

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

Subdirección de Estudios de Posgrado



**Modificación en los Ambientes Espectrales de Crecimiento y  
su Efecto Sobre el Comportamiento Fisiológico y Productividad  
de Lactuca sativa L. y Spinacia oleracea L.**

**T E S I S**

*Que como Requisito Parcial para Obtener  
el Grado de:*

**DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
*en la Especialidad de:*

**BOTANICA**

*Presenta:*

**ADALBERTO BENAVIDES MENDOZA**

Monterrey, N. L.

Abril de 1998

TD  
SB351  
.L6  
B4  
c.1



1080087098

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**MODIFICACION EN LOS AMBIENTES ESPECTRALES DE  
CRECIMIENTO Y SU EFECTO SOBRE EL COMPORTAMIENTO  
FISIOLÓGICO Y PRODUCTIVIDAD DE *Lactuca sativa* L. y  
*Spinacia oleracea* L.**

**T E S I S**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS CON ESPECIALIDAD EN  
BOTÁNICA**

**P R E S E N T A**

**ADALBERTO BENAVIDES MENDOZA**

MONTERREY, N.L.

ABRIL DE 1998



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
SUBDIRECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**MODIFICACION EN LOS AMBIENTES ESPECTRALES DE  
CRECIMIENTO Y SU EFECTO SOBRE EL COMPORTAMIENTO  
FISIOLÓGICO Y PRODUCTIVIDAD DE *Lactuca sativa* L. y  
*Spinacia oleracea* L.**

**TESIS**  
**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS CON ESPECIALIDAD EN  
BOTANICA**

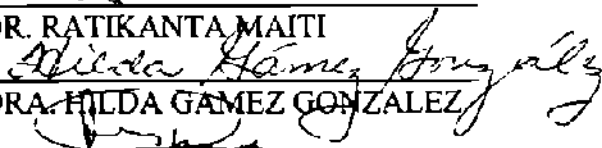
**PRESENTA**  
**ADALBERTO BENAVIDES MENDOZA**

**COMISION DE TESIS:**

**PRESIDENTE  
(DIRECTOR)  
SECRETARIO**

  
\_\_\_\_\_  
DR. RATIKANTA MAITI

**PRIMER VOCAL**


  
\_\_\_\_\_  
DRA. HILDA GAMEZ GONZALEZ

**SEGUNDO VOCAL**

  
\_\_\_\_\_  
DR. RAHIM FOROUGHBAKHCH

**TERCER VOCAL**

  
\_\_\_\_\_  
DRA. MA. JULIA VERDE STAR

  
\_\_\_\_\_  
DR. MOHAMED BADI

## **AGRADECIMIENTOS**

**Va mi agradecimiento a las siguientes personas considerando que es difícil reflejar con palabras la magnitud de mi deuda:**

**Al Dr. Edgar Quero por compartir su visión del futuro y por mantener un ambiente de trabajo orientado a la innovación.**

**A la Dra. Hilda Gámez y al Dr. Rahim Foroughbakhch por la minuciosa revisión y sugerencias acerca del escrito.**

**Gracias a M.C. Gloria Terán, Ing. Felipe Hernández, Ing. Ignacio Quero, Ing. Roberto Estrada e Ing. Enrique Guzmán por su camaradería, apoyo constante y cooperación en la colecta de los datos**

