



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FRUTICULTURA

**CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA Y PRODUCTIVA DE DOS
VARIETADES MEXICANAS DE FRESA (*Fragaria x ananassa*)
PARA EL SUBTRÓPICO**

CELIA ESTRADA NOLASCO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO.

2011

La presente tesis titulada “**Caracterización fisiológica y productiva de dos variedades mexicanas de fresa (*Fragaria x ananassa*) para el subtrópico**”, realizada por la alumna **CELIA ESTRADA NOLASCO**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FRUTICULTURA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



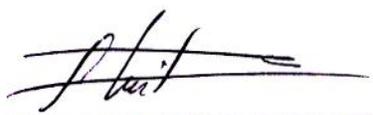
DR. GUILLERMO CALDERÓN ZAVALA

ASESOR:



DR. GREGORIO ARELLANO OSTOA

ASESOR:



DR. EDILBERTO AVITIA GARCÍA

CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA Y PRODUCTIVA DE DOS VARIEDADES MEXICANAS DE FRESA (*Fragaria x ananassa*) PARA EL SUBTRÓPICO

Celia Estrada Nolasco, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2011.

Se estudiaron parámetros fisiológicos y de rendimiento de cuatro distintas variedades de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), dos variedades mexicanas CP Zamorana (CP 02-01) y CP Jacona (CP 02-04) y dos variedades comerciales extranjeras (Festival y Giant). La evaluación se llevó a cabo en el periodo de otoño 2009. Se midieron variables de crecimiento, de producción y variables fisiológicas. El comportamiento de la transpiración (TT), conductancia estomática (CE) y la tasa de fotosíntesis neta (TF) varió durante el periodo de cosecha. Las variedades Zamorana y Jacona presentaron las mayores TF en comparación a las variedades introducidas. Así, las TF fueron mayores para la variedad Jacona, seguida de Zamorana, Festival y Giant. Las diferencias en TF entre las distintas variedades se tradujeron en cambios significativos en el peso promedio de fruto, producción y en los patrones de asignación de biomasa fresca y seca en las distintas variedades. El valor más alto del peso promedio del fruto se presentó en las variedades Zamorana, y Jacona. Las variedades Festival y Giant tuvieron menores valores en el peso promedio del fruto. Similarmente, los resultados mostraron que el rendimiento del fruto fue mayor en las variedades Zamorana y Jacona en comparación con las variedades extranjeras. El mayor aparato fotosintético interactuó positivamente con la mayor producción de materia fresca y seca en la variedad Zamorana. Esta variedad presentó mayor producción acumulada por planta, seguida de la variedad Jacona. Las variedades comerciales Festival y Giant no presentaron diferencias significativas entre ellas pero si valores significativamente menores respecto a las variedades nacionales. En suma, los cultivares mexicanos CP-Zamorana y CP-Jacona pueden ser una alternativa con mayor potencial de crecimiento y producción en comparación con las variedades Festival y Giant al ser cultivadas en climas subtropicales.

Palabras clave: Intercambio de gases; crecimiento; producción; rendimiento; *Fragaria x ananassa*.

PHYSIOLOGICAL AND REPRODUCTIVE DESCRIPTION OF TWO MEXICAN STRAWBERRIES (*Fragaria x ananassa*) VARIETIES IN A SUBTROPICAL AREA

Celia Estrada Nolasco, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2011.

In the present work physiological and yield variables of four strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch.) varieties were studied, two new Mexican varieties CP Zamorana and CP Jacona and two commercial and foreign varieties: Festival and Giant. The comparative evaluation was carried out in the fall of 2009. Growth fruit yield and physiological variables were evaluated. Transpiration rate (TR), stomatal conductance (SC) and net photosynthesis rate (Pn) changed over the evaluation period. Jacona and Zamorana varieties showed the highest Pn rates, were higher in Jacona followed for Zamorana, Festival and Giant. These differences in Pn resulted in significant changes in mean fruit weight, yield and fresh and dry biomass partitioning pattern among varieties. The highest mean fruit weight was showed in 'Zamorana' and 'Jacona'. Mexico. Similarly, yield was higher in Zamorana and Jacona compared with Festival and Giant. The higher leaf area showed a positive relationship with fresh and dry biomass production in the Zamorana variety. Also, this variety showed the higher yield per plant followed for Jacona. Commercial varieties Festival and Giant do not showed statistical differences between them, but significant and lower values compared with the Mexican varieties. In summary, the Mexican cultivars CP-Zamorana and CP-Jacona could be and excellent choice with higher growth and yield potential than the commercial varieties commonly used in subtropical areas.

Key words: Gas exchange; growth; yield, strawberry, *Fragaria x ananassa*.

*A mis padres Celia Nolasco Cruz y Andrés Estrada
Tinjero, por todo su apoyo y cariño. Los quiero.*

*A mis hermanas Pilar y especialmente a Ana María que
siempre estuvo para apoyarme y alentarme a seguir y a mi sobrino
Miguel Ángel por todo su cariño. Los quiero.*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad y el apoyo financiero que me brindo para realizar mis estudios de posgrado.

Al Colegio de Postgraduados, a sus profesores, trabajadores y compañeros, gracias por permitirme ser parte de esta comunidad y contribuir en mi formación de posgrado.

A mi consejo particular integrador por: Dr. Guillermo Calderón Zavala, Dr. Gregorio Arellano Ostoia y Dr. Edilberto Avitia García, gracias por su disposición de tiempo, paciencia, comprensión, calidez humana y por compartir sus conocimientos y experiencia en la investigación.

A la Dra. Doris Primavera Orea Corea, quien me impulsó a ingresar al Colegio de Postgraduados para realizar mis estudios de Maestría, gracias por sus consejos, recomendaciones y asesoría.

Al Dr. Juan Ignacio Valiente Banuet, por sus consejos, recomendaciones y apoyo durante la escritura de mi tesis, gracias por alentarme a seguir.

Al Dr. Carlos Trejo López, por su grata disposición, apoyo y por su invaluable orientación y recomendaciones que recibí dentro de su laboratorio y oficina.

Al M.C. Huitziméngari Campos García, por su disposición de tiempo, paciencia, comprensión y sus conocimientos y asesoría en el uso de los aparatos de laboratorio, por su amistad y consejos tan acertados y por la confianza de permitirme trabajar en el cubículo que desinteresadamente me ofreciste, gracias.

Al M.C. Wenceslao Santiago, por tu disposición de tiempo, por tu asesoría, por tu amistad y compañerismo, por los momentos de calidad que pasamos durante y fuera del Colegio.

A la M.C. Gisela por su disposición de tiempo, por permitirme estar en su área de trabajo y por su amistad incondicional.

Al M.C. Juan José Escobar Aguayo, por su tiempo, consejos, apoyo y guía que recibí a lo largo de mi formación académica y personal durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados, así como su amistad, amor incondicional y particular visión del mundo.

A mis grandes amigas Lilia y Ana Luisa que a pesar del tiempo y la distancia siempre están ahí para dar ánimo y compartir las alegrías de la vida.

CONTENIDO

Índice de cuadros.....	x
Índice de cuadros del apéndice.....	x
Índice de figuras.....	xi
I INTRODUCCIÓN	1
II REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Exportación e importación de fresa en México	3
2.2 Generalidades de la fresa.....	4
2.2.1 Cultivares de fresa en México	6
2.2.2 Crecimiento y desarrollo de la fresa	7
2.2.3 Nutrición y desarrollo del fruto.....	9
2.3 Partición de materia seca	11
2.3.1 Principales factores que afectan la partición de materia seca	12
2.3.1.1 Temperatura.....	12
2.3.1.2 Luz	13
2.3.1.3 Agua.....	13
2.4 Potencial de crecimiento.....	14
2.5 Producción	15
2.5.1 Calidad en fresa.....	16
2.5.1.1 Sólidos solubles totales o grados Brix.....	18
2.5.1.2 Color.....	18
2.5.1.3 Firmeza	19
2.5.1.4 Acidez titulable	20
2.6 Fotosíntesis de la fresa.....	22
2.6.1 Tasa fotosintética.....	23
2.6.2 Medición de fotosíntesis en planta completa.....	25
2.6.3 Fotosíntesis en plantas superiores.....	27
2.6.4 Dióxido de carbono	29
2.6.4.1 Efectos fisiológicos de la concentración de CO ₂	30
2.6.4.2 Factores que afectan el balance de carbono	31
2.6.4.3 Factores que afectan la fuente de carbono.....	32
2.6.4.4 Factores que afectan la demanda de carbono.....	36
2.6.5 Transpiración	39
2.6.5.1 Factores que afectan la transpiración.....	40
2.6.5.2 Importancia de la transpiración.....	42
2.6.6 Conductancia estomática.....	43

2.6.7 Agua	44
2.6.7.1 Eficiencia en el uso del agua en las plantas	45
2.6.7.2 Intercambio de gases y uso del agua en las plantas.....	47
III MATERIALES Y MÉTODOS	51
3.1 Localización del experimento.....	51
3.2 Material vegetal	51
3.3 Cultivo	52
3.4 Tratamientos y diseño experimental	53
3.5 Variables respuesta.....	53
3.5.1 Crecimiento del fruto	53
3.5.2 Producción y rendimiento de fruto.....	54
3.5.3 Variables fisiológicas.....	55
3.6 Análisis Estadístico.....	56
IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1 Crecimiento	57
4.1.1 Dinámica de crecimiento de fruto (diámetro)	57
4.1.2 Área foliar.....	58
4.1.3 Producción total y distribución de materia seca.....	60
4.1.4 Diámetro final y peso final de fruto	63
4.2 Producción y rendimiento de fruto	68
4.2.1 Dinámica de producción de fruto por planta	68
4.2.2 Producción mensual por planta	71
4.2.3 Producción acumulada total por planta	73
4.3 Variables fisiológicas	75
4.3.1 Tasa Fotosintética (TF)	75
4.3.2 Tasa Transpiratoria (TT)	82
4.3.3 Conductancia Estomática (CE)	85
4.3.4 Eficiencia en el Uso del Agua (EUA)	88
V CONCLUSIONES.....	90
VI RECOMENDACIONES.....	91
VII LITERATURA CITADA	92
VIII APÉNDICE	103

Índice de cuadros

Cuadro 1. Comparación de la Tasa de Asimilación de CO₂ (TF, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Tasa Transpiratoria (TT, en $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Conductancia Estomática (CE, en $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) de cuatro variedades de fresa durante el muestreo realizado el 17 de septiembre del año 2009 en Montecillo, Edo. de México.79

Cuadro 2. Comparación de la Tasa de Asimilación de CO₂ (TF, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Tasa Transpiratoria (TT, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Conductancia Estomática (CE, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) de cuatro variedades de fresa durante el muestreo realizado el 06 de octubre del 2009 en Montecillo, Edo. de México.80

Cuadro 3. Comparación de la Tasa de Asimilación de CO₂ (TF, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Tasa Transpiratoria (TT, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Conductancia Estomática (CE, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) de cuatro variedades de fresa durante el muestreo realizado el 20 de noviembre del año 2009 en Montecillo, Edo. de México.....81

Índice de cuadros del apéndice

Cuadro A1. Valores de cuadrado medio del error (CME), coeficiente de variación (CV) y prueba de significancia del modelo ($\text{Pr} > \text{F}$) para área foliar y biomasa seca.103

Cuadro A2. Valores de cuadrado medio del error (CME), coeficiente de variación (CV) y prueba de significancia del modelo ($\text{Pr} > \text{F}$) para diámetro final, peso final fresco de fruto, peso final seco de fruto y producción acumulada por planta.103

Cuadro A3. Valores de cuadrado medio del error (CME), coeficiente de variación (CV) y prueba de significancia del modelo ($\text{Pr} > \text{F}$) para tasa de asimilación de CO₂, tasa transpiratoria, conductancia estomática y eficiencia en el uso del agua.104

Índice de figuras

- Figura 1.** Desarrollo del fruto en el tiempo de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Las líneas muestran las tendencias dentro de cada variedad. Cada punto representa el dato de un fruto creciendo en invernadero en Montecillo, Edo. de México.58
- Figura 2.** Producción de área foliar de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio y la barra vertical indica la desviación estándar (n = 10). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).60
- Figura 3.** Producción total de materia seca y porcentajes de la partición de biomasa seca por compartimento u órgano (números) en cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero (n = 10). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) en materia seca total acumulada por planta.61
- Figura 4.** Diámetro final del fruto de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales arriba de cada columna) (n = 15). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).64
- Figura 5.** Biomasa fresca final del fruto de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales) (n = 15). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).66
- Figura 6.** Biomasa seca final del fruto de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales) (n = 15). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).67
- Figura 7.** Dinámica de producción de fruto acumulada por planta durante el periodo experimental de cuatro variedades de fresa en Montecillo, Edo. de México. Los datos son el promedio de 10 plantas por variedad.70
- Figura 8.** Comparación de la producción promedio mensual final por planta de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero en Montecillo, Edo. de México. Las columnas son el promedio más la desviación estándar (barras verticales). (n = 10). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).72
- Figura 9.** Producción total acumulada de fruto por planta de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero en Montecillo, Edo. de México. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales) (n = 10). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$).74

