción de las giberelinas y auxinas que son las hormonas vegetales primarias responsables de la elongación del tallo. La influencia de los retardadores del crecimiento consiste principalmente en que inhiben el alargamiento de los entrenudos, aunque el número de éstos y el número de hojas, no cambian (Grochowska y Mejia-Muñoz, 2003).

El Cycocel (Clormequat 2-chloro-N,N,N-trimethylethanaminium), llamado también Cloruro de clorocolina, ha sido empleado para inducir la floración en perales a concentraciones de 2000 a 3000 ppm, y para prevenir el excesivo crecimiento de algunas plantas hortícolas, como jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.). En papa se ha empleado para reducir la altura de la planta e incrementar el número de tubérculos (Sharma *et al.*, 1998). Así como, para inducir la tuberización en cultivos *in vitro*; detener el crecimiento, y la senescencia de las plántulas (Jing *et al.*, 2004); se ha observado también que la inhibición transitoria que causa en la elongación del tallo es transitoria, lo que sugiere que puede ser degradado y se hacen necesarias aplicaciones adicionales (Harvey *et al.*, 1991).

El Paclobutrazol [(±)- (R',R') – beta - [(4-chlorophenyl) methyl] – alpha - (1,1 - dimethylethyl) -1H-1,2,4- triazole-1- etanol), es un retardador de segunda generación, derivado del triazol. Inhibidor de la biosíntesis de giberelinas, está involucrado en la reducción de ácido abscísico, etileno y ácido indolacético, mientras incrementa los niveles de citocíninas. Causa inhibición y debilitamiento

del crecimiento, y estimula el amarre de yemas florales en frutales. Es absorbido por hojas, tallos y raíces, y es transportado por el xilema. Induce resistencia en los manzanos (*Malus comunis* L.) contra los hongos *Podosphaera leucotricha* y *venturia inaequalis*. En papa, disminuye la altura de la planta, la tasa de crecimiento del cultivo y reduce la partición de asimilados a hojas, tallos, raíces y estolones, incrementándola hacia los tubérculos (Balamani *et al.*, 1985), aunque, también puede provocar la reducción de la biomasa de la planta completa (Tekalign *et al.*, 2005) e incluso del rendimiento de minitubérculos (Hughes *et al.*, 2003). En condiciones de alta temperatura el Paclobutrazol mejora la productividad de tubérculos y reduce el crecimiento del tallo (Tekalign *et al.*, 2005).

El Uniconazol [(betaE) – beta - [(4-chlorophenyl) methylene] – alpha - (1,1-dimethylethyl) - 1H - 1,2,4 – triazole – 1 - ethanol], es un derivado del triazol; es absorbido fuertemente por el suelo y su influencia puede durar hasta tres años. Es más usado en aplicaciones foliares, ya que su efecto pierde su efectividad en 10 a 14 días. No contrarresta aplicaciones exógenas de giberelinas. Se trasporta por xilema y es absorbido por raíz, tallo y hojas. Se emplea para reducir la altura de plantas ornamentales y favorecer la floración, como en *Rhododendron* y *Kalmia* (Gent, 1995). Así mismo, por su acción antagónica de las giberelinas se ha usado para estudiar la acción de estas en la germinación de semillas de *Arabidopsis* (Nambara *et al.*, 1991). En papa la aplicación de Uniconazol favorece el inicio de la tuberización (Fujino *et al.*, 1995).

I. INFLUENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA PRODUCCIÓN DE SEMILLA-TUBÉRCULO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L) BAJO CULTIVO SIN SUELO

RESUMEN

El propósito de la presente investigación fue determinar la influencia de cuatro niveles de radiación solar (100, 70, 50 y 40 %) en invernadero, controlada mediante el uso de mallas plásticas (30, 50 y 60 % de sombra y un testigo sin malla), sobre el rendimiento de papa variedad Gigant, cultivada con tubérculos de 15 a 17 mm en perlita. A los 75 días después de la emergencia (DDE) las plantas expuestas a 100 y 70 % de radiación tuvieron mayor número (25 a 35 %) y cantidad de biomasa de tubérculos (50 %), biomasa total, fotosíntesis neta, tasa absoluta de crecimiento, tasa de asimilación neta y tasa de asimilación económica. El índice de cosecha fluctuó entre 0.51 y 0.71 en las plantas cultivadas bajo 40 y 100 % de radiación, respectivamente. En términos generales, este comportamiento también se observó en muestreos a los 40, 50, 60 y 70 DDE. Es decir, a menor radiación disminuyó la eficiencia fotosintética de la planta, lo que repercutió directamente en la disminución de biomasa del vástago y tubérculo; así como en los índices de eficiencia medidos mediante análisis de crecimiento.

Palabras clave: Invernadero, sustrato, hidroponía.

SUMMARY

The aim of this research was to study the effect in tuber biomass accumulation in plants exposed to four-radiation levels (100, 70, 50 and 40 %) in greenhouse. These were provided by plastic mesh of 30, 50 and 60 % of shade, and a treatment without it. Tubers of 15 to 17 mm diameter of Giant variety were grown in perlite. At 75 days after emergence at 100 and 70 % of solar radiation plants had higher tuber number (25 a 35 %), total and tuber biomass (50 %), net photosynthesis, absolute growth rate, net assimilation rate an economic net rate than 50 and 40 % radiation. The harvest index was 0.71 at 100 % vs. 0.51 at 40 % radiation. This general behavior was observed in samples at 40, 50, 60 and 70 days after emergence. Lower radiation affects photosynthetic efficiency of potato plants, decreasing tuber and total biomass, as well as the parameters of growth analysis used.

Key words: Hydroponics, substrate, greenhouse.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en México está limitado por la poca disponibilidad de semilla certificada; sólo el 13 % (8,000 ha) de 62,000 ha cultivadas con este tubérculo se siembra con ésta (CONPAPA, 2007); a pesar de que existe la infraestructura necesaria de laboratorios e invernaderos para su producción. El proceso de producción de semilla certificada en México

incluye las fases de laboratorio (semilla prebásica I), invernadero (básica II) y cinco ciclos en campo (NOM-041-FITO-2002, Diario Oficial de la Federación, 2003).

En la producción de tubérculo-semilla de papa en invernadero se emplean diversas cubiertas plásticas que difieren en la transmisión de radiación: desde 50 hasta 85 % de la radiación total incidente, situación que repercute en rendimientos variables por planta, por lo que es necesario determinar el nivel de radiación óptimo para la producción de minitubérculos, hacer más eficiente este sistema de producción e incrementar la disponibilidad de semilla básica.

El proceso de tuberización en papa es influenciado por varios factores: como el balance hormonal (Struick y Wiersema, 1999), concentración interna de ácido giberelico (Vreugdenhil y Sergeeva, 1999), fotoperiodo (Martínez-García *et al.*, 2002), radiación (Jackson, 1999), concentración de CO₂ (Lawson *et al.*, 2002), nutrición mineral (Struik y Wiersema, 1999), temperatura (Thornton *et al.*, 1996) y del genotipo (Struik y Wiersema, 1999).

Más del 80 % del peso seco de una planta se origina del carbono fijado por la fotosíntesis; sin embargo, no se puede asegurar que a mayor intercepción de radiación solar, mayor sea la producción del órgano de interés debido a que la hoja de papa se satura a 1200 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ (Dwelle, 1985). La radiación necesaria para saturar las hojas de una planta completa en un dosel debe ser más alta, por lo que, tanto el tipo de cubierta, como la densidad de plantación son importantes en el rendimiento del cultivo bajo invernadero. En cultivo *in*

vitro, Niu *et al.* (1996) mostraron que al incrementar la irradiancia aumentó la masa seca. En condiciones controladas, bajo sombra, decreció sustancialmente el número de células del tubérculo, tanto al inicio de la tuberización como en la etapa de llenado, lo que afectó el rendimiento de la planta (Chen y Setter, 2003).

El empleo de indicadores fisiológicos, como la tasa absoluta de crecimiento (TAC), tasa relativa de crecimiento (TRC), tasa de asimilación neta (TAN), razón de área foliar (RAF), índice de área foliar (IAF) e índice de cosecha, han sido empleados para entender el efecto de diversos factores bióticos y abióticos sobre el cultivo de la papa (McCollum, 1978; Mora *et al.*, 2006), en la evaluación de genotipos (Aguilar *et al.*, 2006), sobre el efecto de diferentes condiciones de humedad del suelo y determinación de la eficiencia de fósforo (McCollum, 1978).

Por otro lado, el cultivo hidropónico, ofrece como principal ventaja la disposición continua de nutrientes a la planta y se emplean diversos sustratos como: turba, fibra de coco, perlita, mezclas físicas de turba o fibra de coco con perlita (Struik y Wiersema, 1999; Ritter *et al.*, 2001).

El propósito de la presente investigación fue determinar la influencia de cuatro niveles de radiación, provocados por malla de sombra, sobre la tuberización en plantas de papa cultivadas en invernadero y en hidroponía, en términos de acumulación de biomasa y número de tubérculos para su uso como semilla en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en Chapingo, Estado de México, de mayo a agosto de 2006 en un invernadero de vidrio; las condiciones ambientales dentro del invernadero fueron: humedad relativa media 62 %, máxima 88 % y mínima 36 %; temperatura media diaria 21 °C, mínima nocturna 10 °C y máxima diurna 35 °C, la cual fue tomada cada media hora con dos registradores de datos Hanna modelo HI141001. La radiación incidente al interior del invernadero varió a lo largo del día, de acuerdo con la época del año, la hora del día y el grado de nubosidad presente, registrándose una lectura máxima de hasta 2000 $\mu\text{moles m}^2 \text{s}^{-1}$ en la condición de 100 % de radiación.

Se empleó la variedad Gigant, liberada en Holanda en 1987, precoz (80 a 90 días), piel blanca, ojos superficiales, pulpa crema, forma oblonga-aplanada, susceptible al tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans* Mont. De Bary). Actualmente se cultiva en México y es una de las principales variedades para consumo en fresco (Rubio *et al.*, 2000). Los minitubérculos utilizados fueron de 15 a 17 mm de diámetro, libres de enfermedades de virus, hongos y bacterias, provenientes de plántulas *in vitro*, desarrolladas en invernadero con certificación para la producción de semilla-tubérculo de papa.

Los tratamientos aplicados consistieron en cuatro niveles de radiación incidente: 100, 70, 50 y 40 %, proporcionados mediante el uso de mallas plásticas de color negro con diferente densidad de filamentos, estos porcentajes de sombra fueron determinados con mediciones hechas por debajo y por encima de cada

una de las mallas, con un ceptómetro lineal (PAR Sunfleck, Decagon Devices). Al nivel de 100 % no se aplicó sombra y se consideró como testigo. El experimento se realizó en condiciones hidropónicas en bolsa de polietileno bicolor (negro por dentro y blanco por fuera) con 25 litros de perlita grado hortícola (1 a 4 mm de diámetro); cada bolsa se sembró con un minitubérculo a 12 cm de profundidad. La unidad experimental consistió de 11 macetas con separación de 50 cm entre ellas, lo que correspondió a una densidad de 4 plantas m^{-2} útil. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Las plantas se condujeron a un tallo y la solución nutritiva empleada tuvo la siguiente concentración de nutrimentos en mg Litro^{-1} : N 160, P 80, K 250, Ca 250, Mg 75, Fe 4, Mn 0.5, Cu 0.5, Zn 0.5, B 0.5, con pH de 6.0 y conductividad eléctrica final de 2.0 dS m^{-1} . El gasto diario de la solución nutritiva suministrada mediante riego por goteo fue en promedio de 500 ml planta^{-1} distribuida en cuatro riegos (9:30, 12:30, 14:30 y 16:30 h).

Se hicieron aplicaciones preventivas con Mancozeb a razón de 2 g Litro^{-1} y Clorotalonil $1.5 \text{ ml Litro}^{-1}$ para el control de *Phytophthora infestans*, así mismo, se alternaron aplicaciones de Metamidofos, Endosulfan y Ometoato una vez por semana, para el control de mosquita blanca (*Bemisia tabaci* Genn.).

Se hicieron muestreos destructivos de cuatro plantas por tratamiento (una por repetición) a los 30, 40, 50, 60, y 75 días después de la emergencia, la planta se separó en sus diferentes órganos y se contaron número de tubérculos mayores de 10 mm, altura de la planta (cm) y área foliar (cm^2); esta última

medida con un integrador LI-COR, modelo LI-3100. El peso seco de estolones (g), tubérculos (g), raíz (g), hojas y tallos (g), se obtuvo al secar en estufa a 70 °C durante 72 a 96 h de acuerdo con el tipo de órgano.

En la quinta hoja a partir del ápice, que se encontraba totalmente expandida se midió la fotosíntesis neta en cuatro ocasiones a los 40, 50 60 y 70 DDE con un analizador de gases de infrarrojo marca LI-COR, modelo LI-6250

El análisis de crecimiento se realizó con los datos de masa seca de tubérculo, vástago y planta completa, los cuales fueron ajustados mediante regresión no

lineal, con el modelo logístico: $y = \frac{A}{1 + Be^{-Cx}}$ donde: y es la variable respuesta;

x la variable independiente; A la asíntota, valor de y cuando x tiende a infinito; B el parámetro relacionado con la ordenada al origen; C el valor de x para el punto de inflexión, velocidad de crecimiento; e= 2.718281828. Se calculó la tasa absoluta de crecimiento (TAC), que corresponde a la primera derivada del

modelo logístico: $TAC = \frac{ABCe^{-Cx}}{(1 + Be^{-Cx})^2}$ (Rodríguez *et al.*, 2006), y que se define

como la ganancia en gramos de materia seca por día. En este caso del vástago, tubérculos y de la planta completa.

La tasa de asimilación neta (TAN) que representa la cantidad de biomasa acumulada por unidad de área foliar y unidad de tiempo ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$), se calculó de acuerdo con la fórmula siguiente:

$TAN = \frac{TAC}{af}$ donde: TAC fue la tasa absoluta de crecimiento; af el área foliar.

La tasa de asimilación económica neta (TAEN) representa la cantidad de biomasa del órgano de interés por unidad de área foliar y unidad de tiempo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Es análoga a la TAN, sólo que se toma en cuenta el peso seco de tubérculo (McCollum, 1978). El índice de cosecha (IC) se obtuvo al dividir la biomasa de los tubérculos entre la biomasa total acumulada por la planta hasta el momento de la cosecha.

Se efectuó la prueba de correlación de Pearson, el análisis de varianza correspondiente al diseño experimental empleado y las pruebas de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) en cada variable en estudio en cada muestreo. Se utilizó el programa Statistical Analysis System (SAS) versión ocho.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La altura de las plantas desde los 50 DDE (días después de la emergencia) fue significativamente mayor en los tratamientos donde disminuyó la radiación incidente (Cuadro 1.1). A los 75 DDE las plantas del tratamiento testigo sin sombra tuvieron, en promedio, 90.5 cm menos altura que plantas sometidas a 60 % de reducción de la radiación incidente, esto pudo deberse a que la baja intensidad de luz provocó la elongación del tallo por el alargamiento de las células, posiblemente por mayor acumulación de auxinas (Gardner *et al.*,

1990), aunque también se han demostrado incrementos en los niveles de giberelinas en hojas bajo sombra (Woolley y Waering, 1972).

El área foliar por planta fue igual en todos los tratamientos de luz ($\alpha = 0.05$) a los 50 y 60 DDE, pero a los 75 DDE aumentó significativamente en plantas cultivadas bajo 40 % de radiación, con respecto a los demás tratamientos que fueron estadísticamente iguales. Los tratamientos de 70 y 50 % de radiación alcanzaron área foliar intermedia entre el testigo y 40%. El incremento del área foliar con menor disposición de radiación posiblemente es debido a que las plantas de papa en esas condiciones requieren superar las deficiencias en fotosíntesis y destinan mayor proporción de los carbohidratos que producen hacia la formación de hojas (Gawronska *et al.*, 1990).