**A todas las personas que por razones de espacio no es posible incluir**

**A las siguientes instituciones:**

**Centro de Investigación en Química Aplicada (Saltillo, Coah.)**

**Frexport, S.A. de C.V. (Zamora, Mich.)**

**por el apoyo de materiales y tiempo necesarios para la realización de los trabajos.**

## **DEDICATORIA**

**Esta obra está dedicada a mi esposa Laura**

**A mis hijos Adalberto, Andrés y Alejandro**

**Afectuosamente para mis padres y mis hermanos**



## **INDICE DE CONTENIDO**

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	(pag. iii)
<b>DEDICATORIA</b>	(pag. iv)
<b>INDICE DE CONTENIDO</b>	(pag. v)
<b>INDICE DE CUADROS</b>	(pag. viii)
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	(pag. xi)
<b>RESUMEN</b>	(pag. 1)
<b>I. INTRODUCCION</b>	(pag. 8)
<b>II. REVISION DE LITERATURA</b>	(pag. 13)
<b>III. MATERIALES Y METODOS</b>	(pag. 29)
<b>3.1. EXPERIMENTO CON LECHUGA Y EL USO DE PELICULAS FOTOCROMATICAS</b>	(pag. 29)
<b>3.2. EXPERIMENTO CON ESPINACA Y EL USO DE FILTROS COLOREADOS DE POLIETILENO Y MALLA SOMBRA DE POLIETILENO</b>	(pag. 38)
<b>IV. RESULTADOS</b>	(pag. 45)
<b>4.1. EXPERIMENTO CON LECHUGA Y PELICULAS FOTOCROMATICAS</b>	(pag. 45)
<b>4.1.1. EL FLUJO DE RADIACION TRANSMITIDA POR LAS PELICULAS</b>	(pag. 45)
<b>4.1.2. EL BALANCE ESPECTRAL DE LA RADIACION BAJO LAS PELICULAS</b>	(pag. 47)
<b>4.1.3. LA INTEGRAL DE LA IRRADIANCIA FOTOSINTETICA (IRFA)</b>	(pag. 59)
<b>4.1.4. ASIMILACION DE CO<sub>2</sub> Y RESISTENCIA ESTOMATICA</b>	(pag. 63)
<b>4.1.4.1. ANOVA para el Testigo sin Película y Clases de Resina (PE y PP)</b>	(pag. 63)
<b>4.1.4.2. ANOVA para el Testigo sin Película y las Películas Blanco y con Aditivos Fotocromáticos</b>	(pag. 66)
<b>4.1.4.3. ANOVA para las Películas Blanco y las Películas con Aditivos Fotocromáticos en Distintas Concentraciones</b>	(pag. 67)
<b>4.1.4.4. Construcción de un Modelo de Respuesta de la Asimilación de CO<sub>2</sub> frente a la Cantidad y Calidad de la Radiación</b>	(pag. 69)
<b>4.1.5. ALTURA DE PLANTA</b>	(pag. 78)
<b>4.1.6. NUMERO DE HOJAS POR PLANTA</b>	(pag. 82)

4.1.7. AREA FOLIAR ESPECIFICA	(pag. 86)
4.1.8. PESO SECO TOTAL EN LA COSECHA	(pag. 90)
4.1.9. CONTENIDO RELATIVO DE MATERIA SECA	(pag. 95)
4.1.10. PESO PROMEDIO DEL REPOLLO	(pag. 99)
4.1.11. INDICE DE COSECHA	(pag. 103)
4.1.12. RENDIMIENTO	(pag. 107)
4.2. RESULTADOS DEL MODELO CAUSAL APLICADO AL EXPERIMENTO CON PLANTAS DE LECHUGA Y PELICULAS FOTOCROMATICAS	(pag. 111)
4.2.1. DESCRIPCION DE LOS NIVELES O SUBMODELOS DEL MODELO CAUSAL	(pag. 113)
4.2.2. ESTRUCTURA CAUSAL	(pag. 115)
4.2.3. MAGNITUDES DE LAS VIAS CAUSALES Y RECONSTRUCCION DE LAS CORRELACIONES	(pag. 118)
4.2.3.1. VARIABLE CANONICA DE ASIMILACION DE CO <sub>2</sub> (VCD)	(pag. 118)
4.2.3.2. AREA FOLIAR ESPECIFICA	(pag. 123)
4.2.3.3. BIOMASA SECA POR PLANTA	(pag. 125)
4.2.3.4. BIOMASA FRESCA POR PLANTA	(pag. 129)
4.2.3.5. PESO PROMEDIO DEL REPOLLO EN LA COSECHA	(pag. 132)
4.2.3.6. RENDIMIENTO	(pag. 134)
4.3. EXPERIMENTO CON ESPINACA Y FILTROS DE RADIACION DE POLIETILENO Y MALLAS SOMBRA	(pag. 137)
4.3.1. CONCENTRACION DE MINERALES EN BASE SECA	(pag. 137)
4.3.2. RELACION ENTRE LA DINAMICA TEMPORAL DE LA RADIACION Y ASIMILACION DE CO <sub>2</sub> Y LAS DE LOS CARACTERES MEDIDOS EN EL EXTRACTO DEL PECIOLO	(pag. 147)
4.3.2.1. RADIACION FOTOSINTETICAMENTE ACTIVA	(pag. 148)
4.3.1.2. ASIMILACION DE CO <sub>2</sub>	(pag. 149)
4.3.1.3. CONCENTRACION DE CO <sub>2</sub> EN EL MESOFILO	(pag. 152)
4.3.1.4. PUNTO DE COMPENSACION PARA LA ASIMILACION DE CO <sub>2</sub>	(pag. 153)
4.3.1.5. INDICE REFRACTOMETRICO DEL EXTRACTO DEL PECIOLO	(pag. 156)
4.3.1.6. POTENCIALES DE OXIDO-REDUCCION EN EL EXTRACTO DEL PECIOLO	(pag. 159)
4.3.1.7. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DEL EXTRACTO DEL PECIOLO	(pag. 162)
4.3.1.8. pH DEL EXTRACTO DEL PECIOLO	(pag. 164)
4.3.1.9. CONCENTRACION DE LOS IONES NITRATO, POTASIO Y SODIO EN EL EXTRACTO DEL PECIOLO	(pag. 166)