Figura 10. Fotosíntesis Neta de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero en Montecillo, Edo. de México.. Los datos son el promedio de tres mediciones en 10 plantas de cada variedad en cada medición. Las condiciones de Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y Temperatura (T° , en $^\circ\text{C}$) fueron como sigue: 17 de septiembre = 183.2 ± 39.1 , (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , $T^\circ = 26.7 \pm 0.8$; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , $T^\circ = 25.3 \pm 1.1$; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , $T^\circ = 27.4 \pm 0.9$; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , $T^\circ = 24.8 \pm 0.9$; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , $T^\circ = 27.5 \pm 0.6$; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , $T^\circ = 26.9 \pm 0.9$77

Figura 11. Transpiración de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero durante el periodo experimental. Los datos son el promedio + D.E. (n = 10). Se realizaron 7 muestreos los días 17 septiembre Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) = 183.2 ± 39.1 , Temperatura (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , $T^\circ = 26.7 \pm 0.8$; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , $T^\circ = 25.3 \pm 1.1$; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , $T^\circ = 27.4 \pm 0.9$; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , $T^\circ = 24.8 \pm 0.9$; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , $T^\circ = 27.5 \pm 0.6$; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , $T^\circ = 26.9 \pm 0.9$84

Figura 12. Conductancia estomática (g_s) de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero durante el periodo experimental. Los datos son el promedio + D.E. (n = 10). Se realizaron 7 muestreos los días 17 septiembre Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) = 183.2 ± 39.1 , Temperatura (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , $T^\circ = 26.7 \pm 0.8$; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , $T^\circ = 25.3 \pm 1.1$; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , $T^\circ = 27.4 \pm 0.9$; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , $T^\circ = 24.8 \pm 0.9$; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , $T^\circ = 27.5 \pm 0.6$; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , $T^\circ = 26.9 \pm 0.9$87

Figura 13. Eficiencia en el uso del agua (EUA) de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero durante el periodo experimental. Los datos son el promedio + D.E. (n = 10). Se realizaron 7 muestreos los días 17 septiembre Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) = 183.2 ± 39.1 , Temperatura (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , $T^\circ = 26.7 \pm 0.8$; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , $T^\circ = 25.3 \pm 1.1$; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , $T^\circ = 27.4 \pm 0.9$; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , $T^\circ = 24.8 \pm 0.9$; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , $T^\circ = 27.5 \pm 0.6$; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , $T^\circ = 26.9 \pm 0.9$89

I INTRODUCCIÓN

En México la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) se cultiva en ocho estados, durante el 2008, la superficie sembrada de fresa fue de 6.2 miles de hectáreas y con un volumen de producción de 207.5 toneladas; y durante el 2009, la superficie sembrada fue de 6.5 miles de hectáreas y un volumen de producción de 212.2 toneladas (SIAP, 2009). En el 2009, el estado de Michoacán ocupó el primer lugar con una superficie sembrada de 3.59 hectáreas, seguido por Baja California y Guanajuato con 1.55 y 1.04 ha, respectivamente. El estado de Michoacán participa con el 50% de la producción, seguido por Baja California que aporta el 28 % de la producción. El distrito de Zamora, estado de Michoacán, concentra la mayor producción de fresa del país (FAOSTAT, 2008).

La fresa es un frutal consumido principalmente en fresco, con ciclo vegetativo corto y como estrategia para incrementar el rendimiento se ha establecido su cultivo en sistemas especiales de producción. Para México el cultivo de la fresa es de gran importancia socioeconómica por su fuerte demanda de mano de obra y porque genera una elevada proporción de los ingresos por divisas que el país obtiene a través de las exportaciones frutícolas (Sánchez, 2008). La exportación de frutos de buena calidad y de producción temprana ha significado el ingreso de divisas importantes para México en el caso de fresa fresca. En el invierno participa con la exportación de fresa fresca a la mitad del mercado estadounidense y abastece a este mismo con el 90% de fresas congeladas (Juárez, 1998). Desafortunadamente, las plantas madre certificadas provienen originalmente de Estados Unidos de Norteamérica, de las universidades de

California y Florida que han creado variedades con amplia adaptación climática (Larson, 2000), lo que representa gran dependencia de nuestro país por este concepto; sin mencionar las dificultades para la adquisición de este material. Con base en la problemática anterior, en el Colegio de Posgraduados se han obtenido nuevas variedades de fresa, entre las que destacan CP Zamorana (CP 02-01) y CP Jacona (CP 02-04), como nuevas variedades mexicanas ya registradas en el catálogo del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS).

Bajo la hipótesis de que las variedades creadas en México presentan mejor desempeño productivo y fisiológico que las variedades extranjeras comerciales debido a su mejor adaptación al haber sido generadas en México es que se llevó a cabo la presente investigación en condiciones de invernadero, cuyo objetivo fue evaluar las características fisiológicas y de producción en las variedades obtenidas en el Colegio de Postgraduados (CP) con la finalidad de determinar su eficiencia en rendimiento, calidad de fruto y precocidad de la producción para así compararlas con las dos variedades extranjeras más comerciales en el valle de Zamora y Jacona, Michoacán, que se importan de California y Florida, E.U.A. Además de obtener información sobre la eficiencia fisiológica en el intercambio de gases, acumulación y partición de la materia seca de las variedades mexicanas, y conocer su capacidad productiva y potencial de crecimiento.

II REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Exportación e importación de fresa en México

La fresa es una de las frutas de mayor aceptación mundial y también una de las que tienen mayores usos, entre los que se encuentran su exportación e importación como producto fresco, en la industria congeladora, como saborizantes (en la elaboración de medicinas o repostería) entre otros (Zabetakis y Holden, 1997).

Durante el periodo 2007, España exportó 186.4 miles de toneladas y Estados Unidos 116.7 miles de toneladas, concentrando ambos países más del 50% de las exportaciones mundiales. Como tercer exportador destacó México con 66.9 miles de toneladas (FAOSTAT, 2008).

Con respecto a las importaciones de la fresa, Sánchez (2008) menciona que durante el periodo 2000 a 2005, México ocupó el décimo lugar en las importaciones mundiales. En el mismo periodo, Estados Unidos de Norte América ocupó el cuarto lugar. Durante el 2007, Francia ocupó el primer lugar en las importaciones, seguidos por Canadá, Alemania y Estados Unidos de Norte América (FAOSTAT, 2008).

Sánchez (2008) menciona que en los meses de octubre a diciembre, es cuando se tiene la cosecha de la primera floración, la oferta de fresa de Michoacán prácticamente no tiene competencia en el mercado nacional y menos en el de exportación, ya que la producción en Baja California inicia en febrero. Las ventanas de

producción y exportación entre México y Estados Unidos de Norte América son diferentes, mientras que este último presenta un déficit en la oferta local en su país durante el invierno tiene que recurrir a la importación del producto, principalmente de México, para abastecer su mercado interno y reexportaciones a otros países.

2.2 Generalidades de la fresa

La fresa, cuyo nombre procede del latín “Fragans”, fragante, es una rosácea, género *Fragaria* Linn., cuyas especies se encuentran difundidas por todas las zonas templadas y subtropicales.

Las especies americanas como *Fragaria chiloensis*, Duch. (2n=56) y *Fragaria virginiana*, Duch. (2n=56), han dado origen por cruzamientos a cultivares de fresa de frutos grandes que se conocen como *Fragaria x ananassa* Duch. (Maroto, 1986). Esta última es una planta herbácea perenne, constituida por una corona, estolones que enraízan fácilmente; hojas palmeadas trifoliadas y dentadas que se insertan mediante un peciolo a la corona (Brazanti, 1989). Las flores se reúnen en inflorescencias. El fruto es un poliaquenio conocido botánicamente como “eterio”, en el que la parte comestible, que es el receptáculo activado por la fecundación, y de hecho es un fruto falso, aloja numerosos aquenios (Maroto, 1988). Estas plantas poseen un sistema radical fasciculado, constituido por un gran número de raíces y raicillas, la mayor parte de las cuales (90%) se encuentran localizadas superficialmente. El tallo está constituido por un eje corto de forma cónica llamada corona en el que se observan numerosas escamas foliares. De esta corona pueden partir a través de yemas axilares unas

ramificaciones laterales denominadas estolones, que se caracterizan por poseer entrenudos muy distanciados entre sí, en los que aparecen rosetas de hojas y raíces adventicias. Estos estolones pueden a su vez ramificarse produciendo nuevos estolones.

La especie que más se cultiva es *Fragaria x ananassa* Duch. con una producción mundial cercana a los 2,000,000 de toneladas métricas. *F. vesca* L. y *F. moshata* Duch. son también cultivadas en forma comercial, pero en menor escala. *F. vesca* es cultivada en Europa y Norteamérica, y *F. moshata* se encuentra principalmente en Europa (Brazanti, 1989).

Las fresas cultivadas en la actualidad son un híbrido octaploide reconocido por *Fragaria x ananassa* Duch., el cual posee un número somático de 56 cromosomas y es producto de la cruce de *F. virginiana* L., nativa de Norteamérica y norte de México y *F. chiloensis* Duch., nativa de las costas Oeste de Norte y Sudamérica. Ambas especies son producto de una antigua poliploidización y selección natural (Brazanti, 1989). Es muy probable que las fresas cultivadas incluyan en su origen también a la *F. ovalis* que podría haber aportado el carácter de refloresciente y probablemente el de día neutro (Brazanti, 1989). El complejo origen de la especie y la facilidad con que se producen los cruzamientos explica la existencia de los diferentes cultivares y la posibilidad de obtener mediante un programa de mejoramiento genético tipos adaptados a los más variados fines y ambientes (Brazanti, 1989). Actualmente se tienen variedades o híbridos que presentan un rango de adaptabilidad amplio que pueden ser cultivadas en climas tropicales y subtropicales (Aspuria *et al.*, 1996; Larson y Shaw, 2000).

2.2.1 Cultivares de fresa en México

En el mundo se conocen más de 1000 variedades de fresa, producto de la gran capacidad de hibridación que presenta la especie. A partir de 1975 todas las plantas madres y nuevas variedades son fundamentalmente de viveros de los Estados Unidos de América (Vega, 2002). El cultivo de la fresa en Michoacán se basa en cultivares extranjeros, provenientes principalmente de la Universidad de California, Estados Unidos de Norte América (UC-EUA) (Sánchez, 2008). Sin embargo, este mismo autor, al hacer un análisis de los riesgos tecnológicos del actual sistema de producción de fresa en México, indica que la dependencia de la zona productora de Michoacán, y otras, del suministro de planta por parte de UC-EUA o sus concesionarios (Eurosemillas, por ejemplo) y el pago de regalías cada vez más costosas (con aumentos de 300% de 2001 a 2005) sólo por el uso de esas variedades registradas y protegidas, resultan en un aumento en los costos de producción y una menor rentabilidad (Sánchez, 2008).

En la región de Zamora, Michoacán las variedades que más se cultivan son 'Festival' con el 32% de la superficie total, Camino Real con el 28% y Aromas con el 20%; en la zona Norte-Centro las variedades Camino Real, Camarosa y Festival cubrieron el 97% de la superficie total (Sánchez, 2008).

Martínez-Bolaños (2008) menciona que la diferencia entre variedades responden a las diferentes orientaciones de mercado. Los exportadores compran por prioridad la variedad Camarosa y en menor grado Festival, Camino Real y Aromas. La industria busca las variedades Festival, Camino Real y Aromas (Sánchez-Sánchez, 2006).

La morfología de la planta y el aspecto que en conjunto presentan, son una manera de distinguir los cultivares. Algunas características, tales como el número de hojas, se utiliza para determinar la adaptación de los genotipos en cierta época del año (Branzanti, 1989). Larson y Shaw, (2000) mencionan que la forma y el tamaño de los frutos son características varietales, aunque se ven influenciados por la posición en la inflorescencia y otros factores ambientales.

La fresa es una planta altamente variable con adaptación a muchos climas y ambientes, y es posible producir fresas en casi todos los países y regiones del mundo. Con el uso de variedades mejoradas y técnicas avanzadas de producción, se produce fruta de alta calidad continuamente durante 6 o 7 meses, o más. La selección del sitio de producción y de variedades, y el cuidadoso empleo de técnicas de producción, son esenciales para lograr el máximo rendimiento y alta calidad con este cultivo (Larson, 2000).