El crecimiento de la raíz tuvo fuerte influencia de la radiación, ya que la acumulación de masa seca de este órgano en plantas con 100 y 70 % de radiación fue superior ($\alpha = 0.05$) al mostrado con 50 y 40 % a los 75 DDE (Cuadro 1.1). El mayor crecimiento de la raíz favoreció a la planta al explorar más área del sustrato y tener mayor disponibilidad de nutrientes, lo que también pudo influir en el rendimiento biológico y económico de las plantas.

En el Cuadro 1.2 se presenta la fotosíntesis neta, medida en los diferentes muestreos. Las plantas expuestas a menor radiación tuvieron tasas fotosintéticas de 30 a 50 % de las que alcanzaron las plantas expuestas a 100 y

Cuadro 1.1. Comparación de las variables morfológicas en cuatro niveles de radiación sobre papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Gigant.

Radiación (%)	Días después de la emergencia		
	50	60	75
Altura de planta (cm)			
100	61.25 d ^z	80.75 b	94.50 c
70	97.25 b	105.75 a	131.25 b
50	111.00 a	127.75 a	169.00 a
40	84.12 c	106.25 a	185.00 a
$\bar{x}$	88.40	105.40	144.93
CV (%)	5.60	10.74	7.86
DMSH	10.93	24.92	25.10
Área foliar (cm ²)			
100	5358.00 a	6786.00 a	6618.00 b
70	4677.00 a	6105.00 a	8475.00 a b
50	4775.00 a	9437.00 a	8399.00 a b
40	4853.00 a	10038.00 a	11527.00 a
$\bar{x}$	4916.29	8091.69	8754.60
CV (%)	17.28	22.66	21.50
DMSH	1875.00	4048.00	4156.00
Peso seco de raíz (g)			
100	6.30 a	7.53 a	7.43 a
70	5.23 a b	3.50 b	5.30 a b
50	4.20 a b	3.63 b	3.27 b
40	3.03 b	4.14 b	3.34 b
$\bar{x}$	4.19	4.70	4.83
CV (%)	24.89	14.71	27.43
DMSH	2.30	1.52	2.93

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). CV: coeficiente de variación; DMSH = diferencia mínima significativa honesta.

70 % de radiación; sin embargo, sólo se detectaron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en los muestreos de los 50, 60 y 70 DDE.

Contrario a lo que indica Dwelle, (1985), la fotosíntesis neta de la hoja no se incrementó durante el llenado de tubérculos. Las plantas del tratamiento de 40 % de radiación presentaron una disminución significativa de la tasa de fotosíntesis neta entre 50 a 70 DDE con respecto al testigo. También se observa que a los 70 DDE bajó la fotosíntesis neta en las plantas de todos los tratamientos, posiblemente debido a la senescencia general de las hojas.

Cuadro 1.2. Fotosíntesis neta ($\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$) en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Gigant expuestas a cuatro niveles de radiación. $\bar{x}$ = media, CV= coeficiente de variación.

Radiación (%)	Días después de la emergencia			
	40	50	60	70
100	59.90 a ⁴	57.25 a	57.96 a	45.93 a
70	58.45 a	46.80 b	38.93 b	33.94 a b
50	44.30 a	33.96 c	35.43 b	32.17 a b
40	46.67 a	28.69 c	35.04 b	31.38 b
$\bar{x}$	52.34	41.77	41.84	35.86
CV (%)	16.34	11.44	16.35	17.87
DMSH	19.49	10.55	15.10	14.15

⁴Valores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). CV: coeficiente de variación; DMSH = Diferencia mínima significativa honesta.

Los valores de acumulación de masa seca de tubérculo, vástago y total fueron linearizados mediante el modelo logístico, los parámetros A, B y C (Cuadro 1.3)

fueron empleados para el cálculo de los parámetros del análisis de crecimiento, TAC, TAN y TAEN, que se discuten a continuación.

La Figura 1.1 presenta la acumulación de biomasa y tasas absolutas de crecimiento (TAC) de vástago, tubérculos y de la planta completa. En el caso de tubérculos la TAC se incrementó gradualmente de los 40 a los 60 DDE y de manera exponencial de los 60 hasta los 75 DDE en condiciones de 100 y 70 % de radiación, con valores de 6.98 y 10.01 g d⁻¹, respectivamente, a los 75 DDE, en contraste con plantas de los tratamientos de 50 y 40 % con valores de 2.2 y 2.1 g d⁻¹, respectivamente, siendo de tres veces a cinco mayor.

Cuadro 1.3. Parámetros estimados del modelo logístico para describir el comportamiento de acumulación de biomasa de órganos de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo cuatro niveles de radiación.

Radiación (%)	Estructura	A	B	C
100	Tubérculo	1719202.95	1327778.40	-0.05998
	Vástago	49.03	9192.19	-0.19733
	Planta total	195.81	496.59	-0.10883
70	Tubérculo	252334.88	1566286.47	-0.08755
	Vástago	39.43	424.36	-0.12331
	Planta total	147.29	639.43	-0.10669
50	Tubérculo	88.24	9598.93	-0.13780
	Vástago	36.86	10702.41	-0.20347
	Planta total	131.16	4967.88	-0.15469
40	Tubérculo	53.38	2159585.59	-0.22140
	Vástago	60.44	1846.22	-0.14327
	Planta total	135.49	1194.22	-0.11747

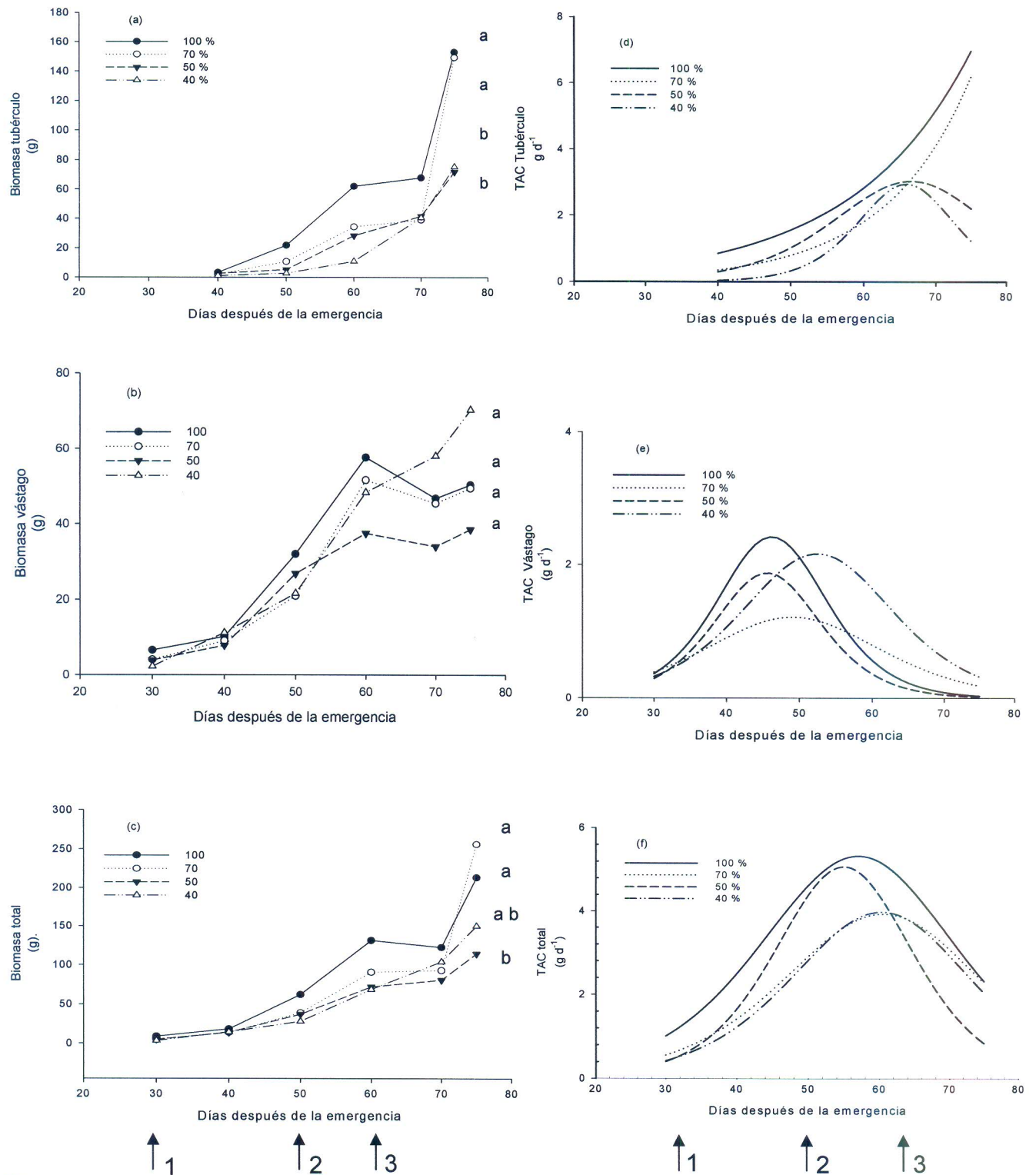


Figura 1.1. Acumulación de biomasa (tubérculo (a), vástago (b) y total (c)) y Tasa absoluta de crecimiento: tubérculo (d), vástago (e) y total (f) en papa (*Solanum tuberosum* L.) Var. Gigant. en cuatro niveles de radiación. Las flechas indican: 1. Formación de tubérculos, 2. Llenado de tubérculos, 3. Maduración de tubérculos.

Sin embargo, la TAC de la planta completa (Figura 1.1 f) indica que entre los 60 y 75 DDE la ganancia de masa seca por día fue menor que la ganancia en tubérculos, lo que sugiere, que la mayor acumulación de biomasa después de los 70 días se debe a la remobilización de carbohidratos de otras estructuras de la planta (hojas, tallo) hacia los tubérculos, lo que ocasiona la senescencia precoz del follaje (Mora *et al.*, 2006).

Lo anterior puede confirmarse al observar el comportamiento de la acumulación de masa seca (Figura 1.1 a) donde se tiene un incremento sobresaliente de los 70 a los 75 DDE en tubérculos. Así mismo, se aprecia que el comportamiento de acumulación de materia seca total está determinado por la acumulación de ésta en tubérculos.

Las plantas de los tratamientos de 50 y 40 % de radiación tuvieron un comportamiento similar con menor acumulación de biomasa durante todo el ciclo de cultivo. Lo anterior se explica al observar que hay menor fotosíntesis neta en plantas con tratamientos en menor radiación (Cuadro 1.2), lo que condujo a menor acumulación de biomasa causado por la menor intercepción de radiación (Gawronska *et al.*, 1990).

En la Figura 1.2 d, se presenta la tasa de asimilación neta, las plantas en 100 % de radiación mostraron valores altos durante todo el ciclo que a menor radiación, con la TAN superior a los 50 a 55 DDE de 10.05 y 6.49 g m⁻² d⁻¹ para el testigo y 70 % de radiación, respectivamente y de 8.30 y 5.64 g m⁻² d⁻¹ para 50 y 40 %, lo que sugiere mayor eficiencia fotosintética por unidad de superficie

foliar a mayor radiación, en comparación con plantas expuestas a menor radiación, no obstante que tuvieron una área foliar igual o mayor (Cuadro 1.1). A 40 % de radiación las plantas produjeron 55 % menos de materia seca por unidad de superficie foliar por día a los 50 DDE y un 48 al 50 % menos a los 60 y 75 DDE que el testigo. También se aprecia que la TAN después de los 40 días disminuyó en todos los tratamientos debido posiblemente al autosombreo de las hojas al aumentar el follaje.

La tasa de asimilación económica neta fue mayor en el testigo que los tratamientos de sombra (Figura 1.2 b), lo que indica que la planta destina mayor cantidad de asimilados al tubérculo en condiciones de alta radiación por unidad de área foliar y tiempo.

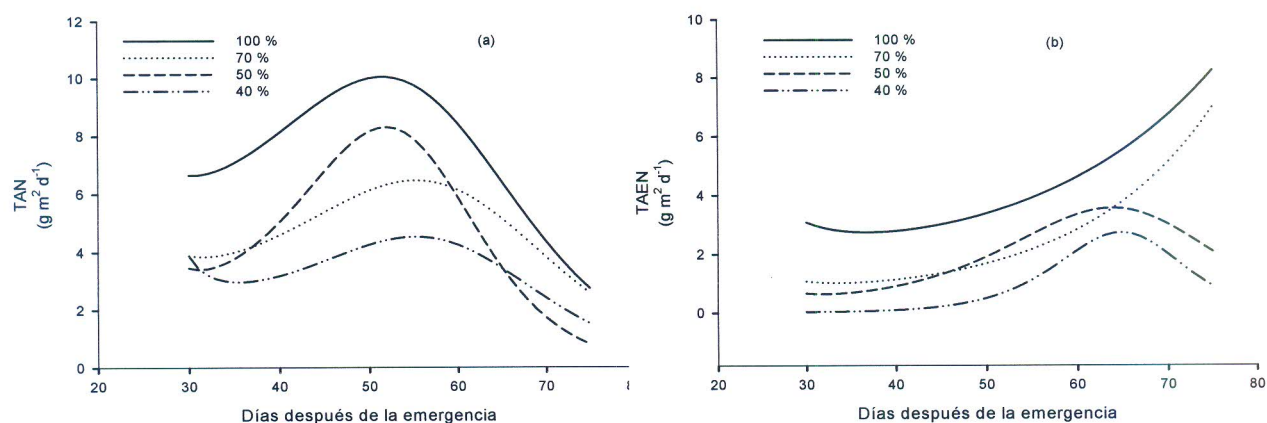


Figura 1.2. Tasa de asimilación neta (a) y tasa de asimilación económica neta (b) de papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Gigant en cuatro niveles de radiación en invernadero.

Al usar este parámetro junto con la TAN se puede aseverar que en condiciones de alta radiación no solo se produce mayor biomasa total sino también hay

Cuadro 1.4. Comparación de medias de número y biomasa de tubérculos en papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Gigant.

Variable	Radiación (%)	Días después de la emergencia		
		50	60	75
Número de tubérculos	100	15.50 a ^z	27.75 a	29.50 a b
	70	12.75 a b	22.25 b	44.25 a
	50	8.75 b	20.75 b	22.25 b
	40	12.00 a b	15.00 c	19.00 b
	CV (%)	18.15	5.17	24.29
	DMSH	4.90	2.44	15.4
	$\bar{x}$	12.25	21.43	28.7
Biomasa de tubérculos (g)	100	21.75 a	61.88 a	153.70 a
	70	10.71 b	34.25 a b	149.40 a
	50	5.26 c	28.25 b	71.63 b
	40	2.72 d	10.91 b	75.17 b
	CV (%)	10.11	37.79	42.16
	DMSH	1.96	28.21	17.00
	$\bar{x}$	8.81	35.82	112.34
Índice de cosecha	100			0.71 a
	70			0.58 b
	50			0.62 a b
	40			0.51 b
	CV (%)			0.12
	DMSH			9.10
	$\bar{x}$			0.66

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). CV: coeficiente de variación; DMSH = Diferencia mínima significativa honesta.

mayor partición de asimilados al tubérculo, por lo que la TAEN puede ser usada como un coeficiente de partición (McCollum, 1978).