4.3.3. ACUMULACION DE BIOMASA Y MORFOLOGIA	(pag. 173)
4.3.3.1. PESO FRESCO Y SECO DE LAS PLANTAS	(pag. 174)
4.3.2.2. LONGITUD Y DIAMETRO DE LOS PECIOLOS Y AREA DE LA LAMINA FOLIAR	(pag. 180)
V. DISCUSION GENERAL	(pag. 184)
VI. CONCLUSIONES	(pag. 204)
VII. LITERATURA CITADA	(pag. 206)

## INDICE DE CUADROS

- Cuadro 1.** Resultados de los análisis de varianza de Kruskal-Wallis y pruebas de separación de medias para las variables de radiación. (pag. 46)
- Cuadro 2.** Valores promedio y error estándar para la densidad de flujo fotónico total (DFFT), la densidad de flujo fotónico de radiación activa para la fotosíntesis (DRFA), la densidad de flujo fotónico UV (DFFUV), la densidad de flujo fotónico azul (DFFA) y la densidad de flujo fotónico rojo (DFFR). (pag. 56)
- Cuadro 3.** Valores promedio y error estándar para los diferentes índices espectrales en cada tratamiento. (pag. 58)
- Cuadro 4.** Valores de la integral de irradiancia fotosintética (IRFA) en la temporada para los diferentes tratamientos al tiempo de la cosecha. (pag. 60)
- Cuadro 5.** Valores promedio y error estándar de la media para asimilación de CO<sub>2</sub> por unidad de área foliar (ASPRO) de resistencia estomática al flujo de CO<sub>2</sub> (REST) para los diferentes tratamientos. (pag. 64)
- Cuadro 6.** Valores promedio de asimilación de CO<sub>2</sub> (ASPRO) y resistencia estomática (REST) para las diferentes clases de resina y para el testigo son película. (pag. 65)
- Cuadro 7.** Valores promedio de asimilación de CO<sub>2</sub> (ASPRO) y resistencia estomática (REST) para los diferentes aditivos fotocromáticos, las películas blanco y el testigo sin película. (pag. 67)
- Cuadro 8.** Valores promedio de asimilación de CO<sub>2</sub> (ASPRO) y resistencia estomática (REST) para las diferentes concentraciones de aditivos fotocromáticos. (pag. 68)
- Cuadro 9.** Variables de radiación que forman el compuesto lineal de la variable canónica independiente (VCI). (pag. 70)
- Cuadro 10.** Variables de asimilación de CO<sub>2</sub> que forman el compuesto lineal de la variable canónica dependiente (VCD). (pag. 71)
- Cuadro 11.** Valores promedio y error estándar para la altura de planta (ALT) en centímetros para los diferentes tratamientos. (pag. 79)
- Cuadro 12.** Valores promedio y error estándar para el número de hojas por planta (NH) en los diferentes tratamientos. (pag. 84)
- Cuadro 13.** Valores promedio y error estándar para el área foliar específica (AFE) en m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> para los diferentes tratamientos. (pag. 87)
- Cuadro 14.** Valores promedio y error estándar para la biomasa seca total (PST) en g planta<sup>-1</sup> para los diferentes tratamientos (pag. 91)
- Cuadro 15.** Valores medios y error estándar para el contenido relativo de materia seca en unidades de g biomasa seca (g agua)<sup>-1</sup> en la cosecha. (pag. 97)
- Cuadro 16.** Promedios y error estándar de la media del peso promedio del repollo (PMR) considerando los diferentes factores experimentales, clase de resina utilizada en la fabricación de las películas, tipo de aditivo fotocromático y concentración de los mismos. (pag. 100)