2.2.2 Crecimiento y desarrollo de la fresa

Las principales variedades cultivadas en México son de día corto, es decir sus embriones florales se diferencian en otoño por lo que sólo tienen una floración anual. Otras variedades por el contrario, son de día largo y producen inflorescencias y frutos durante el verano. Sin embargo, estas variedades forman pocos estolones por lo que se propagan por esquejes, además de que tienen fecundación desuniforme durante los meses más cálidos, lo que causa un porcentaje alto de frutos mal formados (Brazanti, 1989).

El crecimiento de la fresa se ve fuertemente afectado por el fotoperiodo; los días largos promueven la formación e incremento del tamaño de la hoja; los días cortos tienen un efecto contrario, después de una exposición prolongada a éstas condiciones la planta entra en reposo y esta condición va caracterizada por la continua formación de hojas pequeñas y la ausencia o producción limitada de estolones. La acumulación de frío rompe el reposo y las plantas así tratadas producen hojas grandes y estolones aún en días cortos (Hancock, 1999).

El fotoperíodo, en relación con el termoperíodo (reacción de las plantas a la variación anual, diaria o aperiódica de la temperatura), determina la inducción de la floración, el comportamiento productivo y el área de distribución de las variedades (Bianchi, 1999).

Un crecimiento vigoroso de la fresa es esencial para poder producir grandes cantidades de buenos frutos. Para visualizar correctamente el desarrollo de la planta, es imprescindible tomar en cuenta factores tan importantes como la fertilidad de la planta, la temperatura y estación de maduración. El comportamiento de las plantas depende desde luego no solo del clima sino de la variedad. Algunas de las variedades de fresa son menos vulnerables que otras a los daños causados por diversos factores que afectan el desarrollo de la fresa (Hancock, 1999).

En la planta de fresa se presenta una curva de crecimiento sigmoideal, ésta curva presenta el tamaño acumulado como función del tiempo. Se pueden reconocer en general tres fases principales: una logarítmica, una lineal y una de senescencia. La manipulación de la densidad de plantación es una herramienta utilizada para optimizar

la producción en el cultivo de la fresa. Los aumentos de volumen (tamaño) a menudo se cuantifican en forma aproximada midiendo la expansión en sólo una o dos direcciones, como longitud, diámetro o área (Dávalos, 1999).

Debido a los problemas ocasionados por el contenido variable de agua, se prefiere emplear el aumento en materia seca de una planta o parte de ella como medida de su crecimiento (Hunt, 1978).

2.2.3 Nutrición y desarrollo del fruto

El crecimiento y fructificación de la fresa al igual que en otras especies frutales, son consecuencia de la actividad fotosintética y de la absorción de agua y nutrimentos del suelo por las raíces. El hidrógeno, carbono y oxígeno pueden ser absorbidos del agua y del aire sirviendo a la planta para formar hidratos de carbono y otros compuestos que junto con algunos minerales (Ca, Mg, Zn, Fe, B, Mo, Mn, Cu,) son importantes en el metabolismo de las plantas (Brazanti, 1989).

La fresa debido a sus altos rendimientos, lo corto de su ciclo y lo poco profundo de sus raíces explota intensamente una pequeña capa de suelo (20cm), requiriendo por consiguiente suelos fértiles y ricos en materia orgánica que constituya una fuente importante de nutrimentos disponibles fácilmente y de forma lenta (Bianchi, 1986).

La fresa es una especie muy exigente en cuanto a elementos nutritivos se refiere. Las cantidades de fertilizante extraídas por hectárea resultan ser las más altas entre las especies hortofrutícolas (Bianchi, 1986). La rápida producción de fruto es causa de un consumo acelerado de fertilizantes y muy particularmente de materia orgánica para

mantener la fertilidad del suelo, dependiendo de ésta para prolongar la permanencia del cultivo (Jurik, *et al.*, 1982).

Es únicamente la presencia de materia orgánica y de humus, lo que asegura la mejor utilización de los abonos minerales y su posibilidad de regular la asimilación por parte de la planta, manteniendo el suelo en una actividad constante y equilibrada. Y así como en las plantaciones frutales se considera como suficiente la presencia de un 2% de materia orgánica, para la fresa es conveniente llegar al 3% e incluso más (Brazanti, 1989).

La fresa tiene una demanda alta de nitrógeno y potasio debido a que son los mayores componentes de la fruta. Dosis óptimas de nitrógeno, fósforo y potasio son esenciales para el desarrollo del cultivo. Sin embargo, niveles excesivos de nitrógeno producen frutos blandos, retardan la maduración, disminuyen el rendimiento e incrementan la proliferación de enfermedades provocadas por hongos (Hancock, 1999).

El potasio se requiere en procesos fisiológicos tales como la activación de enzimas, el transporte de azúcares, funciones estomáticas, síntesis de proteínas y fotosíntesis (Maas, 1998); incrementa la producción floral y el rendimiento en fruta (Albregts *et al.*, 1991). El calcio es importante para la firmeza de los frutos. La deficiencia de boro reduce la producción de polen viable, así como la expansión del receptáculo. La deficiencia de zinc produce frutos pequeños y bajo rendimiento, mientras que la deficiencia de hierro reduce el vigor de las hojas (Hancock, 1999).

2.3 Partición de materia seca

La partición de materia seca es un indicador de la distribución de carbono (fotoasimilados) hacia los distintos puntos de demanda en crecimiento, por lo que puede considerarse como un parámetro muy importante en la determinación de la productividad (García y Guardiola, 2003).

Aunque la respuesta fotosintética y respiratoria determinan la cantidad de carbono disponible para crecimiento de los diferentes órganos componentes de las plantas, el rendimiento real de fruto depende de la partición de ese carbono hacia sus componentes; y esa partición es afectada en gran medida por las prácticas de manejo; factores ambientales, principalmente temperatura (García y Guardiola, 2003), luz, agua, por la fuerza de demanda (potencial de crecimiento de los órganos) y la proximidad de la fuente (Esparza *et al.*, 1999); asimismo, la carga de frutos también afecta la partición de recursos (fotoasimilados) entre el crecimiento vegetativo y reproductivo (Corelli-Grappadelli y Lakso, 2004).

Existen varias etapas en la partición de productos fotosintéticos. En el desarrollo de la hoja, los fotoasimilados son repartidos como material exportado y material destinado para el crecimiento de la misma hoja o como almacén temporal. Los fotoasimilados exportados son repartidos entre diferentes puntos de demanda, y la competencia entre los órganos que demandan asimilados es determinada, en parte, por la capacidad intrínseca de demanda de los órganos (Ho, 1988), así como por el vigor de la planta, el cual es afectado por el cultivar, nutrición, estado hídrico y producción (Lakso *et al.*, 2001).

2.3.1 Principales factores que afectan la partición de materia seca

2.3.1.1 Temperatura

Las temperaturas bajas pueden causar cambios en la partición de la materia seca entre los órganos en crecimiento, y también en la acumulación de almidón y carbohidratos solubles; es posible que el crecimiento sea más sensible a las temperaturas bajas, afectando de manera crítica a la fotosíntesis. Una reducción en la fotosíntesis foliar debido a una caída de la temperatura, se relaciona con un aumento en el almacén de fotosintatos, resultado del crecimiento lento y de una demanda baja de fotoasimilados debido a la temperatura baja, en lugar de un efecto directo de la temperatura en función de la hoja (Wardlaw, 1990). Por lo anterior, es importante considerar una buena condición fotosintética para maximizar la acumulación de materia seca, la cual se logra entre los 20 y 35°C para la mayoría de las plantas C₃, temperatura a la cual se incrementa la importación y exportación de carbohidratos (Jonson y Lakso, 1986). A temperaturas superiores de los 35°C, inician los problemas con la producción de ATP y NADPH, limitando con esto la fijación de CO₂ por lo que la formación de la ribulosa bifosfato se vuelve un factor limitante y con una temperatura extremosa (mayor a 47°C), los fotosistemas de este tipo de plantas (C₃) son destruidos y consecuentemente, la importación y exportación de carbono entre los órganos de la planta se afecta drásticamente (García y Guardiola, 2003).

Así, el efecto de temperatura en la partición de carbono es muy importante, pero no hay reportes en la literatura de trabajos experimentales específicos en busca de la respuesta directa a la temperatura. En la generación de modelos fisiológicos de

cultivos, la temperatura es un componente ambiental imprescindible y esencial pues es necesario para calcular el balance de carbono, cuyos componentes (fotosíntesis de planta completa y la respiración de órganos) son altamente sensibles a la temperatura (Lakso *et al.*, 2001).

2.3.1.2 Luz

La luz puede tener un efecto considerable en el crecimiento vegetativo y reproductivo, por lo que el rendimiento se relaciona íntimamente con el total de intercepción de luz por unidad de área foliar. Durante el desarrollo del fruto, el sombreado disminuye el rendimiento, el tamaño, color y sólidos solubles del fruto, incluso puede inducir la caída del fruto (Flore y Layne, 1999).

2.3.1.3 Agua

La sequía influye en la partición de la materia seca entre órganos en competencia y depende en gran parte de la estación, el clima y los órganos con alto potencial demandante. Si la sequía ocurre en primavera, cuando el desarrollo vegetativo es alto y relativamente bajo el desarrollo reproductivo, es el crecimiento vegetativo el primero en sufrir la alteración por falta de agua. A principios de la primavera las raíces tienen prioridad para crecer, seguido por el crecimiento de los brotes vegetativos. Durante el segundo estado de crecimiento del fruto, cuando la acumulación de materia seca es más baja, el desarrollo vegetativo se incrementa por aplicaciones de agua y se suprime por sequía, con pequeños efectos en el desarrollo del fruto. En contraste, en la tercera etapa de desarrollo, el fruto es notablemente afectado por sequías al igual que los

brotos vegetativos. En general, los diferentes órganos son afectados por sequía en el siguiente orden: crecimiento foliar > extensión radical > emergencia foliar > diámetro del tallo (Flore y Layne, 1999).

Bajo condiciones de sequía, el nivel de carbohidratos solubles en las hojas se incrementa en algunas especies. Esta acumulación u osmoregulación en las hojas de las plantas en estrés por agua, es probablemente el resultado de una reducción del crecimiento y de una lenta utilización de carbohidratos por deficiencia de agua. Sin embargo, la respuesta a la sequía depende del estado de desarrollo de la planta (Wardlaw, 1990).

2.4 Potencial de crecimiento

La producción de fotoasimilados a través de la fotosíntesis y su distribución dentro de la planta son procesos importantes que ayudan a determinar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Forney y Breen, 1985) (citado por Becerril et al., 1995). El crecimiento de las plantas es resultado de complejas inter-relaciones entre los procesos fisiológicos y morfológicos en los meristemas, la respuesta a factores internos y externos, y el suministro de los metabolitos y nutrientes inorgánicos (Moorby, 1981) (citado por Becerril et al., 1995). Por lo tanto, para mejorar el crecimiento vegetal y el desarrollo (rendimiento) debe haber una correlación entre los procesos fisiológicos y morfológicos de la planta.

La partición de carbono ocurre a nivel intracelular, pero afecta a toda la planta; esto es determinado por la abundancia de tejidos fuente y demanda. La eficiencia en el

control de la partición de carbono asimilado es crucial para la productividad de una planta. El control de la partición de carbono es el resultado de varios factores actuando a nivel celular, hoja o sistema, los cuales están afectando la demanda de carbono en los diferentes órganos (Pessarakli, 1997).

En general, zonas de demanda son competencia y los fotoasimilados son distribuidos en todos esos puntos de acumulación de materia seca; sin embargo, el potencial de la demanda de órganos individuales varía con la estación anual y edad de la planta, puesto que la demanda potencial de crecimiento y el patrón de desarrollo estacional de la planta cambian con el tiempo. Por lo anterior, el alto potencial de crecimiento de los órganos está estrechamente relacionado con el rendimiento de los cultivos (Hopkins, 1999).

La demanda para la producción y partición de materia seca se demuestra de tres maneras: 1) por incremento en la tasa fotosintética neta o un retardo en la disminución de la tasa fotosintética; 2) incremento en la translocación de carbono a las partes altamente demandantes; y 3) mayor producción de materia seca por unidad de área foliar (Flore y Layne, 1999).

2.5 Producción

Los factores que influyen en el rendimiento de fresa por hectárea son numerosos. Las condiciones climáticas; edafológicas y tecnológicas del cultivo son algunas de ellas. En los principales estados productores de fresa en nuestro país, se obtiene un rendimiento promedio 32 Ton ha⁻¹ a campo abierto (Farías, 2002). Sin embargo los

mejores rendimientos promedio a nivel mundial son de 49, 40 y 31 Ton ha⁻¹ para Estados Unidos, España y México respectivamente (FAO, 2005). El incremento del rendimiento está ligado a cambios en la fijación fotosintética de bióxido de carbono (Gifford *et al.*, 1984).