Se obtuvo mayor rendimiento en peso seco de tubérculos en la condición de 100 % de radiación (Cuadro 1.4). Similarmente el número de tubérculos a los 75 DDE fue mayor ($\alpha = 0.05$) en los tratamientos que recibieron más radiación con ausencia de diferencia estadística entre los tratamientos de 100 y 70 % de radiación en relación al rendimiento y número de tubérculos, lo que sugiere que en localidades con radiación solar similar a la de Chapingo, México, aún con 30 % de sombra es posible producir minitubérculos de papa sin disminución significativa en el rendimiento. Es decir, las plantas sometidas a mayor radiación destinaron mayor cantidad y proporción de asimilados al llenado de tubérculos con un índice de cosecha a los 75 días de 0.71 contra 0.51 en el tratamiento de 40 % de radiación, donde no solo hay una reducción en la biomasa total de la planta, sino también en el índice de cosecha (Cuadro 1.4), lo anterior coincide con lo mencionado por Gawronska *et al.* (1990) que plantas de papa en alta intensidad de luz invierten del 60 al 74 % de la biomasa total hacia los tubérculos.

CONCLUSIONES

En las condiciones en las que se realizó el estudio se puede concluir que reducir la radiación solar incidente en el invernadero hasta un 30 % no

repercute en una disminución significativa de biomasa total y en la partición de asimilados al órgano de interés, lo que ocurre si la tasa de sombra es superior del 50 %.

LITERATURA CITADA

AGUILAR, L.M.G.; CARRILLO, S.A.J.; RIVERA, P. A.; GONZÁLEZ, H.A.V. 2006. Análisis de crecimiento y de relaciones fuente-demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). Revista Fitotecnia Mexicana 29: 145-156.

CHEN, C.T.; SETTER, T.L. 2003. Response of potato tuber cell division and growth to shade and elevated CO₂. Annals of Botany 91: 373-381.

DWELLE, B.R. 1985. Photosynthesis and photoassimilate partitioning. pp 35-58. in: Li, H.P. (ed), Potato Physiology. Ed. Academic Press, USA.

GARDNER, P.F.; PEARCE, B.R.; MITCHEL, L.R. 1990. Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press: AMES. USA.

GAWRONSKA, H.; DWELLE, B.R.; PAVEK, J.J. 1990. Partitioning of photoassimilates by potato plants (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by irradiance: II. Partitioning patterns by four clones grown under high and low irradiation. American Potato Journal 67: 163-176.

JACKSON, D.S. 1999. Multiple signaling pathways control tuber induction in potato. Plant Physiology 119: 1-8.

- LAWSON, T.; CRAIGON, J.; BLACK, R.C.; COLLS, J.J.; LANDON, G.; WEYERS, B. D. 2002. Impact of elevated CO₂ and O₃ on gas exchange parameters and epidermal characteristics in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Experimental Botany* 53: 737-746.
- MARTÍNEZ-GARCÍA, F.J.; GARCÍA-MARTÍNEZ, L.J.; BOU, J.; PRAT, S. 2002. The interaction of gibberellins and photoperiod in the control of potato tuberization. *J. Plant Growth Regulation* 20: 377-386.
- MCCOLLUM, E.R. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. II. Time by P-status interactions for growth and leaf efficiency. *Agronomy Journal* 70: 58-67.
- MORA, A.R.; ORTIZ, C.J.; RIVERA, P.A.; MENDOZA, C.C.A.; COLINAS, L.M.T.; LOZOYA, S.H. 2006. Índices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12: 85-94.
- NIU, G.; KOZAI, T.; MIKAMI, H. 1996. Simulation of the effects of photoperiod and light intensity on the growth of potato plantlets cultured photoautotrophically *in vitro*. *Acta Horticulturae* 440: 622-627.
- RITTER, E.; ANGULO, B.; RIGA, P.; HERRÁN, C.; RELLOSO, J.; JOSE, S.M. 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research* 44: 127-135.

RODRÍGUEZ, P.J.E.; SAHAGÚN, C.R.; GASGA, P.; MORA, A.R. 2006. Programas de cómputo para la estimación de parámetros de regresión no lineal útiles en el análisis de crecimiento de cultivos. 52^{da} Reunión anual de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical. Sep. 24-30. San Juan, Puerto Rico.

RUBIO, C.O.A.; RANGEL, G.J.; FLORES, L.R.; MAGALLANES, G.J.V.; DÍAZ, H.C.; ZAVALA, Q.T.; RIVERA, P.A.; CADENA, H.M.; ROCHA, R.R.; ORTÍZ, T.C.; LÓPEZ, D.H.; DÍAZ, V.M.; PAREDES, T.A. 2000. Manual para la Producción de Papa en las Sierras y Valles Altos del Centro de México. SAGAR.INIFAP.CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Libro Técnico No. 1. Zinacantepec, Estado de México. 79 p.

STRUİK, C.P.; WIERSEMA, G.S. 1999. Seed Potato Technology. Ed. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands 383 p.

THORNTON, K.M.; MALIK, J.N.; DWELLE, B.R. 1996. Relationship between leaf gas exchange characteristics and productivity of potato clones grown at different temperatures. American Potato Journal 73: 63-77.

VREUGDENHIL, D.; SERGEEVA, I. L. 1999. Gibberellins and tuberization in potato. Potato Research 42: 471-481.

WOOLEY D. J.; WAEREING, P.F. 1972. Environmental effects on endogenous cytokinins and gibberellin levels in *Solanum tuberosum*. New Phytology 71: 1015-1025.

II. DENSIDAD DE POBLACIÓN EN CULTIVO HIDROPÓNICO PARA LA PRODUCCIÓN DE TUBÉRCULO - SEMILLA DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.)

RESUMEN

El propósito de la presente investigación fue determinar la influencia de la densidad de siembra (45, 25, 16 y 8 plantas m^{-2}), sobre la producción de minitubérculos mayores de 10 mm de diámetro e indicadores fisiológicos del crecimiento en condiciones de invernadero e hidroponía en la variedad Gigant.

En plantas crecidas a mayor densidad de población (45 plantas m^{-2}) el índice de área foliar fue de 13.45 a los 75 días después de la emergencia (DDE) y la altura de la planta se incrementó 45 % con respecto a la menor densidad (8 plantas m^{-2}). La biomasa total (67.56 g), número de tubérculos (16.5) y biomasa de tubérculos (52.56 g) con 8 plantas m^{-2} fueron significativamente mayores a los 75 DDE, en comparación con plantas de la mayor densidad, con 44.58 g, 10.25 y 36.86 g, respectivamente.

La tasa absoluta de crecimiento (TAC) de la planta completa varió de 0.44 a 1.70 g d^{-1} dependiendo de la densidad y de la etapa de desarrollo del cultivo, mientras la TAC de tubérculo a la menor densidad fue 45 a 59 % superior respecto al tratamiento de 45 plantas m^{-2} , la eficiencia fotosintética y la partición de carbohidratos al tubérculo, medidos como tasa de asimilación neta (TAN) y

tasa de asimilación económica neta (TAEN), fueron 118 a 160 % mayores en la densidad de 8 plantas m^{-2} con respecto a 45 plantas m^{-2} , sin embargo, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) a la menor densidad representó el 12 % del valor del tratamiento de mayor densidad ($64.44 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) a los 75 DDE, lo que se reflejó, en esta última, en el número y biomasa de tubérculos, con 470 unidades y 1658 g m^{-2} de materia seca de tubérculo.

Palabras clave: minitubérculos, invernadero, hidroponía.

SUMMARY

The aim of this work was to study the influence of population density (45, 25, 16 y 8 plants m^{-2}) on the potato production minitubers up to 10 mm of diameter and physiological growth indicators in glasshouse and hydroponics crops, with Gigant potato variety. Under high population density the potato plant height was 45 % higher than plants grown under less density at 75 after emergency days and the leaf area index reached 13.45. At eight plants m^{-2} the total plant biomass (67.56 g), tuber number (16.5) and tuber biomass (52.56 g) were higher than data obtained at 45 plants m^{-2} with 44.58 g, 10.25 y 36.86 g, respectively. The absolute growth rate (AGR) by plant varied from 0.44 to 0.75 g d^{-1} depending on the density and the crop stage growth, meanwhile the absolute tuber grow rate (TGR) on the treatment with less density was 45 to 59 % higher than the TGR of plants growing at 45 plants m^{-2} . The photosynthetic efficiency

and assimilates partition, estimated as net assimilation rate (NAR) and economic assimilation rate (EAR) with 8 plants m^{-2} , were 118 to 160 % greater than the NAR and EAR with 45 plants m^{-2} , although, the crop grow rate (CGR) with 8 plants m^{-2} represented only the 12 % of $64.44 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ gained with 45 plants m^{-2} at 75 DAE. This was manifested too in tuber number and its dry weight (470 units and 1658 g m^{-2}).

Key words: minitubers, hydroponic cultures, greenhouse.

INTRODUCCIÓN

La producción en invernadero de semilla básica de papa (*Solanum tuberosum* L.) se realiza con el propósito de obtener semilla libre de enfermedades para su uso en campo, por lo cual se requieren tubérculos mayores de 10 mm de diámetro que aseguren la emergencia y mayor cantidad de tallos por metro lineal para lograr el establecimiento adecuado del cultivo.

El proceso de tuberización es influenciado por factores ambientales e intrínsecos; entre los que destacan el genotipo, la concentración interna de AG_3 , fotoperíodo, temperatura y radiación interceptada por la planta. Algunos de los factores que pueden ser manipulados para incrementar la producción de minitubérculos en invernadero son: momento de inicio de fertilización, solución nutritiva y su composición, densidad de plantación, arreglo espacial de las

plantas y diámetro mínimo de los tubérculos a ser cosechados (Struik y Wiersema, 1999).

El número de tubérculos producidos por planta decrece gradualmente al aumentar la densidad de plantación (Rubio *et al.*, 2000), lo que conduce a bajas tasas de multiplicación, por lo que el número de tubérculos producidos varía de dos a diez, en función de la técnica de producción empleada (Ranally, 1997). La densidad óptima de plantación depende de la variedad, del número deseado de minitubérculos y de los costos de producción, entre los que destacan el costo del material inicial; minitubérculos o plantas *in vitro*, espacio de invernadero y labores culturales (Struik y Wiersema, 1999).

En cultivos hidropónicos con el uso de esferas de arcilla expandida Rolot *et al.* (1999) produjeron más de 400 tubérculos m^{-2} , tanto con 59 como con 200 plantas m^{-2} . Por otro lado, en aeroponía 60 plantas m^{-2} produjeron 802 tubérculos m^{-2} , el doble de los obtenidos con 100 plantas m^{-2} (Farran, 2006). En sustratos como tierra de monte, mezclas en diferentes proporciones de fibra de coco:perlita y turba:perlita y fertilización de N, P y K granulado se recomiendan densidades de población en invernadero de entre 44 y 100 plantas m^{-2} (Rubio *et al.*, 2000).

Existe escasa información disponible referente a la influencia de la densidad de población en la producción de minitubérculos en condiciones de cultivo hidropónico; conocimiento requerido en sistemas de producción donde no hay restricción de nutrientes y el ambiente subterráneo se puede controlar a favor

del desarrollo de la planta. Estudios de acumulación de materia seca (Mora *et al.*, 2005) y el uso de indicadores fisiológicos permiten describir cuantitativamente el crecimiento mediante muestreos periódicos de biomasa de la planta completa, sus partes, y del área foliar; han mostrado su eficacia para entender la influencia de factores intrínsecos y extrínsecos involucrados en la producción de papa (Basu, 1999); así, se han hecho estudios sobre: evaluación de genotipos (Aguilar *et al.*, 2006; Mora *et al.*, 2006), humedad del suelo (Jefferies y Mackerron, 1989) y determinación de la eficiencia de nutrientes (McCollum, 1978).

El propósito de la presente investigación fue estudiar la influencia de la densidad de población en cultivo hidropónico con perlita bajo invernadero sobre indicadores fisiológicos del crecimiento y el rendimiento de minitubérculos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en Chapingo, Estado de México, de mayo a agosto de 2006 en un invernadero de cristal con las siguientes condiciones ambientales: humedad relativa máxima de 88 %, mínima de 36 % y media de 62 %; temperatura media de 21° C y una mínima nocturna de 7° C, la radiación varió a lo largo del día de acuerdo con las condiciones ambientales, con una lectura máxima de 2000 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Se empleó la variedad Gigant, liberada en Holanda en 1987, actualmente cultivada en México, de ciclo precoz (80 a 90 días), piel blanca, ojos superficiales, pulpa crema, forma oblonga-aplanada, susceptible al tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary) y con calidad para consumo sin procesar (Rubio *et al.*, 2000). Los minitubérculos utilizados fueron de 15 a 17 mm de diámetro, libres de enfermedades de virus, hongos y bacterias.

El experimento se realizó en condiciones hidropónicas en macetas de plástico negro con volumen de un litro rellenas con perlita grado hortícola como sustrato. En cada maceta se depositó un minitubérculo a 10 cm de profundidad y las plantas se condujeron a un solo tallo. La solución nutritiva empleada tuvo la siguiente concentración de nutrimentos, en mg Litro⁻¹: N =160, P = 80, K = 250, Ca = 250, Mg = 75, Fe =4, Mn = 0.5, Cu = 0.5, Zn = 0.5, B = 0.5, con pH de 6.0 y conductividad eléctrica final de 2.0 dS m⁻¹. El gasto diario de la solución nutritiva suministrada mediante riego por goteo fue de 500 ml por planta, dosificada en cuatro riegos (9:30, 12:30, 14:30 y 16:30 h). A lo largo del ciclo se hicieron aplicaciones preventivas con Mancozeb a razón de 2 g Litro⁻¹ y Clorotalonil 1.5 ml Litro⁻¹ para el control de tizón tardío de la papa; asimismo, se alternaron aplicaciones de Metamidofos, Endosulfan y Ometoato una vez por semana, para el control de mosquita blanca (*Bemisia tabaci* Genn.).

Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar, los tratamientos aplicados consistieron en cuatro densidades de siembra: 45, 25, 16 y 8 plantas

m⁻² con cuatro repeticiones, la unidad experimental consistió de 25 macetas por tratamiento.

Se hicieron muestreos destructivos a los 30, 40, 50, 60, 70 y 75 días después de la emergencia, para ello se tomaron ocho plantas por tratamiento, dos plantas por bloque. Los caracteres evaluados fueron: Altura de la planta (cm), peso seco de estolones (g), peso seco de tubérculos (g), peso seco de vástago (g), peso seco de la planta completa (g), número de tubérculos y área foliar (cm²) medida con un integrador LI-COR, modelo LI-3100. El peso seco de los distintos órganos se obtuvo al secar en estufa a 70 °C durante 72 h y los tubérculos se seccionaron y se secaron por 96 h.

El análisis de crecimiento de las plantas se realizó con los datos de materia seca de tubérculo, vástago y planta completa en los muestreos realizados, los datos fueron ajustados mediante regresión no lineal, con el modelo logístico:

$$y = \frac{A}{1 + Be^{-Cx}}, \text{ donde: } y \text{ fue la variable respuesta; } x = \text{la variable independiente;}$$

A = la asintota, valor de y cuando x tiende a infinito; B fue el parámetro relacionado con la ordenada al origen; C el valor de x para el punto de inflexión; e (base de los logaritmos neperianos) = 2.718281828.

Se calculó la tasa absoluta de crecimiento (TAC), que corresponde a la primera derivada del modelo logístico (Rodríguez *et al.*, 2006).

$$TAC = \frac{ABCe^{-Cx}}{(1 + Be^{-Cx})^2}$$

Esta se define como la ganancia en gramos de materia seca por día (g d^{-1}), en este caso del vástago, tubérculos y de la planta completa.