- Cuadro 17.** Peso promedio de repollo (PMR) y error estándar de la media para cada tratamiento. (pag. 101)
- Cuadro 18.** Valores promedio y error estándar para el índice de cosecha en las diferentes clases de resina utilizada en la fabricación de las películas. (pag. 104)
- Cuadro 19.** Valores promedio y error estándar para el índice de cosecha en los diferentes tipos de fotocromático. (pag. 105)
- Cuadro 20.** Valores promedio y error estándar para el índice de cosecha (IC) en los diferentes tratamientos. (pag. 106)
- Cuadro 21.** Valores promedio y error estándar para el rendimiento en toneladas ha<sup>-1</sup> en los diferentes tratamientos. (pag. 109)
- Cuadro 22.** Valores de los coeficientes de los dos primeros vectores característicos de las variables de radiación. (pag. 113)
- Cuadro 23.** Variables incluidas en el modelo causal y abreviaturas de las mismas. (pag. 119)
- Cuadro 24.** Partición de las correlaciones en efectos directos e indirectos mediados por otras variables para la variable canónica de asimilación de CO<sub>2</sub>. (pag. 121)
- Cuadro 25.** Partición de las correlaciones en efectos directos e indirectos mediados por otras variables para la variable área foliar específica (AFE). (pag. 125)
- Cuadro 26.** Partición de las correlaciones en efectos directos e indirectos mediados por otras variables para la variable biomasa seca total por planta (PSTF). (pag. 127)
- Cuadro 27.** Partición de las correlaciones en efectos directos e indirectos mediados por otras variables para la variable biomasa fresca total por planta (PFTF). (pag. 131)
- Cuadro 28.** Partición de las correlaciones en efectos directos e indirectos mediados por otras variables para la variable peso promedio del repollo en la cosecha (PMR). (pag. 134)
- Cuadro 29.** Partición de las correlaciones en efectos directos e indirectos mediados por otras variables para la variable rendimiento por hectárea (REND). (pag. 136)
- Cuadro 30.** Concentración en milimoles por gramo de tejido seco de los diferentes elementos en los peciolo de las plantas de espinaca bajo las películas de polietileno y malla sombra. (pag. 140)
- Cuadro 31.** Concentración en milimoles por gramo de tejido seco de diferentes elementos en los folíolos de las plantas de espinaca bajo las películas de polietileno y malla sombra. (pag. 144)
- Cuadro 32.** Cociente de las concentraciones en milimoles por gramo de tejido seco de diferentes elementos en los peciolo y folíolos (folíolo/peciolo) de las plantas de espinaca bajo las películas de polietileno y malla sombra. (pag. 146)

**Cuadro 33.** Valores promedio y máximos de radiación fotosintéticamente activa (RFA) y de asimilación de CO<sub>2</sub> (A) para los diferentes tratamientos con película de polietileno (PE) y malla sombra simple (MSS) o doble (MSD). (pag. 149)