En el cultivo de la fresa, los factores más importantes para asegurar su rendimiento y calidad inician desde la selección de cultivares, los cuales varían en calidad, definida principalmente por la firmeza, contenido de azúcar y la acidez de los frutos; así como la susceptibilidad de los mismos a enfermedades (Mitcham, 1996).

Las variedades de fresa con mejor comportamiento y mayor productividad son conocidas como de bajos requerimientos de frío. Estas variedades se han caracterizado por presentar floración permanente. Probablemente las variedades con mayor capacidad de adaptación y de producción en condiciones tropicales de altura sean aquellas que reúnan características de floración permanente bajo condiciones de día corto o largo, de bajos a muy bajos requerimientos de frío y que no presenten la tendencia a entrar en latencia en días cortos (Hochmuth, *et al.*, 1991) (Shaw y Hansen, 1993) (Huber, 1997).

2.5.1 Calidad en fresa

Los datos de respiración expresan con precisión la edad, en especial en las etapas de maduración. Se mide la respiración en diferentes fechas de cosecha y se decide cuál es la mejor fecha de cosecha. Esto puede estar correlacionado con la posición en la curva respiratoria (Azodanlou *et al.*, 2003).

En general en cualquier fruto es evidente que el grado de madurez puede medirse mediante la determinación de ciertas características físicas y químicas del producto. Las determinaciones químicas ofrecen la ventaja de que, en numerosas ocasiones, estas características están relacionadas con las sensaciones que despierta al consumo del producto (por ejemplo, dulzor, acidez, color, aroma, forma y tamaño.). La calidad de las frutas no se puede mejorar, pero se puede conservar. La buena calidad se obtiene cuando la cosecha se hace en el estado de madurez apropiado (Gossinger, 2009).

El principal objetivo de los productores es producir una fruta de aspecto atractivo (tamaño, color y forma) (Azodanlou *et al.*, 2003). Mientras que los consumidores de la fresa, son atraídos por el color rojo brillante y aroma típico de una fruta fresca (Scalzso *et al.*, 2005a). Capocasa *et al.* (2008) mencionan que en los últimos años, la investigación se ha centrado en la seguridad alimentaria y calidad nutricional de la fruta. Las frutas de calidad se destinan directamente a la comercialización como fruta fresca, mientras que las de segunda calidad son sometidas a un tratamiento posterior, por lo tanto, las empresas de transformación dependen a menudo de las variedades, que son principalmente para el consumo en fresco (Wesche-Ebeling y Montgomery, 1990). Sin embargo, hay un número creciente de empresas de transformación que ofrecen una amplia variedad de productos de fresa: frutas congeladas, concentrados, mermeladas, jugo, néctar, jarabe, productos lácteos, entre otros (Gossinger, 2008).

Estudios sobre la evaluación objetiva de la cantidad total de parámetros de calidad como color, firmeza, acidez titulable, SST y firmeza (Douillard y Guichard,

1990), los niveles de estos compuestos, tienen una influencia positiva sobre la vida útil de frutas, la resistencia a las enfermedades y la salud humana.

El cultivar y condiciones de crecimiento son importantes para los parámetros de calidad del fruto. Wills, *et al.* (1998) hacen referencia a los siguientes aspectos de los frutos en general:

2.5.1.1 Sólidos solubles totales o grados Brix

El contenido en azúcar se puede medir directamente por procedimientos químicos pero, sólo si éstos son el componente mayoritario de los sólidos solubles, resulta más fácil, e igualmente útil determinar los sólidos solubles totales en el jugo extraído, mediante un refractómetro o densímetro. Estos instrumentos se basan en la medida de la refracción de la luz a su paso a través de una muestra pequeña del jugo y en la relación entre densidad del jugo y contenido en azúcares, respectivamente (Azodanlou *et al.*, 2003).

2.5.1.2 Color

En varios frutos, la desaparición del color verde (frecuentemente designado como color de fondo) constituye un buen índice de su grado de madurez. Inicialmente, se produce una pérdida gradual de la intensidad del color verde oscuro, hasta alcanzar una tonalidad más clara y en algunos productos, la total desaparición del verde, acompañada de la aparición de un color amarillo, rojo o púrpura (Wesche-Ebeling y Montgomery, 1990).

2.5.1.3 Firmeza

La vida poscosecha de las frutas y hortalizas se ha definido tradicionalmente en términos de apariencia visual (frescura, color y ausencia de alteraciones fisiológicas) y la textura (firmeza, jugosidad y textura crujiente). Aunque este concepto implica el atractivo estético y las propiedades mecánicas asociadas con la calidad, no tienen en cuenta el sabor y la calidad nutricional (Pelayo *et al.*, 2002).

El control de la calidad comienza en el campo, con la selección de la calidad máxima en el momento adecuado de la cosecha (Strum *et al.*, 2003). La fresa es un fruto no climaterico, por lo tanto, la maduración y senescencia es rápido, debido a una alta tasa de respiración y a la producción de etileno ($75 \text{ ml de CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a 15 °C , y la calidad de los frutos disminuyen rápidamente después de la cosecha (Kader, 2002; Knee *et al.*, 1997; Wills *et al.*, 2004).

Durante la maduración, se produce la disminución de la firmeza del fruto, como consecuencia del proceso de ablandamiento, que implica modificaciones bioquímicas e histológicas (Brownleader *et al.*, 1999). Los cambios bioquímicos importantes en las paredes celulares de la fresa implican el aumento de la fracción de pectina, y los cambios histológicos son causados por modificaciones en la composición y paredes estructurales de la célula de la fruta (Redgwell *et al.*, 1997). En fresa, Jiménez-Bermúdez *et al.*, (2002) mencionan que durante la maduración, se reduce la expresión del gen que codifica la síntesis de Pectatoliasa y por lo tanto, reduce el ablandamiento del fruto. Como consecuencia de ello, el fruto debe ser cosechado en plena madurez,

listo para el consumo, esto significa que hay un periodo corto en que la fruta presenta su mayor calidad.

2.5.1.4 Acidez titulable

La acidez titulable es fácil de determinar en el jugo extraído, mediante titulación con una disolución alcalina (habitualmente NaOH 0,1N), hasta el viraje de un indicador de pH (generalmente fenolftaleína) o hasta alcanzar un pH específico (generalmente 8.1). Durante la duración fisiológica y organoléptica, con frecuencia, decae la acidez muy rápidamente.

Entre las especies de frutas, las fresas contienen mayor cantidad de actividad antioxidante total por ejemplo, de 2 a 11 veces más que tienen las manzanas, melocotones, peras, uvas, tomates, naranjas y kiwis (Scalzso *et al.*, 2005a). Es una fuente de ácido ascórbico (AA), antocianinas y flavonoides, y fuente rica entre los alimentos en contenido de vitamina C y ácido fólico (Guo *et al.*, 2003; Olsson *et al.*, 2004), posee un mayor contenido de agua, menor contenido de carbohidratos de bajo peso molecular y una mayor relación glucosa/fructosa (Olsson *et al.*, 2004; Vinson *et al.*, 2008).

Los azúcares y ácidos orgánicos son los compuestos que contribuyen significativamente en el sabor de muchas frutas. En la fresa, los carbohidratos solubles se acumulan en el fruto en forma de glucosa, fructosa y sacarosa, que representan aproximadamente el 99 % del contenido total de azúcares y el resto formada por sorbitol, xilitol y xilosa, aunque la cantidad de glucosa, fructosa y sacarosa varía con el grado de madurez del fruto (Hubbar *et al.*, 1991; Pérez *et al.*, 1997). El contenido de

carbohidratos solubles depende del genotipo y las condiciones climáticas. Sin embargo, el contenido total de azúcares normalmente se encuentra dentro del rango de 70 a 100 mg en 100 g de fruta fresca (Hubbard *et al.*, 1991).

Pérez *et al.* (1997) han encontrado una de correlación bajo para los sólidos solubles (SST) y azúcares totales, acidez titulable (AT) y total de los ácidos orgánicos, por lo tanto, los parámetros no son suficientemente buenos para la evaluación de la calidad de la fresa. Strum *et al.* (2003) mencionan que los componentes de la calidad pueden ser sensoriales y nutricionales.

El ácido cítrico es el ácido orgánico principal en el fruto de la fresa y el ácido ascórbico es la forma predominante de la vitamina C (Lee y kader, 2000), su concentración varía entre 9.15 y 20.27 g K⁻¹ en la etapa madura del fruto (Cordenunsi *et al.*, 2002; Kafkas, *et al.*, 2004); mientras que el contenido de antocianinas varía entre 10 y 80 mg/100 g de fruta fresca (Heinonen *et al.*, 1998; Zabetakis *et al.*, 2001) y en jugo el contenido varía entre 21 y 333 mg /L (Garzón y Worlstad, 2000); la variación se debe al estado de madurez, variedad y a las condiciones ambientales (Haffner *et al.*, 1998).

Las concentraciones de ácido ascórbico son generalmente más altas en los frutos maduros en comparación con la fruta no madura (Olsson *et al.*, 2004). Cada variedad presenta diferencias en contenido de antioxidantes y de vitamina C, antocianinas y ácido fólico en los frutos (Tulipani *et al.*, 2009).

2.6 Fotosíntesis de la fresa

Las hojas de fresa exhiben fotosíntesis tipo C3 como las hojas de la mayoría de otros cultivos de fruto; asimilando el carbón como CO₂ en el ciclo de Calvin vía Rubisco (ribulosa bifosfato carboxilasa-oxigenasa). Los frutos de fresa requieren 30 Kcal o 128 KJ para producir 100 g de fruto, energía que en última instancia deriva de la fotosíntesis de las hojas y fotoasimilados convertidos a diferentes compuestos en el fruto (Blanke, 2002).

Oda (2002), encontró que el rango de la tasa de máxima fotosíntesis para *F. linumae*, *F. nipponica* y *F. yezoensis* fue de 16 a 22 mg CO₂·dm⁻²·h⁻¹. No hubo diferencia significativa en la tasa de fotosíntesis en las tres especies.

Las hojas de fresa contienen clorofilas en un rango aproximado de 1.5 – 2 mg de clorofila·g⁻¹ MF, más del doble de clorofila que en los frutos que va de 0.2 – 0.6 mg de clorofila·g⁻¹ MF (Blanke, 2002). Existe suficiente variación entre las especies de fresas para mejorar el aumento de las tasas fotosintéticas.

La temperatura fotosintéticamente óptima parece variar según la especie y las condiciones climáticas. Plantas de *F. vesca* L. mantienen una temperatura de 10/2°C durante el día y la noche, muestra un pico en la temperatura de 15-20°C, mientras que la óptima se mantiene alrededor de los 25°C. Plantas de *F. virginiana* Duch. también se aclimatan rápidamente a altas temperaturas (25-30°C) (Dale y Luby, 1990).

Las fresas responden positivamente a los aumentos de la concentración de CO₂ en un corto plazo. La prolongada exposición a altas concentraciones de CO₂

generalmente resulta en una reducción en la tasa fotosintética, aunque los mecanismos varían entre genotipos. Por ejemplo, '*Raritan*' reduce la cantidad de proteína dividiéndola a enzimas fotosintéticas, mientras '*Midway*' experimenta desactivación de la Rubisco, la llave de la enzima fotosintética. Estos cambios parecen estar a nivel de transcripción de genes, como la cantidad de RNA mensajero de Rubisco es enormemente reducida en '*Raritan*' después de pocas semanas de exposición a altas concentraciones de CO₂ (Dale y Luby, 1990).

Se produce una variación considerable en la dinámica estacional de CO₂ de las fresas. El balance de CO₂ acumulado de *F. vesca* y *F. virginiana* silvestres es negativo durante la mayor parte de la estación de fructificación. La etapa de desarrollo de la fresa tiene una considerable influencia en las tasas de asimilación de CO₂. Las hojas totalmente expandidas de 10-20 días de edad son las que presentan las más altas tasas fotosintéticas, y las hojas más jóvenes son más sensibles al cambio ambiental que las primeras hojas. Las plantas de fresa durante la diferenciación y fructificación presentan mayor tasa fotosintética que las plantas en flor (Dale y Luby, 1990).

La eliminación del fruto frecuentemente se traduce en una disminución de la tasa de asimilación de CO₂ en cada hoja por lo menos un par de semanas. La tasa fotosintética total por cada planta no siempre se reduce, sin embargo, a medida que aumenta la superficie foliar total se produce el desarrollo floral (Dale y Luby, 1990).