La tasa de asimilación neta (TAN) que representa la cantidad de biomasa acumulada por unidad de área foliar y unidad de tiempo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), se calculó de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\text{TAN} = \frac{\text{TAC}}{\text{af}}$$

Donde: TAC es la tasa absoluta de crecimiento de la planta; af = área foliar.

La tasa de asimilación económica neta (TAEN) representa la cantidad de biomasa del órgano de interés por unidad de área foliar y unidad de tiempo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Es análoga a la TAN, sólo que se toma en cuenta el peso seco de tubérculo (McCollum, 1978).

$$\text{TAEN} = \frac{\text{TCT}}{\text{af}}$$

Donde TCT = tasa absoluta de crecimiento de tubérculo.

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se expresa en términos de peso por unidad de superficie y tiempo, se obtuvo al multiplicar el IAF por la TAN.

$$\text{TCC} = \text{IAF TAN}$$

Donde, IAF = índice de área foliar; TAN = tasa de asimilación neta.

El cálculo del índice de área foliar (IAF) se hizo al dividir el área foliar total de la planta entre la superficie de suelo ocupada por la misma, considerando los

pasillos. El índice de cosecha (IC) se obtuvo dividiendo la biomasa de los tubérculos entre la biomasa total acumulada por la planta hasta el momento de la cosecha.

Se realizó el análisis de varianza respectivo y la prueba de Tukey de comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al incrementar la densidad de población, aumentó la altura de la planta (Cuadro 2.1), con diferencia ($\alpha = 0.05$) entre tratamientos desde los 30 DDE y hasta los 75 DDE. Plantas del tratamiento de menor densidad (8 plantas m^{-2}) disminuyeron 31 % su altura en comparación con plantas del tratamiento de 45 plantas m^{-2} ; lo anterior fue ocasionado posiblemente por la interacción hormonal, ya que en condiciones de sombra el ácido indolacético se incrementa y actúa sinérgicamente con las giberelinas, lo que provoca elongación celular (Gardner *et al.*, 1990). En hojas de plantas expuestas a sombreado, Woolley y Waering (1972) detectaron alta concentración de giberelinas, y se ha comprobado alta concentración endógena de éstas en tallos en condiciones no favorables para la tuberización (Menzel, 1985; Vreugdenhil y Sergeeva, 1999).

Cuadro 2.1. Altura de planta, Índice de área foliar y área foliar en cuatro densidades de siembra en papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Gigant.

Densidad (plantas m ⁻²)	Días después de la emergencia		
	30	50	75
Altura de planta (cm)			
45	65.00 a ^z	121.10 a	136.31 a
25	50.50 b	95.00 b	123.25 a
16	42.75 b	90.00 b	141.50 a
8	40.00 b	70.00 b	93.70 b
DMSH	11.35	19.29	21.08
CV (%)	10.37	9.70	7.72
$\bar{x}$	49.56	95.25	123.71
Índice de área foliar			
45	7.48 a	11.20 a	13.45 a
25	3.46 b	7.06 b	8.50 b
16	1.97 c	3.39 c	5.37 c
8	0.90 d	1.49 c	2.78 c
DMSH	0.70	2.07	2.75
CV (%)	9.21	16.20	16.58
$\bar{x}$	3.44	5.78	7.52
Área foliar (cm ²)			
45	1669 a	2520 a b	3026 a
25	1386 a b	2826 a	3401 a
16	1237 b	2119 a b	3357 a
8	1106 b	1828 b	3407 a
DMSH	406.96	804	1187
CV (%)	13.65	15.67	16.31
$\bar{x}$	1349.90	2323.78	3298.34

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey (P = 0.05); DMS = Diferencia mínima significativa honesta; CV = Coeficiente de variación; $\bar{x}$ = media general de tratamientos.

A los 30 DDE el área foliar por planta fue mayor significativamente en el tratamiento de mayor densidad (45 plantas m^{-2}) en comparación con los tratamientos de 16 y 8 plantas m^{-2} . El IAF fue superior ($\alpha = 0.05$) en el dosel de con la mayor densidad con 7.48 a los 30 DDE (Cuadro 2.1), en comparación con el resto de los tratamientos, diferencia que se mantuvo durante todo el ciclo de cultivo. El incremento del índice de área foliar maximiza la interceptación de radiación en el dosel en los primeros días, hasta alcanzar índices de área foliar donde hay sombreado entre las plantas, de tal manera que un IAF de 4.0 intercepta aproximadamente 95 % de la radiación incidente (Boyd *et al.*, 2002).

Para la determinación de la eficiencia fotosintética de las plantas a través del análisis de crecimiento, los valores de acumulación de materia seca de tubérculo, vástago y total fueron linearizados mediante el modelo logístico; los parámetros A, B y C (Cuadro 2.2) se emplearon para calcular los indicadores fisiológicos de crecimiento: TAC, TAN, TAEN y TCC discutidos a continuación.

La tasa absoluta de crecimiento del vástago (Figura 2.1 a) desde los 30 a los 50 DDE descendió en el vástago en las plantas de mayor densidad, mientras que en el resto de los tratamientos se incrementó ligeramente, manteniendo este comportamiento hasta los 75 DDE, en donde los máximos valores correspondieron a la densidad de 16 plantas m^{-2} (0.67 g d^{-1}) y el menor se obtuvo con 45 plantas m^{-2} (0.06 g d^{-1}). Lo anterior indica que las plantas crecidas bajo 45 plantas m^{-2} compiten más e interceptan menos radiación, por lo que la planta crece en longitud del tallo pero con poca acumulación de

Cuadro 2.2. Parámetros estimados del modelo logístico para describir el comportamiento de acumulación de biomasa de órganos de plantas de papa en cuatro densidades de plantación.

Plantas m ⁻²	Estructura	A	B	C
8	Tubérculo	57.8277	529.624	-0.11539
	Vástago	29.6822	8.56077	-0.032369
	Planta total	88.7556	70.091	-0.07708
16	Tubérculo	38.8368	92.3966	-0.085483
	Vástago	758045.35	209970.59	-0.026109
	Planta total	109.665	29.9621	-0.050237
25	Tubérculo	37.3745	147.546	-0.095037
	Vástago	68.5691	19.2495	-0.029209
	Planta total	79.8667	30.53	-0.058731
45	Tubérculo	88.7124	104.122	-0.05525
	Vástago	19.2024	5.38475	-0.060278
	Planta total	2014579.15	267476.82	-0.026461

materia seca. En los cuatro tratamientos la TAC de tubérculo se incrementó hasta los 50 DDE, donde las plantas crecidas a menor densidad presentaron un crecimiento exponencial de tubérculo por día con máxima acumulación de materia seca de los tubérculos de 1.66 g d⁻¹, también las plantas de los tratamientos de 16 y 25 plantas m⁻² tuvieron su máxima acumulación de materia seca a los 50 DDE, con valores de 0.82 y 0.88 g d⁻¹ de máxima ganancia, respectivamente, lo que representa el 50 % respecto al tratamiento de 8 plantas m⁻². En contraste el tratamiento de 45 plantas m⁻² presentó su máxima tasa de acumulación de materia seca en tubérculo a los 75 DDE, lo que indica que el

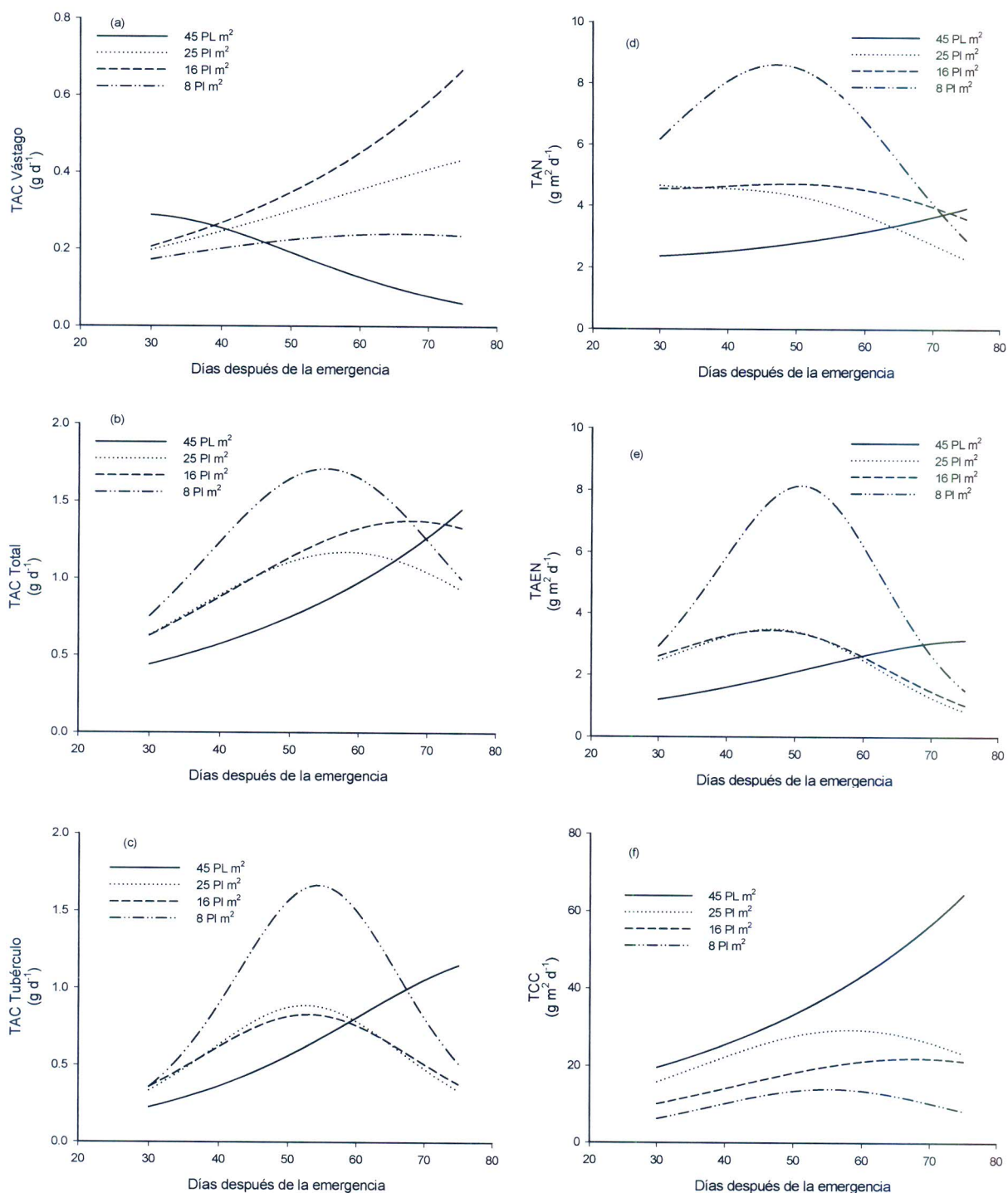


Figura 2.1. Tasa absoluta de crecimiento; vástago (a), total (b) y tubérculo (c); tasa de asimilación neta (d), tasa económica de asimilación neta (e) y tasa de crecimiento del cultivo (f) en papa (*Solanum tuberosum* L.) Var. Gigant en cuatro densidades de siembra.

ciclo de cultivo se alargó debido posiblemente a las condiciones no inductivas de tuberización ocasionada por la menor captación de radiación por planta.

Lo anterior sugiere que con altas densidades de población la disposición de radiación por planta disminuye, lo que ocasiona menor acumulación de materia seca en el órgano de interés; situación que indica alteración de las relaciones fuente-demanda, ya que se promueve el crecimiento de la parte aérea a expensas del crecimiento de los tubérculos (Gawronska *et al.*, 1990).

A los 50 DDE solo en el tratamiento de 8 plantas m^{-2} alcanzó su máxima TAC (Figura 2.1. b) por planta (1.71 g d^{-1}), mientras que para densidades de 16 y 25 plantas m^{-2} los valores máximos se presentaron de los 57 a los 65 DDE (1.37 y 1.17 g d^{-1} , respectivamente). Por su parte, plantas del tratamiento de 45 plantas m^{-2} , alcanzaron su máxima acumulación de materia seca a los 75 DDE. A los 30 DDE la TAN (Figura 2.1. d) de plantas crecidas a menor densidad ya era de 6.18 g m^{-2} (1.45 g d^{-1}). El comportamiento de la TAC de la planta completa esta influenciado por la TAC de los tubérculos en todos los tratamientos, lo que concuerda con lo detectado por Mora *et al.* (2006), al estudiar la cinética de acumulación de biomasa de cinco genotipos de papa.

A los 30 DDE la TAN de plantas crecidas a menor densidad fue de $6.18 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 160 % superior que la TAN con 45 plantas m^{-2} y 35 % respecto a la TAN de plantas de 16 y 25 plantas m^{-2} . De los 40 a 50 DDE la TAN de plantas a menor densidad llegó a su valor más alto ($8.62 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); superior 82, 93 y 118 % respecto a la TAN de las plantas con 16, 25 y 45 plantas m^{-2} . Después de los 50

DDE y hasta los 75 DDE la TAN de las plantas desarrolladas a densidades de población de 8, 16 y 25 plantas m^{-2} descendió hasta llegar a 2.92, 3.6 y 2.28 $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$, respectivamente; en contraste en las plantas crecidas a mayor densidad de población (45 plantas m^{-2}) la TAN se incrementó y hasta los 75 DDE alcanzó la mayor ganancia de biomasa seca por unidad de área foliar por día (3.94 $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$). Lo anterior sugiere que la reducción de la radiación provocada por la alta densidad de población en plantas de papa de la variedad Gigant conduce al alargamiento del ciclo de cultivo y confirma que plantas con mayor disponibilidad de luz fijan mayor cantidad de CO_2 por unidad de tiempo.

Por otro lado, la TAN máxima en plantas de cada tratamiento coincide con el periodo de mayor TAC de tubérculo, lo que sugiere que el incremento en la demanda de asimilados en los tubérculos estimula la tasa de fotosíntesis (Aguilar *et al.*, 2006; Mora *et al.*, 2006)

Así mismo, la TAEN presentó un comportamiento similar a la TAN, la mayor tasa de acumulación de biomasa de tubérculos por planta y más pronto en el ciclo fue en plantas a menor densidad, así mismo con 25 y 16 plantas m^{-2} se tuvo comportamiento similar con el máximo a los 50 días para descender a menos de 1 $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$ a los 75 DDE, y a mayor densidad la eficiencia de asimilación económica se incrementó lentamente de 1.2 a los 30 DDE a 3.13 $\text{g m}^2 \text{d}^{-1}$ a los 75 DDE (Figura 2.1.c). Lo anterior indica que a menor densidad, la planta acorta su ciclo de cultivo y produce más asimilados que son destinados al tubérculo.

A los 75 DDE la biomasa de estolones por planta con 45 plantas m^{-2} disminuyó con respecto al resto de las densidades empleadas ($\alpha = 0.05$); sin embargo, el número y biomasa de tubérculos por planta (Cuadro 2.3), fue igual con respecto a los tratamientos de 16 y 25 plantas m^{-2} , pero no en comparación con plantas del tratamiento de 8 plantas m^{-2} , las cuales presentaron los valores más altos de biomasa y número de tubérculos (26 y 37 %, respectivamente). Esta menor acumulación de biomasa y rendimiento de tubérculos en los tratamientos de mayor densidad posiblemente se debió al autosombreo de las plantas. Se ha demostrado que bajos niveles de radiación disminuyen la asimilación de CO_2 , biomasa total y rendimiento en tubérculos (Gawronska *et al.*, 1990; Wurr *et al.*, 1997).