**Cuadro 34.** Valores promedio, máximo y mínimo de la concentración calculada de CO<sub>2</sub> en el mesófilo (C<sub>i</sub>) y valor del punto de compensación para la asimilación de CO<sub>2</sub> (A<sub>c</sub>) para los diferentes tratamientos con película de polietileno (PE) y malla sombra simple (MSS) o doble (MSD). (pag. 154)

**Cuadro 35.** Valores promedio, máximo y mínimo del índice refractométrico (brix) en el extracto de los peciolo para los diferentes tratamientos con película de polietileno (PE) y malla sombra simple (MSS) o doble (MSD). (pag. 159)

**Cuadro 36.** Valores promedio, máximo y mínimo de los potenciales de óxido-reducción en el extracto de los peciolo para los diferentes tratamientos con película de polietileno (PE) y malla sombra simple (MSS) o doble (MSD). (pag. 162)

**Cuadro 37.** Valores promedio, máximo y mínimo de la conductividad eléctrica (en unidades de  $\mu$ Siemens cm<sup>-1</sup>) en el extracto de los peciolo para los diferentes tratamientos con película de polietileno (PE) y malla sombra simple (MSS) o doble (MSD). (pag. 164)

**Cuadro 38.** Valores promedio, máximo y mínimo de pH (en unidades de log (H<sup>+</sup>)<sup>-1</sup>) en el extracto de los peciolo para los diferentes tratamientos con película de polietileno (PE) y malla sombra simple (MSS) o doble (MSD). (pag. 166)

**Cuadro 39.** Valores promedio, máximo y mínimo de concentración (en mMol l<sup>-1</sup>) de los iones nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), potasio (K<sup>+</sup>) y sodio (Na<sup>+</sup>) en el extracto de los peciolo para los diferentes tratamientos con película de polietileno (PE) y malla sombra simple (MSS) o doble (MSD). (pag. 172)

**Cuadro 40.** Valores medios y error estándar (E.E.) de la media para las variables de biomasa fresca y seca de las plantas. (pag. 175)

**Cuadro 41.** Valores promedio por tratamiento para la variable cantidad relativa de materia seca y el cociente de la biomasa seca de la raíz y la biomasa seca aérea. (pag. 178)

**Cuadro 42.** Valores medios y error estándar (E.E.) de la media para las variables longitud del peciolo (LP) en centímetros, diámetro del peciolo (DP) en milímetros y área foliar (AF) en centímetros cuadrados. (pag. 181)