2.6.1 Tasa fotosintética

La tasa fotosintética máxima o asimilación de CO₂ en fresa son comparables con muchos otros cultivos frutales. La tasa de asimilación del CO₂ en cultivos de fresa

Fragaria x ananassa Duch., el rango va de 15 a 25 $\mu\text{mol/s/m}^{-1}$ en campo (Hancock et al., 1989). Tasas fotosintéticas son intermedias en especies progenitoras *Fragaria virginiana* Duch. (7-15 $\mu\text{mole/s/m}^2$) y *Fragaria chiloensis* (L.) Duch. (20-30 $\mu\text{mol/s/m}^{-1}$), aunque las tres especies no se han comparado en un entorno común (Cameron y Hartley, 1990). La tasa de asimilación de CO_2 es significativamente afectada por varios factores, incluyendo el nivel de luz, temperatura, disponibilidad de nutrientes, concentración de CO_2 estado de desarrollo, cultivar y método de propagación (Dale y Luby, 1990).

En general, altos niveles de luz se traducen en altas tasas asimilables de CO_2 . El punto de saturación de luz cae entre 800 y 1000 $\mu\text{E/m}^{-1}/\text{s}$. Las plantas que crecen en sombra tienen un nivel máximo de tasa asimilable de CO_2 inferior, que las plantas que están creciendo en pleno sol, pero las de sombra son más activas bajo luz difusa. La energía total de luz recibida durante el día tiene una mayor influencia en la adaptación de la hoja que la densidad del pico del flujo de fotones, aunque la noche interrumpe el aumento de la tasa de asimilación de CO_2 . Las plantas que se mantienen en las colinas tienen tasas de asimilación de CO_2 más altas que aquellas que crecen en hileras de cultivo, debido a que probablemente tienen condiciones de menos competencia y por lo tanto, mayores niveles de luz (Dale y Luby, 1990).

Las tasas fotosintéticas pueden variar en la superficie de terreno cultivado, dependiendo de los cultivares. Por ejemplo, las tasas en *F. chiloensis* son de 25 a 40% más altos que los de *F. x ananassa* (Dale y Luby, 1990).

La eficiencia fotosintética en el producto de una cosecha se calcula mejor dividiendo la energía de la Radiación Fotosintéticamente Activa (longitudes de onda entre 400 y 700 nm y es capaz de inducir fotosíntesis, RFA) total absorbida por un cultivo, desde la plantación hasta la cosecha, entre la energía total en los enlaces químicos de la sacarosa producida en la fotosíntesis. Para todas las especies, la eficiencia máxima se obtiene sólo con niveles bajos de radiación, no con luz solar intensa (durante días largos), cuando el rendimiento es mayor. Considerando el aporte de la RFA al área de suelo cultivado, la eficiencia de producción de biomasa (incluyendo fotosíntesis y respiración) siempre está muy por debajo del 18%, que es el máximo potencialmente posible. La mayoría de las variedades de fresa cultivada tienen una tasa de fotosíntesis neta de 15-25 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Hancock, 1999).

2.6.2 Medición de fotosíntesis en planta completa

La llegada del sistema portátil de intercambio de gases ha hecho posible alcanzar el estudio detallado de la fotosíntesis en el campo, estudios que a menudo, son más significativos que los realizados en laboratorio. El hecho es que las unidades medidas de intercambio de gases en hoja individual sólo es una limitación mayor cuando es de interés la productividad de la planta completa (Corelli-Grappadelli y Magnanini, 1993).

La productividad de las plantas se ve influenciada en gran medida por la complejidad del dosel y el crecimiento, el cual a su vez hace imposible medir la totalidad de las hojas por separado. Una solución común a este problema es tomar una muestra de las lecturas de las hojas y tener como base los datos de la hoja individual y

estimar las características del medio ambiente (especialmente la radiación) en el dosel y con esto obtener un modelo respuesta del dosel de la planta en estudio (Corelli-Grappadelli y Magnanini, 1993).

Un enfoque alternativo es usar las grandes cámaras que encierran el árbol completo. En este caso, se estudia el intercambio de gases de un complejo de órganos respiratorios y fotosintéticos, y no sólo el de una colección de hojas. Por lo tanto, cambiar el enfoque de una sola hoja a todo el dosel implica algo más que un simple cambio de escala de medición, un hecho que debe tenerse en cuenta cuando se evalúen los resultados obtenidos de dicho sistema (Corelli-Grappadelli y Magnanini, 1993).

En general, las cámaras de árboles son complejas y a menudo costosas. La importancia primordial es el control de los gradientes de temperatura y el CO₂, tales cambios en estas variables pueden afectar las condiciones físicas, como la humedad y la composición de la atmósfera en la superficie de la hoja y la fotosíntesis y respiración en las partes de la planta cerrada. Además, la pared de la cámara puede afectar las propiedades de transmisión de la luz en el ambiente, la reducción de la intensidad de la radiación incidente y la evolución de la calidad de luz directa: proporción de radiación difusa (Corelli-Grappadelli y Magnanini, 1993).

Para la medición del intercambio de gases de la parte aérea completa de la planta se utiliza un sistema abierto de medición de fotosíntesis neta (el CO₂ asimilado en fotosíntesis menos el gastado en respiración de todas las partes aéreas encerradas en

la cámara). Las cámaras pueden ser fabricadas con plástico transparente Mylar de calibre de 0.025 mm. (de Du Pont Co, Wilmington, Del). Las dimensiones se determinan antes de su construcción y es de acuerdo al tamaño de las plantas en las que serán usadas las cámaras. Un flujo de aire se hace entrar a la cámara por la parte de abajo y sale por la parte superior. El aire es impulsado por una bomba con motor eléctrico a través de una tubería de PVC. Este flujo será cuidadosamente medido en el centro del tubo de PVC con un micro anemómetro conectado a un equipo Solomat MPM510e (Solomat Neutronics Co. Norwalk, Conn). El diferencial de CO₂ y H₂O entre la entrada y la salida de la cámara será medido con un analizador de gases al infrarrojo Sistema portátil de fotosíntesis CIRAS para medir Intercambio neto de CO₂. La dificultad de controlar temperatura en el campo en condiciones de descarga de radiación total, trabajar con árboles frutales grandes y la dificultad de separar los efectos de la temperatura, de efectos de otros factores, son las razones principales de la falta de estudios sobre efectos de temperatura sobre balance y partición de carbono en árboles frutales (Calderón, 2005).

2.6.3 Fotosíntesis en plantas superiores

La vida en la tierra depende de la energía derivada del sol. La fotosíntesis es el único proceso biológico que puede cosechar esta energía. La conversión de energía solar a energía química de compuestos orgánicos es un proceso complejo que incluye en transporte de electrones y el metabolismo de carbono fotosintético. El tejido fotosintético más activo en las plantas superiores es el mesófilo de las hojas. Las

células del mesófilo tienen muchos cloroplastos, que contienen la luz especializada en la absorción de los pigmentos verdes, las clorofilas. En la fotosíntesis, la planta utiliza la energía solar para oxidar el agua, liberando así oxígeno, y para reducir el dióxido de carbono, formando grandes compuestos de carbono principalmente azúcares. La compleja serie de reacciones que culmina en la reducción de CO₂ y la fijación de carbono ocurre en los tilacoides (Haldrup, *et al.*, 2001).

Gifford *et al.* (1984) mencionan que el incremento del rendimiento está ligado a cambios en la fijación de bióxido de carbono por unidad de área foliar del cultivo y a la distribución de los fotosintatos entre los órganos de interés antropocéntrico.

El impacto del medio ambiente en la fotosíntesis es de interés tanto para fisiólogos como para agrónomos. Desde el punto de vista fisiológico, la fotosíntesis responde a factores del medio ambiente como la luz, las concentraciones de CO₂ y a la temperatura. Los procesos de la fotosíntesis dependen en gran medida del medio ambiente. También es de importancia por la productividad y rendimiento de los cultivos, ya que depende en gran medida de las tasas fotosintéticas (Haldrup, *et al.*, 2001).

La capacidad fotosintética foliar es la tasa fotosintética por unidad de área foliar, cuando la irradiación está en un punto de saturación de dicha tasa, las concentraciones de CO₂ y O₂ son normales, la temperatura es óptima y la humedad relativa es elevada. Los productos de asimilación metabólica, incluyendo los de la fotosíntesis (fotosintatos), son necesarios para el crecimiento de las partes vegetales incapaces de fotosintetizar, e incluso para algunas partes que fotosintetizan muy poco como es el caso de algunos tallos y frutos. Típicamente, las hojas con su capacidad fotosintética,

constituyen la fuente u origen del material que se transporta, aunque un órgano de almacenamiento y exportación también puede ser una fuente. Cualquier tejido en crecimiento, de almacenamiento o con metabolismo activo puede ser un vertedero (demanda) o destino de la savia (Salisbury y Ross, 1994).

Milthorpe y Moorby (1978, citado por Pérez *et al.*, 2004) mencionan que la mayor parte de los fotosintatos que recibe la demanda proviene de las hojas cercanas. Por su parte, Gifford y Evans (1981) consideran que el suministro de carbono a los frutos por parte de la fuente se incrementa cuando existe una mayor actividad en los frutos, éstos ejercen un control sobre la distribución de carbono, de manera que el suministro a partir de la fuente se incrementa cuando existe una mayor actividad en los órganos de la demanda.

2.6.4 Dióxido de carbono

La cantidad de CO₂, como materia prima de la fotosíntesis, tiene una importante influencia sobre su rendimiento. A pesar de que algunas reacciones parciales de la fotosíntesis pueden realizarse también en su ausencia, no habrá formación de carbohidratos. La concentración de CO₂ en el aire, con 0.03%, no es óptima para la fotosíntesis. Se puede obtener un aumento de la actividad fotosintética hasta un valor límite, que depende del objeto en estudio, con un incremento de la concentración de CO₂ en el ambiente gaseoso. En la práctica hortícola se ha utilizado, consecuentemente, una adición artificial de CO₂ gaseoso, bajo condiciones de iluminación constante, para aumentar la intensidad fotosintética y con ésta el

rendimiento. Hasta qué punto este procedimiento tiene éxito con cada especie vegetal, depende también de las necesidades de luz y de calor bajo las condiciones variadas de una mayor concentración de CO₂ (Sivori *et al.*, 1986).

2.6.4.1 Efectos fisiológicos de la concentración de CO₂

El balance de carbono es quizá la característica más básica de las plantas, el carbono es la moneda para el crecimiento, debido a esto los procesos reproductivos dependen de una buena reserva de hidratos de carbono. Importantes eventos en la evolución de la flora terrestre pueden estar correlacionados a los cambios en la economía del carbón en las plantas (Cowling, 2001).

Las tasas de fotosíntesis de CO₂ determinan fuertemente el balance de carbono, los cuales están influenciados fundamentalmente por la concentración de O₂ y CO₂ en la atmósfera. También es modificado por las variables ambientales como la temperatura, la sequía, las bajas concentraciones de nutrientes en el suelo, así como la toxicidad del mismo. La influencia primaria del CO₂ sobre la fotosíntesis es a través de la ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco), la enzima que cataliza la formación de los hidratos de carbono, precursores del CO₂ y el H₂O (Cowling, 2001).

Las moléculas de CO₂ y O₂ compiten por los sitios de unión de Rubisco; la oxigenación de Rubisco durante la fotorrespiración deriva en un decremento neto en la cantidad de CO₂ fijado. Elevadas concentraciones de O₂ y las altas temperaturas, reducen el dióxido de carbono atmosférico, con lo cual se incrementa la fotorrespiración, de ese modo baja la adquisición de carbono en plantas C3 (Cowling, 2001).

Cuando aumenta el nivel de CO₂ en la atmósfera de almacenamiento, aumenta también la cantidad de CO₂ disuelta en la célula o combinada con algunos constituyentes. Este fenómeno es reversible. Los niveles elevados de CO₂ dentro de la célula, por lo general conducen a los cambios fisiológicos siguientes: (a) disminución en las reacciones sintetizadoras de la maduración (por ej.: proteínas, pigmentos), (b) inhibición de algunas actividades enzimáticas (por ej.: succinodeshidrogenasa, oxidasa del citocromo), (c) disminución en la producción de volátiles; (d) alteración en el metabolismo de ácidos orgánicos, en especial la acumulación de ácido succínico, (e) reducción en la descomposición de sustancias pécticas, (f) inhibición de la síntesis de clorofila y pérdida del color verde del fruto, en particular después de una recolección temprana y (g) alteración en las proporciones de diversos azúcares (Cowling, 2001).

2.6.4.2 Factores que afectan el balance de carbono

De acuerdo a la definición del término, los factores que afectan el balance de carbono, son precisamente aquellos que interfieren de alguna manera con la relación fuente-demanda de carbono. Por lo anterior, es de suma importancia considerar la relación fuente-demanda entre hojas y frutos, puesto que la cosecha genera una competencia alta por fotosintatos y productos de reserva, y esta competencia repercute en la fisiología total de la planta (Ryugo, 1993).