Sin embargo, a los 75 DDE el índice de cosecha fue igual estadísticamente ($\alpha = 0.05$) en tres de las cuatro densidades (16, 25 y 45 plantas m^{-2}) lo que implica que al final del ciclo de cultivo, independientemente de estas tres densidades empleadas, las plantas destinaron la misma proporción de asimilados al tubérculo; en contraste, las plantas del tratamiento de menor densidad tuvieron el índice de cosecha significativamente mayor, que el de los tres tratamientos anteriores, lo que confirma que a mayor intercepción de radiación fotosintéticamente activa por planta no sólo se producen mayor cantidad de asimilados, sino que también se destina mayor proporción de carbohidratos al tubérculo, y la diferencia encontrada en biomasa de tubérculo es debida tanto a

la mayor cantidad de asimilados producidos como a la partición de mayor proporción de los mismos hacia los tubérculos en plantas del tratamiento de

Cuadro 2.3. Efecto de cuatro densidades de plantación sobre el número y peso seco de tubérculos, peso seco de estolones por planta, peso seco total, e índice de cosecha a los 75 DDE en papa (*Solanum tuberosum* L.) var. Gigant.

Densidad (plantas m ⁻²)	Materia seca de estolones (g)	Número de tubérculos	Materia seca de tubérculos (g)	Materia seca total (g)	Índice de cosecha
45	0.35 b ^z	10.25 b	36.86 b	44.58 c	0.62 b
25	0.49 a	12.00 b	39.59 b	50.18 c b	0.61 b
16	0.61 a	13.00 b	39.00 b	58.40 a b	0.60 b
8	0.61 a	16.50 a	52.56 a	67.56 a	0.68 a
DMSH	0.25	06.22	12.64	9.90	0.15
CV (%)	13.63	21.70	13.63	15.96	11.34
$\bar{x}$	0.51	2.93	42.00	66.26	0.63

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). DMSH = Diferencia mínima significativa. $\bar{x}$ = media, CV= coeficiente de variación.

menor densidad. Estos resultados concuerdan con lo mencionado por Muro *et al.* (1997) quienes informan que a mayor densidad de población no incrementó el número de tubérculos de menor diámetro en detrimento de los tubérculos de mayor diámetro, lo que puede ser debido a que las densidades empleadas (20, 41 y 83 plantas m⁻²) fueron menores que el máximo potencial que puede soportar el cultivo hidropónico.

El análisis de los resultados por unidad de superficie de invernadero, muestran resultados opuestos a los obtenidos por planta. La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) a los 30 DDE fue más baja en el tratamiento de 8 plantas m⁻²

(6.14 g m² d⁻¹) que representó el 31, 39 y 61 % de la TCC de los tratamientos de 45, 25 y 16 plantas m⁻² (Figura 2.1.f). En los cuatro tratamientos la TCC se incrementó conforme se desarrolló el cultivo y a los 50 DDE la producción de materia seca por unidad de superficie de plantas crecidas a menor densidad de población representó el 40, 49 y 78 % de aquellas de 45, 25 y 16 plantas m⁻², respectivamente. Y a los 75 DDE la producción de materia seca por unidad de superficie y tiempo en el tratamiento de 8 plantas m⁻² fue de 8.16 g m⁻² d⁻¹, que representó solo 12 % de la TCC del tratamiento de mayor densidad de población con 64.44 g m⁻² d⁻¹ y el 38 y 35 % respecto a 16 y 25 plantas m⁻² con 21.30 y 23.20 g m⁻² d⁻¹, respectivamente. Lo anterior indica que a mayor densidad de población la fijación de CO₂ por unidad de superficie de invernadero se incrementó, debido al desarrollo más rápido de área foliar por el dosel (Boyd *et al.*, 2002). El mayor índice de área foliar lo tuvo el tratamiento de 45 plantas m⁻² desde los 30 DDE y hasta los 75 DDE. Lo anterior fue confirmado con los resultados obtenidos al multiplicar los valores medios de número y biomasa de tubérculos por planta por el número de plantas por metro cuadrado presentes en cada tratamiento. El número total de minitubérculos en el tratamiento de 45 plantas m⁻² fue de 470 unidades, similar a lo indicado por Rolot *et al.* (1999) quienes empleando esferas de arcilla y 200 plantas m⁻² obtuvieron más de 400 tubérculos m⁻², mientras que el menor número de tubérculos m⁻² (132) fue detectado en las plantas del tratamiento de menor densidad (8 plantas m⁻²). Respecto a la materia seca acumulada en los

tubérculos se obtuvieron 420 g m² con 8 plantas m⁻², en contraste con 1658 g m² para 45 plantas m⁻², casi cuatro veces más que en la menor densidad de población empleada.

CONCLUSIÓN

Altas densidades de población (45 plantas m⁻²) en cultivo hidropónico en invernadero con la variedad Gigant disminuyen la acumulación de biomasa total y de tubérculos por planta, el número de tubérculos por planta, la tasa absoluta de crecimiento, la tasa de asimilación neta y la tasa económica de asimilación neta por planta, e incrementó la tasa de crecimiento del cultivo, así como el peso seco y el número de tubérculos por unidad de superficie de invernadero respecto al tratamiento de menor densidad de población.

LITERATURA CITADA

- AGUILAR, L.M.G.; CARRILLO, S.A.J.; RIVERA, P.A.; GONZÁLEZ, H.A.V. 2006. Análisis de crecimiento y de relaciones fuente-demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). Rev. Fitotecnia Mexicana 29(2): 145-156.
- BOYD, N.S.; GORDON, R.; MARTIN, R.C. 2002. Relationship between leaf area index and ground cover in potato under different management conditions. Potato Research 45: 117 – 129.

BASU, P.S.; ASHOO, S.; GARG, I.D.; SUKUMARAN, N.P. 1999. Tuber sink modifies photosynthetic response in potato under water stress. *Environmental and Experimental Botany* 42(1): 25-39.

FARRAN, I.; MINGO-CASTEL, M. 2006. Potato minituber production using aeroponics: Effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research* 83: 47-53.

GARDNER, P. F.; PEARCE, B. R.; MITCHELL, L. R. 1990. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press: AMES. USA. 327 p.

GAWRONSKA, H.; DWELLE, B.R.; PAVEK, J.J. 1990 Partitioning of photoassimilates by potato plants (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by irradiance: II. Partitioning patterns by four clones grown under high and low irradiation. *American Potato Journal* 67: 163-176.

JEFFERIES, A. R.; MACKERRON, L. K. D. 1989. Radiation interception and growth of irrigated and droughted potato (*Solanum tuberosum*). *Field Crops Research* 22: 101-112.

MCCOLLUM, E.R. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. II. Time by P-status interactions for growth and leaf efficiency. *Agronomy Journal* 70: 58-67.

MENZEL, C.M. 1985. Tuberization in potato at high temperatures: Interaction between temperature and irradiance. *Annals of Botany* 55: 35 – 39.

MORA, A.R.; ORTIZ, C.J.; RIVERA, P.A.; MENDOZA, C.C.A.; COLINAS, L.M.T.; LOZOYA, S.H.; RODRÍGUEZ, P.J.E. 2005. Comportamiento de la acumulación y distribución de biomasa. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11(1): 135 - 142

MORA, A.R.; ORTIZ, C.J.; RIVERA, P.A.; MENDOZA, C.C.A.; COLINAS, L.M.T.; LOZOYA, S.H. 2006. Índices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12(1): 85-94.

MURO, J.; DÍAZ, V.; GOÑI, J.L.; LAMSFUS, C. 1997. Comparison of hydroponic culture and culture in peat/sand mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. *Potato Research* 40: 431 – 438.

RANALLI, P. 1997. Innovative propagation methods in seed tuber multiplication programmes. *Potato Research* 40: 439 – 453.

RODRÍGUEZ, P.J.E.; SAHAGÚN, C.R.; GASGA, P.; MORA, A.R. 2006. Programas de cómputo para la estimación de parámetros de regresión no lineal útiles en el análisis de crecimiento de cultivos. 52^{da} Reunión Anual de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical. Sep. 24-30. San Juan, Puerto Rico.

ROLOT, L.J.; SEUTIN, H. 1999. Soiless production of potato minitubers using a hydroponic technique. *Potato Research* 42: 457-459.

RUBIO, C.O.A.; RANGEL, G.J.; FLORES, L.R.; MAGALLANES, G.J.V.; DÍAZ, H.C.; ZAVALA, Q.T.; RIVERA, P.A.; CADENA, H.M.; ROCHA, R.R.; ORTÍZ, T.C.; LÓPEZ, D.H.; DÍAZ, V.M.; PAREDES, T.A. 2000. Manual para la Producción de Papa en las Sierras y Valles Altos del Centro de México. SAGAR.INIFAP.CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Libro Técnico No. 1. Zinacantepec, Estado de México. 79 p.

STRUIK, C.P.; WIERSEMA, G.S. 1999. Seed Potato Technology. Ed. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands 383.

WOOLEY D. J.; WAEREING, P. F. 1972. Environmental effects on endogenous cytokinins and gibberellin levels in *Solanum tuberosum*. New Phytology 71: 1015-1025.

VREUGDENHIL, D.; SERGEEVA, I. L. 1999. Gibberellins and tuberization in potato. Potato Research 42: 471-481.

WURR, D. C. E.; HOLE, C. C.; FELLOWS, J. R.; MILLING, J.; LYNN, J. R.; O'BRIEN, P. J. 1997. The effect of some environmental factors on potato tuber numbers. Potato Research 40: 297 – 306.

III. EFECTO DE PACLOBUTRAZOL, UNICONAZOL Y CYCOCEL EN LA PRODUCCIÓN DE TUBÉRCULO-SEMILLA DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) EN CULTIVO HIDROPÓNICO

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue determinar el efecto de los inhibidores del crecimiento Cycocel, Uniconazol y Paclobutrazol y la concentración adecuada para generar plantas de papa de porte bajo y de menor área foliar, sin disminuir su rendimiento en número de tubérculos, en condiciones de invernadero y cultivo hidropónico. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con 16 tratamientos y cuatro repeticiones. De los inhibidores probados, el Uniconazol y el Paclobutrazol fueron más efectivos que el Cycocel para reducir el crecimiento. El Uniconazol a concentraciones mayores de 5 mg Litro⁻¹ redujo la altura de las plantas entre 23 y 46 %, respecto al testigo ($\alpha = 0.05$); así como la biomasa de tubérculos y de la planta completa. El Paclobutrazol a 100, 200 y 250 mg Litro⁻¹, además de reducir la altura de la planta entre 50 y 64%, disminuyó la biomasa de tubérculos y de la planta completa de 44 a 69 % y entre 45 y 67 %, respectivamente; con 150 mg Litro⁻¹ de este inhibidor se redujo la altura de planta en 42 %, sin afectar significativamente la biomasa de tubérculo (47.0 g). Tanto con 20 mg Litro⁻¹ de Uniconazol como con 150 mg Litro⁻¹ de Paclobutrazol se redujo el IAF, de 13.9 en el testigo a 10.93 y 9.34, respectivamente, sin afectar el número

y biomasa de tubérculos. Se concluye que con una aplicación de 20 mg Litro⁻¹ de Uniconazol ó 150 mg Litro⁻¹ de Paclobutrazol disminuye el crecimiento en altura y área foliar sin afectar e rendimiento en número y biomasa de tubérculos.

Palabras clave: minitubérculos, hidroponía, inhibidores del crecimiento.

SUMMARY

The main objective of this research was to evaluate the concentration of Cycocel, Uniconazol and Paclobutrazol to obtain compact plants, without affecting the tuberization process and tuber yield (var. Gigant) in hydroponics culture under greenhouse conditions. A random blocks design with 16 treatments and four repetitions was used. Uniconazol reduced plant height from 23 to 46 % upon 5.0 mg Litro⁻¹, however it also reduced tuber and plant biomass. Paclobutrazol applications of 100, 200 and 250 mg Litro⁻¹ reduced plant height (50 to 64 %), tuber biomass (44 to 69 %) and plant biomass (45 to 67 %). Uniconazol at 20 mg Litro⁻¹ and 150 mg Litro⁻¹ of Paclobutrazol produced smaller plants in height and leaf area index, from 13.9 of plants without inhibitors to 10.93 and 9.24, respectively, they did not affect number and tuber biomass.

Key words: minitubers, Hydroponics, growth inhibitors, *Solanum tuberosum*.

INTRODUCCIÓN

La tuberización en papa (*Solanum tuberosum* L.) es un proceso complejo en el que intervienen factores bióticos y abióticos. Los reguladores de crecimiento endógenos en la planta juegan un papel preponderante en este proceso, entre los que destacan las giberelinas; su importancia se ha comprobado al determinar que la concentración interna de ácido giberelico (AG) en la planta es alta bajo condiciones no inductivas y decrece en condiciones inductivas; días cortos y bajas temperaturas nocturnas (Hannapel *et al.*, 2004).

Durante la tuberización la concentración endógena de AG₁ en estolones y hojas decrece (Carrera *et al.*, 1999) y es inhibida con la aplicación de AG₃, mientras la aplicación exógena de inhibidores de la biosíntesis de AG₃ la favorece (Vreugdenhil y Sergeeva, 1999).

La aplicación de inhibidores del crecimiento en cultivos hortícolas generalmente se hace con el propósito de reducir el crecimiento longitudinal del tallo sin disminuir su productividad (Rademacher, 2000). Algunos de los inhibidores del crecimiento que han sido empleados en papa tanto en condiciones *in vitro*, como de invernadero y campo son: Tetcyclacis, Cycocel, Paclobutrazol, Uniconazol, Ancymidol y Daminozida. Se ha observado que algunos de ellos incrementan la formación de tubérculos en segmentos de tallo *in vitro* (Lozoya-Saldaña y García, 1996), en plantas bajo invernadero (Rodríguez-Falcón *et al.*,

2006) y en campo con condiciones de alta temperatura (Tekalign y Hammes, 2005).

El Cycocel bloquea la vía de biosíntesis de giberelinas en etapas tempranas, específicamente la conversión del pirofosfato de geranilgeranilo en pirofosfato de copalilo; mientras que el Paclobutrazol y el Uniconazol inhiben la oxidación de ent-kaureno y bloquean las reacciones de oxidación entre el kaureno y el ácido kaurenoico. El restablecimiento del crecimiento de la planta con aplicación de giberelinas comprueba que este efecto se debe al Paclobutrazol, el cual inhibe su biosíntesis (Balamani y Poovaiah, 1985).

El Paclobutrazol en papa disminuye la altura de la planta, la tasa de crecimiento del cultivo y reduce la partición de asimilados a hojas, tallos, raíces y estolones, incrementándola hacia los tubérculos (Balamani y Poovaiah, 1985), aunque existen resultados que indican la reducción de la biomasa de la planta completa (Tekalign y Hammes, 2005) e incluso del rendimiento de minitubérculos (Hughes y Keith, 2003).

Se ha observado que en condiciones de alta temperatura el Paclobutrazol mejora la productividad de tubérculos y reduce el crecimiento del tallo (Tekalign y Hammes, 2005).

El Cycocel ha sido empleado para inducir la tuberización en cultivos *in vitro*; aplicaciones de 500 mg Litro⁻¹ mostraron no sólo inhibición del crecimiento, sino también la senescencia de las plántulas de papa (Jing *et al.*, 2004); se ha

observado también que causa inhibición transitoria en la elongación del tallo en cultivo, lo que sugiere que puede ser degradado y se hacen necesarias aplicaciones adicionales (Harvey *et al.*, 1991).