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Relación entre la densidad de flujo fotónico de la radiación fotosintéticamente activa (DRFA) y la densidad de flujo fotónico total (DFFT) bajo las películas fotocromáticas. (pag. 49)
- Figura 2.** Relación entre la densidad de flujo fotónico de la radiación violeta-azul (DFFA) y la densidad de flujo fotónico total (DFFT) bajo las películas fotocromáticas. (pag. 52)
- Figura 3.** Relación entre la densidad de flujo fotónico de la radiación roja (DFFR) y la densidad de flujo fotónico total (DFFT) bajo las películas fotocromáticas. (pag. 54)
- Figura 4.** Valores acumulados desde la siembra hasta la cosecha de irradiancia fotosintética transmitida por las películas de polietileno (PE). (pag. 61)
- Figura 5.** Valores acumulados desde la siembra hasta la cosecha de irradiancia fotosintética transmitida por las películas de polipropileno (PP). (pag. 62)
- Figura 6.** Relación entre la variable canónica de radiación (VCI) y la variable canónica de asimilación de CO<sub>2</sub> (VCD). (pag. 74)
- Figura 7.** Relación entre la variable canónica de radiación (VCI) y la asimilación de CO<sub>2</sub> por unidad de área foliar (ASPRO) en unidades de  $\mu\text{M m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . (pag. 75)
- Figura 8.** Relación entre la variable canónica de radiación (VCI) y la asimilación de CO<sub>2</sub> por unidad de biomasa seca foliar (ASG) en unidades de  $\mu\text{M g}^{-1} \text{s}^{-1}$ . (pag. 76)
- Figura 9.** Correlación entre la altura de las plantas (ALT) en centímetros y la irradiancia total (IT) en  $\text{W m}^{-2}$ . (pag. 81)
- Figura 10.** Correlación entre el área foliar específica (AFE) en unidades de  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  y el índice de sesgo espectral azul/rojo (A/R). (pag. 89)
- Figura 11.** Respuesta de la biomasa seca por planta (PSTF) en la cosecha frente a la integral de la irradiancia fotosintética (IRFA) en  $\text{MJoules m}^{-2}$ . (pag. 93)
- Figura 12.** Respuesta del contenido relativo de materia seca (CRMS) en la cosecha frente a la integral de la irradiancia fotosintética (IRFA) en  $\text{MJoules m}^{-2}$ . (pag. 98)
- Figura 13.** Conjunto de relaciones de las variables incluidas en el modelo causal. (pag. 112)
- Figura 14.** Diagrama causal para la variable canónica de asimilación de CO<sub>2</sub> (VCD). (pag. 120)
- Figura 15.** Diagrama causal para la variable área foliar específica (AFE). (pag. 124)
- Figura 16.** Diagrama causal para la variable de peso seco promedio total por planta en la cosecha. (pag. 126)
- Figura 17.** Diagrama causal para la variable peso fresco promedio por planta en la cosecha. (pag. 130)
- Figura 18.** Diagrama causal para la variable para la variable peso fresco promedio del repollo en la cosecha. (pag. 133)

- Figura 19.** Diagrama causal para la variable rendimiento en toneladas por hectárea (REND). (pag. 135)
- Figura 20.** Concentración de nitrógeno (como  $\text{NO}_3^-$ ) en los peciolo de las plantas de cada tratamiento. (pag. 138)
- Figura 21.** Concentración de magnesio en los peciolo de las plantas de cada tratamiento. (pag. 139)
- Figura 22.** Concentración de nitrógeno (como  $\text{NO}_3^-$ ) en los folíolo de las plantas de cada tratamiento. (pag. 141)
- Figura 23.** Concentración de magnesio en los folíolo de las plantas de cada tratamiento. (pag. 143)
- Figura 24.** Valores del índice de las concentraciones de potasio en el folíolo y peciolo en las plantas de cada tratamiento. (pag. 145)
- Figura 25.** Variación en la densidad de flujo fotónico total de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) bajo las películas. (pag. 148)
- Figura 26.** Distribución a lo largo del día de los promedios de asimilación de  $\text{CO}_2$  en hojas individuales de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 150)
- Figura 27.** Variación dinámica del índice refractométrico en los extractos de peciolo de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 157)
- Figura 28.** Variación dinámica en el potencial de óxido-reducción (relativo a un electrodo de hidrógeno) del extracto de peciolo de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 160)
- Figura 29.** Distribución a lo largo del día de los promedios de conductividad eléctrica del extracto de peciolo de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 163)
- Figura 30.** Dinámica temporal de los valores promedio de pH en los extractos de peciolo de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 165)
- Figura 31.** Variación a lo largo del día de los promedios de concentración del ión nitrato en los extractos de peciolo de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 167)
- Figura 32.** Comportamiento dinámico de los promedios de concentración del ión potasio en los extractos de peciolo de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 169)
- Figura 33.** Variación dinámica de los promedios de concentración del ión sodio en los extractos de peciolo de plantas de espinaca bajo películas de polietileno y mallas sombra. (pag. 171)
- Figura 34.** Relación entre la biomasa seca total por planta (PST) en la cosecha frente a la densidad de flujo fotónico de radiación fotosintéticamente activa (RFA). (pag. 176)
- Figura 35.** Respuesta de la biomasa seca total por planta (PST) en la cosecha frente a los valores promedio de asimilación de  $\text{CO}_2$  en hojas individuales de plantas de espinaca. (pag. 179)