El crecimiento del fruto, rendimientos y manutención del cultivo depende del balance de la fuente de carbohidratos en relación a la demanda de los mismos por los frutos, hojas, tallos y raíces en crecimiento (Lakso y Nyrop, 2002); así, pues una limitación puede ocurrir en algún periodo, dependiendo del balance entre la fuente y la

demanda, así como la competencia con otros puntos en crecimiento (Lakso *et al.*, 1998).

Fuente de carbono. Las hojas, y en menor medida, los tallos verdes y los frutos inmaduros abastecen al resto de la planta con compuestos orgánicos de carbono. Sin embargo, otros, tales como raíces y semillas también sintetizan sustancias que son exportadoras a otras partes del árbol. Así pues, los órganos que sintetizan y exportan sustancias son los llamados fuentes. Pero la principal fuente que interviene en el desarrollo son las hojas maduras (Ryugo, 1993).

Goldschmidt y Lakso (2005) consideran que la fuente de carbono esta constituida por la fotosíntesis anual más algunas reservas de carbono, las cuales podrían movilizarse para complementar la actividad de crecimiento anual, principalmente en primavera, aunque las reservas también podrían estar disponibles posteriormente, particularmente bajo condiciones de estrés. Según Esparza *et al.* (1999), la asimilación de carbono representa a la fuente, la cual es afectada por los siguientes factores: radiación solar (luz), temperatura, intercepción de luz por parte de los árboles y tasa fotosintética foliar.

2.6.4.3 Factores que afectan la fuente de carbono

Luz. El primer paso para un rendimiento potencial es la captura de la luz solar para cubrir las necesidades de energía. Muchos factores están involucrados en la determinación de captura de luz solar, éstos incluyen los espacios entre hilera, espacio entre árboles, altura y forma del árbol y la densidad del cultivo (Lakso *et al.*, 1997).

La luz desempeña un papel importante en la fijación de carbono; la sombra retrasa el tiempo en que los brotes en crecimiento pasan de ser importadores netos a exportadores netos que convierten el carbón a compuestos (fotoasimilados), los cuales son los primeros en contribuir en el crecimiento del fruto, y debido al papel de la luz, mantener un cultivo bien expuesto al estímulo es imprescindible para asegurar la fuente apropiada de carbono inicial al fruto (Correlli-Grappadelli y Lakso, 2004). Durante el período inicial después de la floración, cuando el número final de frutos se establece y ocurre la división celular en éstos, la abscisión puede ser causada por luz baja o temperaturas altas (Lakso *et al.*, 2001). El desarrollo del fruto se limita cuando la intensidad lumínica es baja (Bepete y Lakso, 1998).

Temperatura. Afecta la fotosíntesis, fotorrespiración y respiración, por lo que los aspectos del metabolismo, crecimiento y desarrollo de la planta, inclusive la floración son alterados por los cambios en ella. Para la fotosíntesis neta de la hoja de la mayoría de las plantas C3, la temperatura óptima está entre 20 y 35°C en niveles ambientales de CO₂ y saturación de luz. La fotorrespiración se incrementa a temperaturas de 30°C debido a la disminución de la solubilidad de CO₂ y especificidad de Rubisco (Jiao *et al.*, 1997).

En la primera etapa de desarrollo del fruto, la temperatura es determinante en el tamaño del mismo, probablemente envía una estimulación de división celular, aunque no es seguro que esta evidencia se mantenga hasta el final de la cosecha (Corelli-Grappadelli y Lakso, 2004).

Intercepción de luz. Un potencial inherente para obtener una productividad alta de materia seca y frutos, se debe a la capacidad que se tenga para interceptar una cantidad alta de radiación por un periodo suficientemente largo, al igual que el periodo de vida de hojas para producción de órganos con costos de producción relativamente bajos (Lakso *et al.*, 1999).

Las hojas superiores en plantas dispuestas más o menos horizontales pueden llegar al punto de saturación por luz y además pueden también sombrear a las hojas inferiores, por lo que éstas no tendrán la suficiente luz, propiciando esto, una desventaja fotosintética en el total de la planta; para evitar dicho problema, lo ideal sería tener un índice de área foliar que permita optimizar la absorción de luz y por ende la fotosíntesis (Salisbury y Ross, 1994).

La intercepción de luz tiene gran impacto en los rendimientos. Cerca de la cosecha, la poca luminosidad podría causar pérdida del tamaño, color, sólidos solubles y otras características importantes de la calidad del fruto (Corelli-Grappadelli y Lakso, 2004).

Tasa fotosintética y área foliar. El potencial fisiológico de la hoja sólo refleja una porción del total de la capacidad de captación de carbono de una planta. La superficie foliar de la planta por unidad de superficie de terreno (índice de área foliar) es también una variable importante. Por supuesto, las primeras hojas interceptan la mayor cantidad de luz y las siguientes probablemente menos que las otras. El índice de área foliar óptimo de una planta sería cuando todas las hojas de la misma puedan tener una contribución positiva al absorber carbono (Mooney, 1972).

Es común medir la tasa de saturación lumínica de la fotosíntesis por unidad de área foliar y típicamente se ha encontrado que se da a $\approx 15-22 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en manzana y que consecuentemente, una tasa extrema de fotosíntesis por unidad de área foliar no representa una garantía para un potencial alto de productividad (Lakso *et al.*, 1999).

La importancia relativa de los cambios en la tasa fotosintética foliar versus área foliar, aparentemente puede cambiar con la edad del árbol, densidad de la copa, y quizás otros estreses. En huertos nuevos, especialmente con árboles jóvenes, la intercepción de luz por árbol tiende a estar correlacionada con el área foliar del mismo; así, los cambios que se presenten en el área foliar serán de suma importancia (Lakso *et al.*, 1999).

La demanda de carbono. Está representado por las regiones que necesariamente importan foto-asimilados para su desarrollo, como frutos, raíces, tallos, brotes nuevos y hasta follaje joven (Ryugo, 1993). Esta situación está determinada por la respiración y crecimiento que se da en los diferentes órganos (Esparza *et al.*, 1999). El crecimiento del dosel y raíces requieren de una adecuada fuente de carbono para mantener en buenas condiciones la productividad de los árboles. La demanda puede ser incrementada rápidamente por la presencia excesiva de frutos y su tasa exponencial de crecimiento. Sin embargo, la producción de frutos de calidad es prioridad, la cual es afectada por la presencia de brotes en desarrollo, que son una demanda potencial de carbono y el daño es mayor si hay incidencia de luz baja (Lakso *et al.*, 1999).

2.6.4.4 Factores que afectan la demanda de carbono

Respiración. El carbono se pierde en las plantas como CO₂ en la respiración y como carbono orgánico en defoliación, lixiviación y volatización. Entre estos procesos, la fracción más grande de carbono reducido es la pérdida de CO₂ en la respiración. Se ha estimado que hasta el 50% o más del carbono total fotosintetizado se pierde como CO₂ en la respiración aerobia (Nilsen y Orcutt, 1996).

El total de carbono reducido en las plantas puede tener tres funciones principales: 1) para mantener la función celular, 2) para la construcción de estructuras y 3) una proporción de ATP producto de la respiración que es utilizada por iones de entrada y de transporte (Nilsen y Orcutt, 1996).

La respiración es afectada por la luz, aunque esa influencia sea indirecta, pues a menor cantidad de luz, menor fotosíntesis, lo que limita la producción de carbohidratos que son el combustible de la respiración; sin embargo, los principales factores que afectan a la respiración son: la temperatura, concentraciones de sales, estrés por agua, disponibilidad de nutrimentos y contaminantes atmosféricos. De hecho, algún factor ambiental que pudiera afectar el crecimiento tendría un efecto en la respiración (Nilsen y Orcutt, 1996), por ejemplo la temperatura, que a medida que aumenta, incrementa la respiración, con ello, una continua pérdida de carbohidratos y una acelerada tasa de crecimiento (Johnson y Lakso, 1986b).

La tasa respiratoria más baja se da cuando la planta está en estado de letargo; en contraste, la tasa máxima de respiración se da cuando las hojas emergen de los brotes. Es posible que en este tiempo se dé la máxima movilidad de reservas hacia esos

puntos de crecimiento, complementando la fuente de fotosíntesis; esto lo observaron Butler y Landsberg (1981) en manzano. Una vez que la fotosíntesis comienza, disminuye inmediatamente la tasa de respiración por unidad de superficie foliar, a pesar del alto nivel de actividad del árbol en el periodo de post-floración, cuando se incrementa la fructificación y los brotes comienzan a elongarse. La disminución continúa, a una tasa mucho más baja a través de las fases de desarrollo. Así, la tasa de respiración foliar es alta cuando las hojas son jóvenes y después decrece (Butler y Landsberg, 1981). Por otro lado, Johnson y Lakso (1986a) reportan que la respiración tiene un efecto significativo en el balance de carbono del árbol, especialmente durante la primera fase del crecimiento del fruto de manzano, y que en el crecimiento de los brotes aparentemente los cambios en la respiración afectan una pequeña proporción.

Crecimiento. El flujo de carbono durante el crecimiento inicial está determinado por las reservas de la planta que son movilizadas a la zona de crecimiento y por los fotosintatos recientemente producidos provenientes de la fotosíntesis (Johnson y Lakso, 1986a). Por tal motivo, el crecimiento depende de la disponibilidad de fotosintatos asimilados (Génard *et al.*, 1998).

Durante el crecimiento de la planta, se producen hojas nuevas las cuales reducen la luz que llega a las hojas más bajas. La ganancia fotosintética de las hojas más bajas puede ser menor que su costo de mantenimiento; esto se da por la competencia que se genera por luz en el interior de la copa, dando lugar a una actividad fotosintética baja en este tipo de hojas, la cual pudiera ser insuficiente para su propio mantenimiento (Mooney, 1972).

El balance de carbono de un brote en crecimiento, aparentemente es afectado por pequeños cambios de las tasas de respiración, pero es alterado sustancialmente por cambios reductivos de la tasa fotosintética. No solo se reduce la exportación de carbohidratos por un tiempo determinado, sino que el total de importación de las reservas puede incrementarse en algunos momentos; esto hace pensar que el balance de carbono de los brotes puede tener diferencias significativas bajo diferentes condiciones climáticas, en las cuales la fotosíntesis se reduce y la respiración se incrementa (Johnson y Lakso, 1986a).

El crecimiento del fruto es definido como un cambio irreversible en el peso y tamaño; sin embargo, para que esto suceda se necesita de recursos energéticos derivados en parte de las reservas, para el inicio del crecimiento y bajo algunas circunstancias también en las fases posteriores. Pero la mayor energía que es utilizada para el desarrollo del fruto, es la que se produce vía fotosíntesis. Toda esa energía utilizada se puede expresar como un costo de producción por gramo de fruto (Corelli-Grappadelli y Lakso, 2004), razón por la cual, el crecimiento del fruto representa un importantísimo punto de demanda.

El crecimiento de cualquier órgano es afectado por las condiciones ambientales. Así, diferentes sitios de crecimiento pueden entenderse por la interacción de la combinación de cultivar con el medio ambiente, que involucran el régimen de temperatura, características del suelo, disponibilidad de agua, disponibilidad de luz, etc. (Corelli-Grappadelli y Lakso, 2004).

2.6.5 Transpiración

Movimiento del agua de la hoja a la atmósfera. Después de que el agua se ha evaporado de la superficie celular al espacio intercelular, la difusión es el medio esencial de cualquier movimiento del agua hacia afuera de la hoja. La cutícula cerosa que cubre la superficie de las hojas es una barrera efectiva para el movimiento del agua. Se estima que únicamente el 5% del agua que se pierde de las hojas escapa a través de la cutícula. Casi toda el agua que se pierde de una hoja típica, se pierde por difusión del vapor de agua a través de los minúsculos poros del aparato estomático, los cuales son usualmente más abundantes en la superficie inferior de la hoja. Se podría decir que la transpiración es un mal necesario, ya que si los estomas no se abren no penetra el CO₂ requerido para la fotosíntesis por las células del parénquima clorofílico (Nobel, 1999). (Nobel, 1999).

La transpiración es la pérdida de agua en forma de vapor a través de los estomas, cutícula, y la peridermis (superficie suberizada con lenticelas). Se ha estimado que una planta de maíz debe transpirar 600 Kg de agua para producir un Kg de granos de maíz seco, y para producir un Kg de biomasa seca (incluyendo hojas, tallos y raíces) debe transpirar 225 Kg de agua. De la cantidad total de agua que es absorbida del suelo, transportada en el tallo y transpirada hacia la atmósfera, solamente una fracción muy pequeña de 1% se incorpora a la biomasa (Taiz y Zeiger, 2002).