La producción de minitubérculos en invernadero, para ser utilizados como semilla, es un proceso intensivo y tecnificado, donde se busca maximizar el rendimiento en número de tubérculos por unidad de superficie, mayores de 10 mm de diámetro que facilite su uso en campo. Una de las alternativas para lograrlo es el incremento de población por unidad de superficie, por lo que las densidades de población empleadas suelen ser altas, del orden de 45 a 100 plantas m⁻², sin embargo, conforme la densidad de población aumenta el rendimiento por planta disminuye en número, diámetro y biomasa de los tubérculos producidos (Rubio *et al.*, 2000). Lo anterior como consecuencia de la menor intercepción de radiación fotosintéticamente activa por planta, debido al sombreado mutuo. Así mismo, se presentan síntomas de etiolación que debilitan a las plantas y hacen más difícil su manejo.

El objetivo de la presente investigación fue identificar el inhibidor del crecimiento y la dosis de aplicación más adecuada para generar plantas de papa de porte bajo y de menor área foliar, sin disminuir su rendimiento en número y peso de tubérculos por planta. De lograr este arquetipo de planta, dada su menor área foliar, se podría incrementar la densidad de población y quizá, aumentar el rendimiento por unidad de superficie, a la vez que se

facilitaría el manejo del cultivo tanto en su conducción como en el control de plagas y enfermedades.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en Chapingo, Estado de México, de marzo a junio del 2007 en un invernadero de cristal. Las condiciones ambientales fueron: humedad relativa media de 62 %; temperatura media de 21.5° C; la radiación varió a lo largo del día de acuerdo con las condiciones ambientales, con densidades de flujo fotónico de 1800 $\mu\text{moles m}^2 \text{s}^{-1}$ como máximo.

Se ensayaron varios tratamientos a partir de tres inhibidores del crecimiento con cinco concentraciones: Paclobutrazol (50, 100, 150, 200 y 250 mg Litro^{-1}); Uniconazol (2.5, 5, 10, 20 y 40 mg Litro^{-1}), Cycocel (200, 400, 800, 1600 y 2400 mg Litro^{-1}) y un testigo, en una sola aplicación a los 30 días después de la emergencia. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con 16 tratamientos y cuatro repeticiones; la unidad experimental consistió de 10 plantas, las cuales fueron asperjadas a los 30 DDE con 12.5 ml planta^{-1} de solución con el tratamiento correspondiente, exceptuando el testigo que fue asperjado con agua.

Los minitubérculos utilizados para la siembra fueron de 15 a 17 mm de diámetro, libres de enfermedades de la variedad Gigant, Se depositó un tubérculo por maceta de un litro de volumen con perlita grado hortícola (1 a 4

mm de diámetro) a 12 cm de profundidad y 45 plantas m^{-2} . Las plantas se condujeron a un tallo.

Se empleó la variedad Gigant, liberada en Holanda en 1987, precoz (80 a 90 días), piel blanca, ojos superficiales, pulpa crema, forma oblonga-aplanada, susceptible al tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans* Mont. De Bary) y con calidad para consumo en fresco (Rubio *et al.*, 2000).

La solución nutritiva utilizada tuvo la siguiente concentración de nutrimentos en mg Litro^{-1} : N 160, P 80, K 250, Ca 250, Mg 75, Fe 4, Mn 0.5, Cu 0.5, Zn 0.5, B 0.5, con pH de 6.0 y conductividad eléctrica final de 2.0 dS m^{-1} . El gasto promedio por día de la solución fue de 500 ml por planta, dividido en cuatro riegos. A lo largo del ciclo se hicieron aplicaciones preventivas con Mancozeb (2 g Litro^{-1}), Zineb (2 g Litro^{-1}) y Clorotalonil ($1.5 \text{ ml Litro}^{-1}$), para el control de tizón tardío de la papa, así como aplicaciones alternadas de Endosulfan y Ometoato (1 ml Litro^{-1}) una vez por semana para el control de mosquita blanca (*Bemisia tabaci* Genn.).

A los 45 DDE, 15 días después de la aplicación de los tratamientos (DDA) y a los 75 DDE, se evaluó altura de la planta (cm), peso seco y fresco de tubérculos (g), vástago (g), planta completa (g), número de tubérculos y área foliar (cm^2). Esta última fue medida con un integrador LI-COR, modelo LI-3100. El peso seco de los distintos órganos se obtuvo al secar en estufa a 70°C durante 72 horas hasta peso constante, en el caso de los tubérculos, estos fueron seccionados y mantenidos por 96 horas en estufa.

Se hizo el análisis de varianza correspondiente y la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracteres Morfológicos

De los productos evaluados, Uniconazol y Paclobutrazol inhibieron la altura de la planta a los 15 DDA con respecto al testigo ($\alpha = 0.05$).

El Uniconazol, con 20 y 40 mg Litro⁻¹, redujo la altura de la planta 32 y 40 %, respectivamente en comparación con el tratamiento sin aplicación de inhibidores que alcanzó 75.5 cm de altura. A los 45 DDA (Cuadro 3.1). La reducción de la altura de las plantas con los tratamientos de 5 a 40 mg Litro⁻¹ del inhibidor fue de 23 a 46 % con respecto al testigo.

El Paclobutrazol desde los 15 DDA inhibió en mayor proporción el crecimiento en altura, pues cuatro de las cinco concentraciones probadas redujeron la altura de la planta entre 23 y 41 %, respecto al tratamiento sin aplicación del inhibidor. Este comportamiento se mantuvo hasta el momento de la cosecha (45 DDA), cuando la altura final de las plantas tratadas con 100 a 250 mg Litro⁻¹ fue 35 a 50 % con respecto al testigo (Cuadro 3.1).

El Cycocel con las mayores concentraciones (800, 1600 y 2400 mg Litro⁻¹) redujo la altura de las plantas hasta los 45 DDA en 27 %, lo que se contrapone

Cuadro 3.1. Comparación de medias a los 15 y 45 DDA de caracteres morfológicos con cinco concentraciones de inhibidores del crecimiento en papa (*Solanum tuberosum* L.) en cultivo sin suelo.

[mg Litro ⁻¹]	Altura de planta (cm)	Número de hojas	IAF	Altura de planta (cm)	Número de hojas	IAF
	15 DDA			45 DDA		
0	75.5 a ^z	23.5 a	10.4 a	97.7 a ^z	26.6 a b	13.9 a
	Uniconazol					
2.5	69.1 a b c	23.5 a b	8.9 a b c	76.6 a b c d e	27.2 a	13.1 a
5.0	57.6 c d e	21.4 a b c d e	8.8 a b c	60.9 d e f g	24.5 a b c	11.4 a b c
10	59.3 a b c d e	21.5 a b c d e	8.2 a b c	74.6 b c d e	25.7 a b c	12.9 a b
20	51.6 d e	20.0 c d e	8.1 a b c	56.3 e f g	23.0 b c	10.9 a b c d
40	45.8 e	19.5 d e	6.5 c	52.3 f g	22.5 b c	8.2 c d
	Paclobutrazol					
50	66.5 a b c d	24.2 a	10.0 a b	85.5 a b	27.5 a	12.8 a b
100	57.5 c d e	21.7 a b c d e	8.7 a b c	62.5 c d e f g	23.0 b c	10.4 a b c d
150	51.5 d e	21.3 a b c d e	7.4 b c	56.9 d e f g	22.8 b c	9.3 b c d
200	50.8 d e	20.5 b c d e	8.2 a b c	56.8 d e f g	24.4 a b c	10.7 a b c d
250	44.4 e	19.0 e	6.7 c	48.8 g	21.7 c	7.5 c
	Cycocel					
200	74.7 a b	22.9 a b c	10.2 a	83.8 a b c	24.5 a b c	12.2 a b
400	69.0 a b c	22.7 a b c	9.3 a b	78.5 a b c d	24.5 a b c	13.4 a
800	66.8 a b c d	22.5 a b c d	9.1 a b c	70.9 b c d e f	23.6 a b c	13.2 a
1600	70.5 a b c	23.5 a b	9.8 a b	74.9 b c d e	24.5 a b c	13.9 a
2400	65.9 a b c d	22.9 a b c	8.9 a b c	69.9 b c d e f g	24.6 a b c	12.2 a b
DMSH	17.1	3.0	2.5	21.9	4.1	3.8
CV (%)	19.7	9.7	20.6	22.2	12.0	23.1
Media	61.0	21.9	8.7	69.2	24.9	11.4

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$); DMSH = Diferencia mínima significativa; CV = Coeficiente de variación; media = media general de tratamientos.

con lo establecido por Harvey *et al.* (1991), en el sentido de que sólo causa inhibición transitoria en la elongación del tallo.

La mayor inhibición del crecimiento por el Uniconazol y Paclobutrazol en comparación con Cycocel puede atribuirse al modo de acción de los inhibidores, ya que el Cycocel inhibe la biosíntesis de giberelinas en las primeras etapas, en tanto que Uniconazol y Paclobutrazol, que son derivados del triazol, inhiben la biosíntesis de giberelinas en pasos posteriores (Rademacher, 2000).

El Uniconazol y Paclobutrazol no sólo disminuyeron el crecimiento en altura de las plantas tratadas, sino también retrasaron su desarrollo, ya que el número de hojas en los tratamientos de 20 y 40 mg Litro⁻¹ de Uniconazol y aplicaciones de 200 y 250 mg Litro⁻¹ de Paclobutrazol fueron menores que el testigo con 3 y 4 hojas a los 15 DDA y de 4 a 6 a los 45 DDA (Cuadro 3.1). Lo anterior se debe posiblemente al bloqueo de las giberelinas presentes en la lámina foliar (Carrera *et al.*, 1999).

Así mismo, aplicaciones de Uniconazol de 40 mg Litro⁻¹ y Paclobutrazol de 250 mg Litro⁻¹ disminuyeron el índice de área foliar con valores de 6.54 y 6.71, respectivamente, en comparación con el IAF de 10.46 de las plantas testigo a los 15 DDA. Este comportamiento se mantuvo hasta los 45 DDA con índices de área foliar de 8.26 y 7.51 para Uniconazol y Paclobutrazol, que representaron el 59 y 54 % del IAF de las plantas sin aplicación de inhibidores (Cuadro 3.1). La obtención de plantas de menor área foliar con el uso de inhibidores dan la

posibilidad de incrementar la densidad de población hasta obtener índices de área foliar similares al obtenido con las plantas testigo.

El Cycocel, aún a concentraciones altas (1600 y 2400 mg Litro⁻¹), no afectó el número de hojas, ni el índice de área foliar a los 15 y 45 DDA.

Rendimiento y Distribución de Biomasa

Ninguno de los inhibidores del crecimiento en estudio afectaron negativamente el número de minitubérculos a los 15 y 45 DDA (Cuadros 3.2 y 3.3) con respecto a plantas sin la aplicación del inhibidor por lo que no se presentó diferencia significativa ($\alpha = 0.05$) entre tratamientos.

De los productos evaluados, en los primeros 15 DDA tanto el Cycocel como el Paclobutrazol no presentaron diferencia entre tratamientos ($\alpha = 0.05$) en la acumulación de biomasa de tubérculo (Cuadro 3.2); sin embargo, el Paclobutrazol con algunas de las dosis si disminuyó la biomasa acumulada de tallos, hojas y de la planta completa, al igual que el Uniconazol que, además de lo anterior, en la menor y mayor concentración de aplicación disminuyó la biomasa de tubérculo por planta, con respecto a plantas tratadas con 50 mg Litro⁻¹ de Paclobutrazol. Este comportamiento se mantuvo hasta la cosecha, a los 45 DDA (Cuadro 3.3), en donde ambos inhibidores disminuyeron la biomasa de tubérculos, tallo, hojas y de la planta completa. También el Cycocel afectó la biomasa de tubérculo y de la planta completa al final del ciclo, sin disminuir la

acumulación de biomasa de tallos y hojas. Este comportamiento es contrario a lo encontrado en otras investigaciones en relación a que el Cycocel incrementa

Cuadro 3.2. Comparación de medias a los 15 DDA de variables de rendimiento y distribución de biomasa de papa (*Solanum tuberosum* L.) con cinco concentraciones de inhibidores del crecimiento en cultivo hidropónico.

[mg Litro ⁻¹]	Número de tubérculos	Peso seco de Tubérculo (g)	Peso seco de Tallo (g)	Peso seco de hojas (g)	Peso seco total (g)
0	7.8 a ^z	19.1 a b	2.5 a b	7.5 a b	30.5 a b
Cycocel					
200	7.9 a	17.2 a b	2.5 a	7.6 a	28.8 a b c
400	7.3 a	14.2 a b	2.1 a b c d e f	6.2 a b c d	24.0 a b c
800	8.6 a	13.6 a b	2.1 a b c d e	6.4 a b c d	23.8 a b c
1600	7.8 a	16.5 a b	2.3 a b c d	7.5 a b	27.9 a b c
2400	9.0 a	16.0 a b	2.0 a b c d e f	6.7 a b c d	26.2 a b c
Uniconazol					
2.5	8.5 a	13.1 b	2.2 a b c d	6.2 a b c d	23.0 a b c
5.0	8.9 a	15.9 a b	1.7 a b c d e f g	6.1 a b c d	25.2 a b c
10	9.9 a	13.5 a b	1.7 b c d e f g	5.5 b c d	22.2 b c
20	9.1 a	17.3 a b	1.4 d e f g	5.9 a b c d	26.1 a b c
40	7.7 a	12.3 b	1.3 f g	5.1 c d	20.1 c
Paclobutrazol					
50	7.8 a	20.6 a	2.3 a b c	7.1 a b c	31.7 a
100	7.9 a	16.8 a b	1.7 a b c d e f g	6.5 a b c	26.4 a b c
150	8.0 a	13.9 a b	1.3 e f g	5.2 c d	21.8 b c
200	9.0 a	18.9 a b	1.5 d e f g	5.9 a b c d	27.8 a b c
250	8.2 a	14.2 a b	1.2 g	4.9 d	21.7 b c
DMSH	2.9	7.2	0.8	2.0	9.0
CV (%)	24.6	32.1	31.3	22.6	24.9
Media	8.3	15.8	1.9	6.3	25.4

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$); DMSH = Diferencia mínima significativa; CV (%) = Coeficiente de variación; media = media general de tratamientos.

Cuadro 3.3. Comparación de medias a los 45 DDA de variables de rendimiento y distribución de biomasa de en papa (*Solanum tuberosum* L.) con cinco concentraciones de inhibidores del crecimiento en cultivo hidropónico.