Caird, *et al.*, (2007) mencionan que el potencial hídrico de la planta está determinado por dos factores importantes que son: la humedad del suelo, que controla el suministro de agua y la transpiración que gobierna la pérdida de agua. Estos factores

ejercen su acción a través de la conductancia estomática, que depende tanto del contenido de agua del suelo como de la humedad relativa del aire.

La transpiración de la hoja depende de dos factores principales: (1) la diferencia en la concentración del vapor de agua entre los espacios de aire de las hojas y el aire externo; y (2) la resistencia de difusión de esta ruta (Nobel, 1999).

2.6.5.1 Factores que afectan la transpiración

Son muchos los factores que afectan la pérdida de agua por las plantas. Los más importantes son los factores ambientales que afectan directamente la presión de vapor del agua en la hoja y la presión de vapor de agua en la atmósfera. Otros factores importantes son: luz, temperatura, humedad y viento. Se ha observado un efecto de las variaciones de los contenidos de humedad del suelo sobre la transpiración. A medida que decrece la humedad del suelo y se aproxima al punto de marchitez permanente, la tasa de transpiración disminuye. Aunque la disponibilidad de agua en la interfase suelo-raíz, pueda influenciar la transpiración directamente, es más probable que la disminución del potencial hídrico del suelo, cause una disminución del potencial hídrico de la hoja y se produzca un aumento en la resistencia estomática (disminuye la conductividad), debido a la pérdida de turgor de las células guardas y a un cierre de los estomas. La tasa transpiratoria disminuye por un aumento de la resistencia estomática (Anderson, 1982).

De los factores ambientales el que se correlaciona mejor con la transpiración es la radiación solar incidente, ya que tiene un efecto directo sobre la apertura estomática. Muchos estomas se abren en presencia de la luz, lo que incrementa la transpiración.

Otro factor importante es la temperatura. Si se analiza el curso diario de la transpiración, desde que sale el sol hasta que se pone, se observa que hay una correlación entre la radiación y la temperatura, que presentan un aumento casi paralelo, sin embargo la humedad relativa disminuye desde las horas de la mañana hacia el mediodía, aumentando luego en horas de la tarde, cuando declina la radiación solar y la temperatura disminuye (Anderson, 1982).

La transpiración aumenta paralelamente a la radiación solar y la temperatura, pero con cierto retraso; sin embargo después del mediodía presenta sus valores máximos, disminuyendo a medida que aumenta la humedad relativa del aire, en las horas de la tarde. La transpiración es una función directa de la presión de vapor del agua en la superficie de las células del mesófilo. La temperatura del agua es el factor que controla la presión de vapor del agua. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la presión de vapor de una forma exponencial. La humedad relativa del aire es un factor importante de la transpiración, en relación a la temperatura del aire. La transpiración aumenta a medida que disminuye la humedad relativa del aire a una temperatura dada, ya que la fuerza impulsora de la transpiración es la diferencia de presiones de vapor (P) entre el agua de la hoja (P) y el agua en el aire (P_o) (Anderson, 1982).

El viento puede aumentar la transpiración, reduciendo la capa de vapor de agua estacionario que se encuentra sobre la hoja, facilitando la difusión. Así mismo, el viento tiene un efecto refrigerante en la superficie foliar, si la hoja está más caliente que la masa de aire que pasa sobre ella, la hoja se enfría. En general el viento causa un aumento en la transpiración. Si la masa de aire que se mueve sobre una hoja está

cargada de humedad, la transpiración disminuye, pero si es aire seco aumenta (Anderson, 1982).

2.6.5.2 Importancia de la transpiración

La transpiración es un mal necesario, ya que los estomas se abren en presencia del estímulo luminoso, para absorber el CO₂ requerido en la fotosíntesis; aunque el balance hídrico se altere, al escaparse el agua de la planta. El flujo de agua a través de la planta inducido por la transpiración, provee un buen sistema de transporte para los minerales, que son absorbidos por las raíces y que se mueven en la corriente transpiratoria. Así mismo, la absorción de agua del suelo, tiene un efecto en la movilización de sales minerales del suelo hacia la raíz, facilitando su absorción, sin un gasto de energía adicional, que implicaría la formación de masas de raíces que exploren amplias superficies de suelo (Caird, *et al.*, 2007).

Otro efecto de la transpiración es la acción refrigerante de la hoja. La evaporación de agua de la superficie foliar, va acompañada por una pérdida de calor. El calor de evaporación del agua es aproximadamente 600 cal g⁻¹ esta pérdida de calor ayuda a mantener una temperatura adecuada de la hoja, durante días muy soleados. La reducción de temperatura foliar por transpiración está en el orden de 2-3°C por debajo de la temperatura del aire. Podemos concluir que la transpiración ejerce un efecto de enfriamiento de la superficie foliar (Caird, *et al.*, 2007).

Se ha sugerido que la transpiración es necesaria para el crecimiento normal de las plantas, ya que ayuda a mantener un estado de turgor óptimo. Cuando las plantas crecen en una atmósfera saturada de humedad, presentan un aspecto suave y

carinoso, que puede ser el resultado de una gran absorción de agua, que causa un mayor alargamiento celular. Las plantas terrestres casi nunca están en un estado de turgor óptimo, aunque la savia celular pueda tener una presión osmótica alta, como en algunas halófilas de 200 atm., la pérdida de agua por transpiración mantiene la presión de turgor por debajo de la presión osmótica (Anderson, 1982).

2.6.6 Conductancia estomática

Las células guardas, las células subsidiarias y los poros son llamados en conjunto el complejo estomático. La estructura del complejo estomático puede variar considerablemente de una especie a otra, pero los cambios en el tamaño del poro se deben a cambios en la presión de turgencia entre las células guardas y las células subsidiarias; un aumento de volumen de las células guardas o una disminución de volumen de las células subsidiarias resulta en la apertura estomática. La apertura estomática y la fotosíntesis muestran paralelismo, responden a las radiaciones de longitud de onda de 400- 700 nm (Wong, *et al.*, 1979).

Es claro que el cierre estomático es progresivo a la sequía seguido de un decremento paralelo de la tasa fotosintética. Sin embargo, la conductancia estomática no es únicamente controlada por la disponibilidad de agua en el suelo, sino por un complejo de factores internos y externos de la hoja que interactúan (Medrano, *et al.*, 2002).

Es ciertamente reconocido que el estado de agua en la hoja interactúa con la conductancia estomática y la transpiración y bajo un estrés hídrico, sin embargo, una

buena correlación se observa frecuentemente entre el potencial de agua en la hoja y la conductancia estomática. Esta relación es dependiente de otros factores como la especie que se estudia, antecedentes de sequía, el tamaño de las macetas donde las plantas están enraizadas o las condiciones ambientales durante el estrés hídrico (Medrano, *et al.*, 2002).

2.6.7 Agua

La fresa es exigente en agua, una buena disponibilidad representa la base necesaria para un cultivo rentable. Se considera que una hectárea de fresa tiene un consumo hídrico de 4000 a 6000 m³ por año (Brazanti, 1989). El agua no solamente constituye la materia prima de la fotosíntesis, sino que también participa como reactivo en sus transformaciones, lo mismo que en otras numerosas reacciones del metabolismo. Además los componentes del agua, en forma de (OH) e (H) son ligados químicamente o liberados, o sea, que son recombinados para formar otra vez moléculas de agua. El agua también sirve como disolvente indispensable para la mayoría de los compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, que participan en el metabolismo. En las plantas superiores, el agua tiene fuera de la célula la función de un medio de transporte, mediante el cual, especialmente las sales nutritivas llegan desde las raíces a los órganos epígeos. Por lo tanto, se comprende que un suministro inadecuado de agua no sólo afecta o bloquea a la fotosíntesis, sino también a otros procesos vitales. Por esto se requiere de una economía balanceada de agua, tanto en la célula individual como en el organismo entero (Salisbury y Ross, 1994).

El estrés hídrico afecta muchos procesos del crecimiento de las plantas a nivel anatómico, morfológico, fisiológico y bioquímico (Jones, *et al.* 1985). Así, de acuerdo con Davies (1986), el objetivo principal al estudiar las relaciones hídricas en plantas, es identificar estructuras morfológicas, anatómicas y procesos fisiológicos que capaciten a las plantas para sobrevivir, reproducirse y producir en condiciones de estrés hídrico.

2.6.7.1 Eficiencia en el uso del agua en las plantas

Un proceso clave en la colonización de los ambientes terrestres por las plantas ha sido la creación de mecanismos que les permiten controlar la pérdida de agua mientras se continúa fijando carbono en la fotosíntesis. Dicho proceso ha sido de gran importancia debido a que la disponibilidad de agua es probablemente el factor clave que determina la distribución de las plantas y su supervivencia en los ecosistemas naturales, además de ser también el factor limitante más importante en la producción agrícola (Jones, 2004). Así, la apertura estomática que propicia la entrada de CO₂ a la planta, necesario para la fotosíntesis resulta en una pérdida inevitable de agua. Un parámetro útil que relaciona los dos flujos y muestra el total de CO₂ fijado (beneficio) por unidad de agua perdida (costo) es la *eficiencia en el uso del agua* (EUA). Aunque la expresión 'eficiencia en el uso del agua' es incorrecta en sentido estricto debido a que las plantas pierden agua y solo una fracción muy pequeña es empleada para la producción de biomasa (Chaves *et al.*, 2004), sin embargo, la emplearemos debido a su amplia aceptación y la definiremos como la proporción entre alguna medida de la asimilación de carbono o crecimiento y la medida de la correspondiente pérdida de agua. También se consideran diferentes escalas espaciales y temporales, como una

hoja o toda la planta y medidas en periodos de tiempo corto (EUA instantánea) o en una temporada de crecimiento completo (EUA a largo plazo).

En el nivel de la hoja, la *eficiencia en el uso del agua instantánea* (EUA_i) puede ser estimada de mediciones del intercambio de gases y calculada como la proporción de la asimilación de carbono (A), respecto a la transpiración (E) o A/E. Una cantidad relacionada es el cociente de transpiración, el cual es el recíproco de la eficiencia en el uso del agua y representa la pérdida de agua por CO₂ fijado o E/A (Nobel, 1999).

En el nivel de la planta completa, la eficiencia en el uso del agua a largo plazo (EUA_{lp}, g materia seca kg⁻¹ H₂O o mmol C mol⁻¹ H₂O) puede ser definida como el cociente de la ganancia neta de materia seca en un periodo de tiempo dado entre el agua perdida durante el mismo periodo. En agricultura usualmente se utiliza una definición diferente de EUA_{lp} conocida como eficiencia en el uso del agua del cultivo, la cual es una medida del rendimiento económico producido por el agua perdida en la transpiración o evapotranspiración (Chaves *et al.*, 2004). Las definiciones anteriores reconocen la liga inexorable entre la transpiración y la fijación de carbono, y es ésta relación la que puede ser sujeta a manipulación a través de cambios en la fisiología de la planta, resultantes de alteraciones en la conductancia estomática o fijación de carbono.

La regulación de la pérdida de agua en los estomas es un típico mecanismo de control múltiple y se establece mediante variaciones de la apertura, que impone mayor o menor restricción a la difusión libre del vapor de agua desde la cavidad subestomática a la atmósfera. Esta regulación es responsable de buena parte de las

variaciones en la eficiencia en el uso del agua por las plantas. La eficiencia en el uso del agua (EUA) de las plantas puede entenderse de manera genérica como el volumen de agua que éstas necesitan consumir (evapotranspirar) para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono proveniente de la atmósfera (que se encuentra en forma de CO_2). De esta manera, la eficiencia en el uso del agua de las plantas dependerá principalmente de dos tipos de factores: en primer lugar, de aquellas características propias de la especie y variedad, que tengan relación con la capacidad de optimización de los procesos de asimilación de carbono y de evapotranspiración de agua; y en segundo lugar, de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta. Por otra parte, la eficiencia en el uso del agua también dependerá de la escala a la que se considere, pues la eficiencia en el uso del agua puede ser considerada a escala de cultivo o de ecosistema, a escala de planta entera y a escala de hoja (Medrano, *et al.*, 2007).

2.6.7.2 Intercambio de gases y uso del agua en las plantas

El proceso de intercambio de gases, en el que las plantas incorporan a su biomasa (fijan) carbono de la atmósfera, también tiene lugar una pérdida (evapotranspiración) de vapor de agua desde la planta a la atmósfera. Así, la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) de las plantas puede entenderse de manera genérica como el volumen de agua que éstas necesitan consumir (evapotranspirar) para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono proveniente de la atmósfera (la que se encuentra en forma de CO_2). De esta manera, la eficiencia en el uso del agua de las plantas dependerá principalmente de dos tipos de factores: en primer lugar, de aquellas

características propias de la especie y variedad que tengan relación con la capacidad de optimización de los procesos de asimilación de carbono y de evapotranspiración de agua; y en segundo lugar, de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta (Medrano, *et al.*, 2007).