[mg Litro ⁻¹]	Número de Tubérculos	Peso seco de tubérculo (g)	Peso seco de tallo (g)	Peso seco de hojas (g)	Peso seco total (g)	IC
0	9.0 a b	58.8 a ^z	3.6 a	10.3 a b c	74.5 a	0.78 a b c
Cycocel						
200	8.5 a b	50.2 a b	3.1 a b c	9.0 a b c d e	63.8 a b	0.78 a b c
400	11.7 a	39.8 b c d	3.4 a	10.7 a b	55.7 b	0.71 e f
800	10.5 a b	46.2 a b c	3.1 a b c	10.5 a b	61.5 a b	0.75 c d e
1600	9.7 a b	35.1 c d e	3.3 a b	11.4 a	51.4 b c	0.68 f
2400	9.7 a b	37.0 b c d e	3.0 a b c	9.8 a b c	51.5 b c	0.71 d e f
Uniconazol						
2.5	10.0 a b	37.0 b c d e	2.4 a b c d	9.6 a b c d	50.9 b c	0.72 d e f
5.0	9.7 a b	37.7 b c d e	1.9 c d e f	8.1 b c d e f	49.3 b c d	0.76 b c d
10	10.7 a b	39.3 b c d e	2.6 a b c d	9.5 a b c d	53.1 b c	0.74 c d e
20	10.1 a b	47.0 a b c	1.7 d e f	8.1 b c d e f	58.3 a b	0.80 a b
40	9.4 a b	27.8 d e	1.4 f	6.3 e f	36.9 c d	0.75 c d e
Paclobutrazol						
50	8.0 b	40.8 b c d	3.0 a b c	9.6 a b c d	54.8 b	0.74 c d e
100	10.4 a b	36.1 c d e	2.0 b c d e f	8.3 b c d e	48.0 b c d	0.75 c d e
150	8.8 a b	47.0 a b c	1.0 d e f	6.8 d e f	56.7 b	0.82 a
200	10.2 a b	40.0 b c d	1.6 d e f	7.6 c d e	50.6 b c d	0.78 a b c
250	8.0 a b	25.9 e	1.3 f	5.7 f	34.1 d	0.75 b c d e
DMSH	3.5	13.5	1.2	2.8	16.7	0.04
CV (%)	25.8	23.6	35.1	22.6	22.1	4.65
Media	9.6	40.4	2.5	8.8	53.2	0.75

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales estadísticamente de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$); DMSH = Diferencia mínima significativa; CV (%) = Coeficiente de variación; media = media general de tratamientos

el rendimiento económico de las plantas (Shoba *et al.*, 2004; Prakash *et al.*, 2001), y que aspersiones repetidas de Cycocel tuvieron el mayor rendimiento sin afectar el tamaño de tubérculos, contenido de azúcares y almidón (Sharma *et al.*, 1998) y que 1150 g ha⁻¹ de Cycocel aumentó el número de tubérculos por planta aunque causó disminución del peso medio de los mismos (Rex, 1992).

Ninguna de las cinco concentraciones evaluadas de Cycocel (200 a 2400 mg Litro⁻¹) afectaron de manera significativa el peso seco de tubérculos, tallo, hojas y total de la planta a los 15 DDA (Cuadro 3.2). Mientras a los 45 DDA, las concentraciones de 400, 1600 y 2400 mg Litro⁻¹ redujeron la biomasa de tubérculo 32, 41 y 37 %, respectivamente, sin disminuir la biomasa de tallo y hojas, no obstante, redujeron la biomasa de la planta completa 25 a 30 % (Cuadro 3.3), lo que indica que la biomasa de tubérculo es el principal componente de la biomasa total.

No obstante lo anterior, el menor índice de cosecha en dichos tratamientos indica que no solo se disminuyó la producción de asimilados, sino que también se destinó menor proporción de estos al tubérculo (Cuadro 3.3).

El Uniconazol, 15 DDA, a dosis de 2.5 y 40 mg Litro⁻¹ disminuyó la biomasa de tubérculo 6 y 7 g menos, con relación a la producida por las plantas testigo, pero sólo con 40 mg Litro⁻¹ se redujo la biomasa de tallo, hojas y de la planta completa (48, 31 y 34 %, respectivamente). Sin embargo, a los 45 DDA a excepción de la solución de 20 mg Litro⁻¹, el resto de las concentraciones

probadas de Uniconazol tuvieron un efecto negativo en la biomasa de tubérculo; con 40 mg Litro⁻¹ la biomasa de tubérculo fue sólo el 47 % de la generada por las plantas sin aplicación del inhibidor, de la misma manera afectó la biomasa de tallo, hojas y total (Cuadro 3.3), representando el 39, 61 y 49 %, respectivamente con relación al testigo. Sin embargo el índice de cosecha fue estadísticamente igual al de las plantas testigo, lo que plantea que la menor acumulación de biomasa en la parte aérea de la planta condujo a la menor acumulación de carbohidratos en el tubérculo.

Lo anterior es contrario a lo detectado por Fujino *et al.*, (1995) quienes mencionan que la reducción de AGs después de la aplicación de Uniconazol provoca la reorientación de los microtúbulos en las células del estolón, lo que favorece el inicio de la formación del tubérculo.

De las concentraciones evaluadas de Paclobutrazol a los 15 DDA, ninguna de ellas ocasionó reducción de biomasa de tubérculo y de la planta completa, no así en otros órganos, ya que se detectó disminución significativa de biomasa del tallo con 150 a 250 mg Litro⁻¹, de 40 a 52 % de la biomasa acumulada en este órgano por plantas testigo, mientras en hojas únicamente con 250 mg Litro⁻¹ se afectó negativamente su biomasa con 4.91 g que representaron el 64 % de la acumulada en las plantas testigo (Cuadro 3.2).

A los 45 DDA (75 DDE), las concentraciones de 50 a 250 mg Litro⁻¹ de Paclobutrazol excepto con 150 mg Litro⁻¹ redujeron la biomasa de tubérculo de 25.9 a 40.8 g, en comparación de los 58.8 g acumulados en tubérculo en las

plantas testigo (Cuadro 3.3). En otras investigaciones aplicaciones de 150 y 450 mg Litro⁻¹ de este inhibidor han incrementado el número de minitubérculos en cultivos sin suelo (Lim *et al.*, 2004).

Así mismo, las concentraciones de 100 a 250 mg Litro⁻¹ tuvieron efecto negativo en la acumulación de biomasa del tallo y la disminuyeron de 45 a 73 %, mientras la materia seca de hojas fue disminuida sólo con 150 y 250 mg Litro⁻¹ (33 y 44 %, respectivamente).

La biomasa de la planta completa a los 15 DDA todavía no mostraba disminución con ninguno de los tratamientos; sin embargo, a los 45 DDA todos los tratamientos con Paclobutrazol la redujeron, representando del 46 al 74 % de la acumulada por las plantas testigo. Obteniéndose los valores más bajos con 100, 200 y 250 mg Litro⁻¹, lo que indica que la biomasa total de la planta está constituida en gran medida por la biomasa de tubérculo. Del mismo modo que con el Uniconazol a dosis de 20 mg Litro⁻¹, el índice de cosecha fue igual al testigo, Lo que sugiere que la menor acumulación de biomasa en tubérculo se debe a la disminución generalizada del crecimiento y desarrollo de la planta que repercute en la menor producción de asimilados. Lo que es contrario a lo indicado por Balamani y Poovaiah, (1985) que mencionan que el Paclobutrazol incrementa la partición de asimilados hacia los tubérculos. Y coincide con lo establecido por Tekalign y Hammes, (2005) quienes indican que el Paclobutrazol puede reducir la biomasa total de la planta, y el rendimiento de minitubérculos (Hughes y Keith, 2003), y que no necesariamente sucede un

incrementó en la partición de asimilados hacia los tubérculos como lo señalan Balamani y Poovaiah, (1985).

Los tratamientos con los que se obtuvieron plantas de menor altura y área foliar sin una disminución significativa del número de tubérculos y del índice de cosecha fueron con 20 mg Litro⁻¹ de Uniconazol con 10.93 de IAF que representó el 78 % del IAF de las plantas testigo y 150 mg Litro⁻¹ de Paclobutrazol con 47 g de biomasa de tubérculo, y 9.34 de IAF. Dado lo anterior se plantea continuar una línea de investigación dirigida a definir si con tratamientos como estos que disminuyen el área foliar por planta sin menoscabo del índice de cosecha y del número de tubérculos, es posible incrementar la densidad de población hasta el nivel de igualar el área foliar con el testigo e incrementar el rendimiento en número de tubérculos por unidad de superficie.

Se concluye que con una aplicación de Paclobutrazol a 150 mg Litro⁻¹ o de Uniconazol a 20 mg Litro⁻¹ se disminuyó el crecimiento en altura y área foliar de las plantas sin afectar el rendimiento en número y biomasa de tubérculos.

LITERATURA CITADA

BALAMANI, V.; POOVAIAH, B.W. 1985. Retardation of shoot growth and promotion of tuber growth of potato plants by Paclobutrazol. American Potato Journal 62: 363 – 369.

CARRERA, E.; JACKSON, S.D.; PRAT, S. 1999. Feedback control and diurnal regulation of gibberellin 20-oxidase transcript level in potato. *Plant Physiology* 119: 765 – 773.

FUJINO, K.; KODA, Y.; KIKUTA, Y. 1995. Reorientation of cortical microtubules in the sub-apical region during tuberization in single-node stem segments of potato in culture. *Plant Cell Physiology* 36: 891 – 895.

HANNAPEL, J. D.; CHEN, H.; ROSIN, M. F.; BANERJEE, K.A.; DAVIES, J. P. 2004. Molecular control of tuberization. *American Journal of Potato Research* 81: 263 – 274.

HARVEY, M.R.B.; CROTHERS, H.S.; EVANS, E.N.; SELVY, C. 1991. The use of growth retardants to improve microtuber formation by potato (*Solanum tuberosum*) *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 27: 59-64.

HUGHES, B.R.; KEITH, C.N.F. 2003. Effect of Paclobutrazol treatments on growth and tuber yields in greenhouse – grown Shepody seed potatoes. *Acta Horticulturae* (619): 271 – 277.

JING, W.; ZHONGMIN, A.; XUEZAN, F.; JUNMING, L. 2004. Effect of Chlormequat on oversummering of potato plantlets *in vitro*. *Plant Physiology* 40: 441-442.

KHURANA, S. T.; MCLAREN, H. 1982. The influence of leaf area, light interception and season on potato growth and yield. *Potato Research* 25: 329 – 342.

LIM, H.T.; YOON, C.; CHOI, S.; DITHAL, S.P. 2004. Application of gibberellic acid and Paclobutrazol for efficient production of potato (*Solanum tuberosum* L.) minitubers and their dormancy breaking under soilless culture system. Journal of the Korean Society for Horticultural Science 45: 189-193.

LOZOYA-SALDAÑA, H. AND GARCIA, R. G. 1996. Growth inhibitors in potato *in vitro*. II. Alar and Paclobutrazol. Agrociencia 30: 375-381.

PRAKASH, P.; CHETTI, M. B.; PATIL, S.S. 2001. Effect of plant growth regulators on growth parameters and yield in potato. Karnataka Journal of Agricultural Sciences 14: 938-942.

RADEMACHER, W. 2000. Growth retardants: Effects on giberellin biosynthesis and other metabolic pathways. Annual Review of Plant Physiology 51: 501 – 531.

REX, L.B. 1992. Effect of two plant growth regulators on the yield and quality of russet burbank potatoes. Potato Research 35: 227 – 23.

RODRÍGUEZ-FALCON, M.; BOU, J.; PRAT, S. 2006. Seasonal control of tuberization in potato: Conserved elements with the flowering response. Annual Review of Plant Biology 57: 151 – 180.

RUBIO, C.O.A.; RANGEL, G.J.; FLORES, L.R.; MAGALLANES, G.J.V.; DÍAZ, H.C.; ZAVALA, Q.T.; RIVERA, P.A.; CADENA, H.M.; ROCHA, R.R.; ORTÍZ, T.C.; LÓPEZ, D.H.; DÍAZ, V.M.; PAREDES, T.A. 2000. Manual para la Producción de Papa en las Sierras y Valles Altos del Centro de México.

SAGAR.INIFAP.CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Libro Técnico No. 1. Zinacantepec, Estado de México. 79 p.

SHARMA, N.; KAUR, N.; GUPTA, A. K. 1998. Effects of gibberellic acid and Chlorocholine Chloride on tuberization and growth of potato (*Solanum tuberosum* L). Journal of Science Food Agriculture 78: 466-470

SHOBA, N. ; NATARAJAN, S. ; KANNAN, M. ; VEERARAGAVATHATHAM, D. 2004. Effect of Cycocel and Ethephon on tuber yield of sweet potato clones COCIP-1 and IGSP-9. Journal of Root Crops 30: 65-69.

TEKALIGN, T; HAMMES, P.S. 2005. Growth and biomass production in potato grown in the hot tropics as influenced by Paclobutrazol. Plant Growth Regulation 45: 37 – 46.

VREUGDENHIL, D.; SERGEEVA, I. L. 1999. Gibberellins and tuberization in potato. Potato Research 42: 471-481.

DISCUSIÓN GENERAL

La radiación interceptada por el dosel se ve influenciada por diversos factores: latitud, época del año, nubosidad, área foliar, densidad de población y cantidad de radiación fotosintéticamente activa disponible en el invernadero (Gardner *et al.*, 1990).

El propósito central de esta investigación fue estudiar la influencia de la radiación solar e inhibidores del crecimiento sobre la producción en número y biomasa de minitubérculos.

En el primer artículo se estudió la influencia de niveles de radiación fotosintéticamente activa determinados por el empleo de mallas de sombra. La disminución de radiación afectó en primera instancia la producción de biomasa de la planta completa y la de tubérculo, esto último debido además de la menor producción de asimilados totales por planta, al menor índice de cosecha detectado en condiciones de sombra. Así mismo, se tuvo incremento del área foliar y la longitud del tallo en las plantas en los tratamientos donde se disminuyó la radiación incidente. Con 30 y 60 % de sombra la longitud del tallo se incrementó 138 y 195 % en comparación con plantas expuestas a 100 % de radiación, ya que éstas además, de no mostrar incremento en altura del tallo y área foliar si presentaron mayor biomasa de raíz, lo que indica mayor superficie de absorción de nutrientes.

Lo anterior se explica porque la planta en condiciones de sombra produce

menos asimilados por día (Gardner *et al.*, 1990) y destina mayor proporción de éstos a la parte aérea en detrimento de la acumulación de carbohidratos en el tubérculo, lo que concuerda con lo afirmado por Gawronska *et al.* (1990).

En el segundo artículo se determinó la influencia de la densidad de población sobre el rendimiento de minitubérculos en invernadero e hidroponía. El número y biomasa de tubérculos por planta fue mayor con 8 y 16 plantas m⁻² que con densidades de población superiores en donde disminuyó. El sombreado mutuo de las plantas en densidades altas ocasionó síntomas de etiolación manifestados por el incremento en la longitud del tallo, del área foliar y la menor acumulación de biomasa de la planta completa. El alargamiento del tallo se debió posiblemente a la interacción hormonal, ya que en condiciones de sombra el ácido indolacético se incrementa y actúa sinérgicamente con las giberelinas, lo que provoca elongación celular (Gardner *et al.*, 1990).

Lo anterior indica que a mayor densidad hubo menor captación de radiación por planta y se produjo menor cantidad de asimilados por día, sin embargo, la partición de asimilados también fue afectada ya que plantas con la menor densidad de población mostraron mayor índice de cosecha. Esto concuerda con lo detectado en el primer experimento, ya que en ambos casos (sea con el empleo de sombras o con incremento de la densidad de población) no sólo hay menor producción de asimilados, sino que la planta destina mayor cantidad de estos a la parte aérea. Este comportamiento y la menor biomasa y cantidad de minitubérculos producidos por planta en los dos experimentos en condiciones

de mayor sombra provocada por mallas o por alta densidad de población indican que éstas se encontraron en condiciones no favorables para la tuberización (Vreugdenhill y Sergeeva, 1999).

Los resultados obtenidos en los dos experimentos mencionados apoyan la hipótesis planteada de que a mayor intercepción de radiación por unidad de superficie y unidad de tiempo mayor acumulación de carbohidratos en la fuente y en el tubérculo.

Sin embargo, al hacer el análisis de la influencia de la densidad de población no por planta sino por unidad de superficie de invernadero, la mayor densidad de población fue la que presentó el mayor rendimiento con 470 tubérculos y 1658 g de biomasa de tubérculo, en comparación con densidades de población menores, lo anterior debido a que aún cuando la biomasa y número de tubérculos por planta disminuyó, el mayor número de plantas al aumentar la densidad compensó esa reducción, dando por resultado el mayor rendimiento por unidad de superficie en densidades altas, así como, probablemente al rápido establecimiento de un alto índice de área foliar con las mayores densidades de población (Boyd, *et al.*, 2002) fue una de las causas, indicando que la densidad de 45 plantas m^{-2} es todavía menor de la que puede soportar el cultivo hidropónico para maximizar el rendimiento por unidad de superficie, lo que concuerda lo señalado por Muro *et al.*, (1997).

De los inhibidores estudiados en el tercer experimento, el Uniconazol a concentraciones superiores de 2.5 mg Litro^{-1} y el Paclobutrazol con más de 100

mg Litro⁻¹ retrasaron el crecimiento de la planta en proporciones de 30 hasta el 50%, mientras que el Cycocel detuvo el crecimiento en menor proporción (29 %) con concentraciones mayores de 800 mg Litro⁻¹, lo que se debe posiblemente al diferente modo de acción de los inhibidores, ya que el Cycocel bloquea la biosíntesis de ácido giberelico en las primeras etapas en tanto que el Paclobutrazol y el Uniconazol lo hacen en etapas posteriores (Rademacher, 2000), además de que se menciona que estos últimos están involucrados en la reducción de ácido indolacético (Growhonska y Mejia-Muñoz, 2003).

Sin embargo, en ninguno de los casos se incrementó significativamente la biomasa y número de tubérculos, lo que resultó contrario a la hipótesis planteada y a lo detectado en algunas investigaciones, que indican que plantas tratadas con inhibidores del crecimiento detienen la partición de asimilados a la parte aérea destinando mayor proporción hacia los tubérculos (Balamani y Poovaiah, 1985; Prakash *et al.*, 2001 y Shoba *et al.*, 2004).

Sin embargo, con algunos tratamientos se disminuyó el crecimiento de las plantas y el índice de área foliar sin afectar el número de tubérculos por planta, lo que permite mejorar su conducción en invernadero y el control de plagas y enfermedades, como lo indica Rademacher, (2000).

Se concluye que el empleo de inhibidores de crecimiento permite manejar favorablemente densidades de población tan altas como 45 plantas m² en invernadero.

Con base en lo anterior se recomienda, con el propósito de maximizar la producción de minitubérculos de papa en invernadero no emplear cubiertas plásticas en el invernadero que reduzcan el paso la radiación fotosintéticamente activa más allá del 30 %; usar 45 plantas m^{-2} de densidad de población y hacer aplicaciones de Paclobutrazol de 150 mg Litro⁻¹ o Uniconazol 20 mg Litro⁻¹ entre los 30 y 45 DDE, dependiendo del desarrollo del cultivo de la variedad y de las condiciones climáticas.

CONCLUSIONES GENERALES

La reducción de más del 30 % de la radiación solar incidente al interior del invernadero repercute en la disminución significativa de biomasa total y en la partición de asimilados al órgano de interés.

La alta densidad de población (45 plantas m^{-2}) en cultivo hidropónico en invernadero con la variedad Gigant disminuye la acumulación de biomasa total y la partición de asimilados a los tubérculos por planta, e incrementó la tasa de crecimiento del cultivo, número de tubérculos y la producción de biomasa por unidad de superficie de invernadero.

Una aplicación de Paclobutrazol a 150 mg Litro⁻¹ o de Uniconazol a 20 mg Litro⁻¹ realizada a los 30 días después de la emergencia disminuyó el crecimiento en altura y área foliar de las plantas sin afectar el rendimiento en número y biomasa de tubérculos.

LITERATURA CITADA

- AGUILAR, L.M.G.; CARRILLO, S.A.J.; RIVERA, P.A.; GONZÁLEZ, H.A.V. 2006. Análisis de crecimiento y de relaciones fuente-demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). Revista Fitotecnia Mexicana 29: 145-156.
- AMES, M.; SPOONER, M.D. 2008. DNA from herbarium specimens settles a controversy about origins of European potato. American Journal of Botany 95: 252 – 257.
- BALAMANI, V.; POOVAIAH, B.W. 1985. Retardation of shoot growth and promotion of tuber growth of potato plants by Paclobutrazol. American Potato Journal 62: 363 – 369.
- BASU, P.S.; ASHOO, S.; GARG, I.D.; SUKUMARAN, N.P. 1999. Tuber sink modifies photosynthetic response in potato under water stress. Environmental and Experimental Botany 42: 25-39.
- BEADLE, L.C. 1988. Análisis de crecimiento vegetal En: COOMBS, J.; HALL, O.D.; LONG, S.P.; SCURLOCK, O.M. Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 17 – 21 pp.
- BOYD, N.S.; GORDON, R.; MARTIN, R.C. 2002. Relationship between leaf area index and ground cover in potato under different management conditions. Potato Research 45: 117 – 129.

CARRERA, E.; JACKSON, S.D.; PRAT, S. 1999. Feedback control and diurnal regulation of gibberellin 20-oxidase transcript level in potato. *Plant Physiology* 119: 765 – 773.

CHARLES-EDWARDS, D.; DOLEY, D.; RIMMINGTON. 1986. *Modelling Plant Growth and Development*. Academic Press, Sydney, Australia 229 p.

CHEN, C.T.; SETTER, T.L. 2003. Response of potato tuber cell division and growth to shade and elevated CO₂. *Annals of Botany* 91: 373-381.

DWELLE, B.R. 1985. Photosynthesis and Photoassimilate Partitioning. *in*: LI, H.P. (ed), *Potato Physiology*. Ed. Academic Press, USA. 35 – 58 pp.

FARRAN, I.; MINGO-CASTEL, M. 2006. Potato minituber production using aeroponics: Effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research* 83: 47-53.

FUJINO, K.; KODA, Y.; KIKUTA, Y. 1995. Reorientation of cortical microtubules in the sub-apical region during tuberization in single-node stem segments of potato in culture. *Plant Cell Physiology* 36: 891 – 895.

GARDNER, P. F.; PEARCE, B.R.; MITCHELL, L.R. 1990. *Physiology of Crop Plants*. Primera edición, Iowa State University. USA 187 – 208 pp.

GAWRONSKA, H.; DWELLE, B.R.; PAVEK, J.J. 1990. Partitioning of photoassimilates by potato plants (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by irradiance: II. Partitioning patterns by four clones grown under high and low irradiation. *American Potato Journal* 67: 163-176.

- GENT, N.P.M. 1995. Paclobutrazol or Uniconazol applied early in the previous season promotes flowering of field-grown *Rhododendron* and *Kalmia*. *Journal of Plant Growth Regulation* 14: 205 -210.
- GROCHOWSKA, M.; MEJÍA-MUÑOZ, J.M. 2003. Giberelinas En: JANKIEWICZ, S.L. *Reguladores del Crecimiento, Desarrollo y Resistencia en Plantas. Propiedades y Acción*. Mundi – Prensa. México 67 – 92 pp.
- HANNAPEL, J.D.; CHEN, H.; ROSIN, M.F.; BANERJEE, K.A.; DAVIES, J.P. 2004. Molecular controls of tuberization. *American Journal of Potato Research* 81: 263 – 274.
- HARVEY, M.R.B.; CROTHERS, H.S.; EVANS, E.N.; SELVY, C. 1991. The use of growth retardants to improve microtuber formation by potato (*Solanum tuberosum*) *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 27: 59-64.
- HUGHES, B.R.; KEITH, C.N.F. 2003. Effect of Paclobutrazol treatments on growth and tuber yields in greenhouse – grown Shepody seed potatoes. *Acta Horticulturae* 619: 271 – 277.
- JACKSON, D.S. 1999. Multiple signaling pathways control tuber induction in potato. *Plant Physiology* 119: 1-8.
- JEFFERIES, A. R.; MACKERRON, L. K. D. 1989. Radiation interception and growth of irrigated and droughted potato (*Solanum tuberosum*). *Field Crops Research* 22: 101-112.

JING, W.; ZHONGMIN, A.; XUEZAN, F.; JUNMING, L. 2004. Effect of Chlormequat on oversummering of potato plantlets *in vitro*. Plant Physiology 40: 441-442.

KHURANA, S. T.; MCLAREN, H. 1982. The influence of leaf area, light interception and season on potato growth and yield. Potato Research 25: 329 – 342.

LAWSON, T.; CRAIGON, J.; BLACK, R.C.; COLLS, J.J.; LANDON, G.; WEYERS, B. D. 2002. Impact of elevated CO₂ and O₃ on gas exchange parameters and epidermal characteristics in potato (*Solanum tuberosum* L.). Journal of Experimental Botany 53: 737-746.

LIM, H.T.; YOON, C.; CHOI, S.; DITHAL, S.P. 2004. Application of gibberellic acid and paclobutrazol for efficient production of potato (*Solanum tuberosum* L.) minitubers and their dormancy breaking under soilless culture system. Journal of the Korean Society for Horticultural Science 45: 189-193.

LOZOYA-SALDAÑA, H. AND GARCIA, R. G. 1996. Growth inhibitors in potato *in vitro*. II. Alar and Paclobutrazol. Agrociencia 30: 375-381.

LULAI, C.E. 2004. Proceedings from the symposium: recent advances in physiology of tuberization and dormancy. American Journal of Potato Research 81: 251 – 252.

MARTÍNEZ-GARCÍA, F.J.; GARCÍA-MARTÍNEZ, L.J.; BOU, J.; PRAT, S. 2002. The interaction of gibberellins and photoperiod in the control of potato tuberization. *J. Plant Growth Regulation* 20: 377-386.

MAUK, S.C.; LANGILLE, R.A. 1978. Physiology of tuberization in *Solanum tuberosum* L. Cis – Zeatin riboside in the potato plant: its identification and changes in endogenous levels as influenced by temperature and photoperiod. *Plant Physiology* 62: 438 – 442.

MCCOLLUM, E.R. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. II. Time by P-status interactions for growth and leaf efficiency. *Agronomy Journal* 70: 58-67.

MENZEL, C.M. 1985. Tuberization in potato at high temperatures: Interaction between temperature and irradiance. *Annals of Botany* 55: 35 – 39.

MORA, A. R. 1998. Dinámica del crecimiento y productividad de *Solanum tuberosum* L. en condiciones de temporal. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. De México. 165 p.

MORA, A.R.; ORTIZ, C.J.; RIVERA, P.A.; MENDOZA, C.C.A.; COLINAS, L.M.T.; LOZOYA, S.H.; RODRÍGUEZ, P.J.E. 2005. Comportamiento de la acumulación y distribución de biomasa. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11: 135 – 142.

MORA, A.R.; ORTIZ, C.J.; RIVERA, P.A.; MENDOZA, C.C.A.; COLINAS, L.M.T.; LOZOYA, S.H. 2006. Índices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. Revista Chapingo Serie Horticultura 12: 85-94.

MURO, J.; DÍAZ, V.; GOÑI, J.L.; LAMSFUS, C. 1997. Comparison of hydroponic culture and culture in peat/sand mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. Potato Research 40: 431 – 438.

NAMBARA, E.; AKAZAWA, T.; MCCOURT, P. 1991. Effects of the Gibberellin Biosynthetic Inhibitor Uniconazol on Mutants of Arabidopsis. Plant Physiology 97: 736 – 738.

NIU, G.; KOZAI, T.; MIKAMI, H. 1996. Simulation of the effects of photoperiod and light intensity on the growth of potato plantlets cultured photoautotrophically *in vitro*. Acta Horticulturae 440: 622-627.

PRAKASH, P.; CHETTI, M. B.; PATIL, S.S. 2001. Effect of plant growth regulators on growth parameters and yield in potato. Karnataka Journal of Agricultural Sciences 14: 938-942.

RADEMACHER, W. 2000. Growth retardants: Effects on giberellin biosynthesis and other metabolic pathways. Annual Review of Plant Physiology 51: 501 – 531.

RANALLI, P. 1997. Innovative propagation methods in seed tuber multiplication programmes. Potato Research 40: 439 – 453.

REX, L.B. 1992. Effect of two plant growth regulators on the yield and quality of russet burbank potatoes. *Potato Research* 35: 227 – 23.

RITTER, E.; ANGULO, B.; RIGA, P.; HERRÁN, C.; RELLOSO, J.; JOSE, S.M. 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research* 44: 127-135.

RODRÍGUEZ-FALCÓN, M.; BOU, J.; PRAT, S. 2006. Seasonal control of tuberization in potato: Conserved elements with the flowering response. *Annual Review of Plant Biology* 57: 151 – 180.

RODRÍGUEZ, P.J.E.; SAHAGÚN, C.R.; GASGA, P.; MORA, A.R. 2006. Programas de cómputo para la estimación de parámetros de regresión no lineal útiles en el análisis de crecimiento de cultivos. 52^{da} Reunión anual de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical. Sep. 24-30. San Juan, Puerto Rico.

ROLOT, L.J.; SEUTIN, H. 1999. Soiless production of potato minitubers using a hydroponic technique. *Potato Research* 42: 457-459.

RUBIO, C.O.A.; RANGEL, G.J.; FLORES, L.R.; MAGALLANES, G.J.V.; DÍAZ, H.C.; ZAVALA, Q.T.; RIVERA, P.A.; CADENA, H.M.; ROCHA, R.R.; ORTÍZ, T.C.; LÓPEZ, D.H.; DÍAZ, V.M.; PAREDES, T.A. 2000. Manual para la Producción de Papa en las Sierras y Valles Altos del Centro de México. SAGAR.INIFAP.CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Libro Técnico No. 1. Zinacantepec, Estado de México. 79 p.

- SHARMA, N.; KAUR, N.; GUPTA, A. K. 1998. Effects of gibberellic acid and Chlorocholine Chloride on tuberization and growth of potato (*Solanum tuberosum* L). Journal Science Food Agriculture. 78: 466-470.
- SHOBA, N. ; NATARAJAN, S. ; KANNAN, M. ; VEERARAGAVATHATHAM, D. 2004. Effect of cycocel and ethephon on tuber yield of sweet potato clones COCIP-1 and IGSP-9. Journal of Root Crops 30: 65-69.
- SPOONER, M.D.; MCLEAN, K.; RAMSAY, G.; WAUGH, R.; BRYAN, J.G. 2005. A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping. Proceedings of the National Academy of sciences of the United States of America 126: 14694 – 14696.
- STALLKNECHT, F.G. 1985. Tuber Initiation in *Solanum tuberosum*: Effect of Phytohormones and Induced Changes in Nucleic Acid and Protein Metabolism. pp 232-252. in: LI, H.P. (ed), Potato Physiology. Ed. Academic Press, USA.
- STRUIK, C.P.; WIERSEMA, G.S. 1999. Seed Potato Technology. Ed. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands 383 p.
- TEKALIGN, T; HAMMES, P.S. 2005. Growth and biomass production in potato grown in the hot tropics as influenced by Paclobutrazol. Plant Growth Regulation 45: 37 – 46.
- THORNTON, K.M.; MALIK, J.N.; DWELLE, B.R. 1996. Relationship between leaf gas exchange characteristics and productivity of potato clones grown at different temperatures. American Potato Journal 73: 63-77.

VREUGDENHIL, D.; SERGEEVA, I. L. 1999. Gibberellins and tuberization in potato. *Potato Research* 42: 471-481.

WOOLEY D. J.; WAEREING, P.F. 1972. Environmental effects on endogenous cytokinins and gibberellin levels in *Solanum tuberosum*. *New Phytology* 71: 1015-1025.

WURR¹ D. C. E.; HOLE¹, C. C.; FELLOWS¹ J.R.; MILLING¹, J.; LYNN, J.R.; O'BRIEN, P. J. 1997. The effect of some environmental factors on potato tuber numbers. *Potato Research* 40: 297 – 306.

XU, X.; LAMMEREN, V.A.M.A.; VERMEER, E. VREUGDENHIL, D. 1998. The role of gibberellins, abscisic acid, and sucrose in the regulation of potato tuber formation in vitro. *Plant Physiology* 117: 575 – 584.