Por otra parte, la eficiencia en el uso del agua también dependerá de la escala a la que se considere. La eficiencia en el uso del agua puede ser considerada a escala de cultivo o de ecosistema, a escala de planta entera y a escala de hoja (Medrano, *et al.*, 2007).

La eficiencia en el uso del agua a nivel de planta es un parámetro con un valor principalmente experimental, pues habitualmente se obtiene en condiciones controladas en las que las plantas se encuentran en macetas o en sistemas en los que el agua consumida puede medirse con exactitud. De esta manera, la eficiencia en el uso del agua a nivel de planta entera es un parámetro muy útil en la comparación de especies y variedades (Jones, 2004).

La medida de la eficiencia en el uso del agua a escala foliar tiene un enorme valor experimental. Uno de los principales motivos para su toma en consideración es la posibilidad de representar un parámetro de medida relativamente sencilla que pueda ser representativo de la EUA a escala de planta entera. Desde este punto de vista, se han desarrollado principalmente dos técnicas para su medida: el intercambio de gases, técnica que generalmente integra un período de tiempo breve o muy breve, y el análisis de la discriminación isotópica del carbono, que integra un período de tiempo mucho mayor (Jones, 2004).

Las medidas de intercambio de gases en hojas permiten determinar la transpiración (salida de agua de la planta) y la fotosíntesis neta (entrada neta de CO_2 en las hojas). La eficiencia en el uso del agua a escala foliar es el cociente de estos dos parámetros, y se considera a dos niveles. En primer lugar, la eficiencia de la transpiración, esto es: asimilación de CO_2 /transpiración (A/E , $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$); en segundo lugar, la eficiencia intrínseca en el uso del agua: asimilación de CO_2 /conductancia estomática (A/g , $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$). Ambas formas de medir la EUA tienen las mismas unidades, pero la diferencia fundamental es que la eficiencia de la transpiración depende de la planta y de las condiciones ambientales, de forma que un mismo grado de apertura estomática puede traducirse en una tasa de transpiración muy diferente si la humedad ambiental varía; mientras que la eficiencia intrínseca mide diferencias relacionadas con la capacidad de la hoja para regular la fotosíntesis y la conductancia estomática, y que son independientes de las condiciones atmosféricas en el momento de la medida (Medrano, *et al.*, 2007).

Debido a que el dióxido de carbono y el vapor de agua comparten la misma ruta de difusión estomática y que el gradiente de difusión que conduce la pérdida de agua es mayor (50 veces más grande) que el de adquisición de CO_2 , un aumento en la conductancia estomática foliar (g_s) que aumente la difusión de CO_2 (y así de la tasa fotosintética, A), inevitablemente origina un aumento en la transpiración (Chaves *et al.*, 2004). De esta manera, el estoma debe ser capaz de crear un balance entre la necesidad de dejar entrar CO_2 a los espacios intercelulares para permitir que la fotosíntesis ocurra con la necesidad de evitar la deshidratación por la pérdida excesiva

de agua; en otras palabras, el estoma debe permanecer abierto el tiempo suficiente para satisfacer los requerimientos de CO_2 necesarios para la fotosíntesis (Jones, 2004).

Para satisfacer dichos requerimientos pero al mismo tiempo retener suficiente agua, las plantas se han adaptado para controlar la pérdida de agua. El medio más importante por el cual dicho control es ejercido a nivel de la hoja es vía la modulación de la apertura estomática, controlado por el par de células oclusivas que rodean los miles de poros estomáticos de las hojas. Las células oclusivas son altamente sensitivas al ambiente interno y externo, por lo que su turgencia y tamaño del poro son ajustados como respuesta a los cambios en ambos ambientes. Conforme el estoma se cierra existe una correlación no lineal entre la disminución en la pérdida de agua y la disminución en la asimilación de carbono que se presenta de manera inevitable (Wilkinson, 2004). La pérdida de agua es prontamente restringida por el cierre estomático y a un nivel mayor que la reducción en la toma de CO_2 , debido a las diferencias entre los gradientes de presión de vapor de agua/concentración de CO_2 entre el interior y exterior de la planta. Este fenómeno significa que la mayoría de las plantas tienden a mostrar un aumento en la EUA conforme el estoma comienza a cerrarse, por ejemplo, cuando el déficit hídrico del suelo o aire comienza a desarrollarse alrededor de la planta, debido a que las tasas fotosintéticas permanecen elevadas mientras que la pérdida de agua es restringida (Wilkinson, 2004).

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del experimento

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de vidrio no climatizado, ubicado en el campo experimental del Colegio de Posgraduados en Montecillo, Texcoco, Estado de México: 19° 30' LN, 98° 53' LO, 2250 msnm.

3.2 Material vegetal

Se trabajó con plantas de fresa de la variedad CP Zamorana (CP 02-01) y CP Jacona (CP 02-04) dos variedades mexicanas y dos variedades extranjeras comerciales Festival y Giant. Las plantas provinieron de viveros de la zona de Zamora, Michoacán, las cuales se mantuvieron en frigoconservación durante dos meses a 0°C. para acumular horas frío, y con esto obtener abundante fructificación. Estos cultivares de fresa son plantas de fotoperíodo corto, los cuales requieren de períodos de oscuridad relativamente largos para estimular la floración, ya que los períodos largos de luz inhiben parcial o completamente la floración, dando lugar al estado vegetativo de la planta (Brazanti, 1989).

Características de las variedades de fresas nacionales y extranjeras:

Zamorana: Altamente productiva de frutos grandes, de calidad y firmeza superior; producción precoz, con altos porcentajes de fruta con calidad de exportación; adecuada para consumo en fresco por su gran balance en sabor. Sensibilidad moderada a

cenicilla (*Sphaerotheca macularis*) y mancha angular (*Xanthomonas fragariae*) (Calderon, *et al.*, 2009).

Jacona: Fruto grande y firme de excelente sabor adecuado para consumo en fresco; altamente productiva con altos porcentajes de fruto con calidad de exportación; producción precoz. Limitada sensibilidad a enfermedades como cenicilla (*Sphaerotheca macularis*) y mancha angular (*Xanthomonas fragariae*) (Calderon, *et al.*, 2009).

Festival: Produce frutos firmes, de color rojo profundo con excelente sabor. Esta variedad es susceptible a la antracnosis (pudrición de fruto y corona) causado por *Colletotrichum fragariae* (Stapleton *et al.*, 2001).

Cal Giant: Variedad de sabor excepcional, mostrando una agradable combinación de azúcares y ácidos. La fruta mantiene su sabor consistente a lo largo de todas las fructificaciones. Posee una fuerte tendencia a adquirir un gran porte. Presenta muy buena tolerancia a enfermedades foliares tales como Cenicilla (*Sphaerotheca macularis*), mancha de la hoja (*Mycosphaerella*) y Antracnosis (*Colletotrichum* spp) (información proporcionada por el Ign. Rafael Vega del Río, técnico de la Fundación Produce Michoacán A.C.).

3.3 Cultivo

Para el cultivo se emplearon bolsas de plástico negras, con capacidad de 2 kg. y se llenaron con una mezcla de vermiculita y tierra de monte, previamente esterilizado, posteriormente al llenado de bolsas se hizo una aplicación al suelo con fungicida BUSAN® 30 WB (1.0 ml/ l. de agua) de forma preventiva antes del transplante. Las

plantas se trasplantaron el día 22 de septiembre del 2008 y de inmediato se regaron con agua corriente a capacidad de campo, a partir del tercer día se agregaron 200 ml de agua por bolsa y así sucesivamente. Los fertilizantes usados como fuente de macroelementos y microelementos fueron: Nitrofoska, Urea, Bayfolan y Sagaquel Calcio, los dos primeros fertilizantes se aplicaron semanalmente al inicio de la plantación, y los dos últimos, cada 15 días hasta el término del ciclo de producción.

Durante el crecimiento de la planta se tuvo problema de Oidio de la fresa (*Sphaeroteca macularis fragariae*), los síntomas iniciaron a finales de febrero del año 2009. El control correspondiente se realizó con aplicaciones de fungicida Benomil en dosis de 1 g/l de agua, asperjado al follaje, cada 8 días, iniciando desde el 10 de marzo hasta inicios del mes de mayo que se realizó la última aplicación.

3.4 Tratamientos y diseño experimental

El experimento se condujo en un diseño completamente al azar (Kuehl, 2001) con las variedades como tratamientos. La unidad experimental consistió en una planta de fresa, con diez repeticiones por tratamiento.

3.5 Variables respuesta

3.5.1 Crecimiento del fruto

Área foliar. Al final del período experimental, el día 04 de diciembre de año 2009 (después de 3 meses de evaluación de la producción de fruto) se cosecharon 10 plantas por tratamiento para la estimación del crecimiento final de dichas plantas, se

determinó el área foliar, con ayuda de un integrador foliar LI-3000 (LI.COR, Nebraska, EE. UU.), el cual fue registrado por planta de cada uno de los tratamientos (diferentes variedades de fresa).

Dinámica de crecimiento de fruto (diámetro). Esta variable se midió cada tercer día a partir de 10 días después de anthesis hasta el momento de su cosecha, esto fue hasta el momento en que los frutos presentaron una coloración de 3/4 de rojo y se realizó con un vernier Truper, los datos se expresaron en milímetros (mm). Se estudió el crecimiento en 2 frutos por planta.

Producción total y distribución de materia seca. Al final del período experimental se cosecharon 10 plantas por tratamiento para la estimación del crecimiento final y los patrones de asignación de biomasa. Cada planta se dividió en raíz, corona, hoja con peciolo y fruto. Posteriormente las muestras de los diferentes órganos se colocaron en un horno a 70°C hasta que alcanzo un peso constante y finalmente se pesaron en una balanza digital y los datos se expresaron en gramos (g).

Diámetro final y peso final de fruto. Al final del periodo de producción, también se registró la biomasa fresca y seca (expresado en gramos g) a 15 frutos por tratamiento (cosecha final), así como también el diámetro ecuatorial, expresado en milímetros (mm).

3.5.2 Producción y rendimiento de fruto

Dinámica de producción de fruto por planta, Producción mensual y Producción acumulada por planta. La toma de datos inicio el 20 de agosto del 2009 y

concluyo el 26 de noviembre del mismo año. Se muestrearon frutos de fresa en estado de madurez comercial (3/4 del total de la superficie del fruto con coloración roja). Una vez que el fruto presentó el tamaño y coloración adecuados, se determinaron las siguientes variables: número de frutos cosechados (se realizó cada tercer día los dos primeros meses de cosecha y dos veces por semana el último mes de cosecha). Posteriormente se les tomo el peso a los frutos cosechados de cada una de las plantas muestreadas, dichos frutos se pesaron en una balanza digital durante toda la etapa de producción. Los datos se expresaron en gramos (g).

3.5.3 Variables fisiológicas

Intercambio de gases en hoja individual: Tasa Fotosintética (TF); Tasa Transpiratoria (TT); Conductancia Estomática (CE) y Eficiencia en el Uso del Agua (EUA).

La evaluación de intercambio de gases se realizó con un sistema abierto y portátil de análisis de gases en el espectro infrarrojo (Ciras-1, PP Systems, Inglaterra), esto significa que las mediciones de fotosíntesis y transpiración están basadas en las diferencias de las concentraciones de CO₂ y H₂O en una corriente de aire que fluye a través de una cámara foliar. El Ciras-1 se ajustó y calibró de acuerdo a las instrucciones del proveedor (PP Systems, Inglaterra) y se le adjuntó una cámara foliar estándar con un área de exposición foliar de 2.5 cm². La velocidad de flujo en la cámara foliar se ajustó a 3.3 cm³ s⁻¹, la resistencia de la capa límite a 0.28 m² s mol⁻¹ (H₂O) y la temperatura de la hoja se estimó mediante el método de balance de energía

facilitado por el instrumento. Se utilizó un coeficiente de transmisión de 0.15 acorde con las instrucciones de manufactura. Se realizaron tres mediciones en la sección central de una hoja madura completamente expandida entre las 12:00 y 13:30 h, en 10 plantas por tratamiento los días 17 y 30 de septiembre, 6 y 21 de octubre, 13, 20 y 27 de noviembre. El intercambio de CO₂ y H₂O fue medido con una cámara foliar estándar (PP Systems Inglaterra) con luz natural, temperatura de la hoja de 27 °C, humedad relativa entre 60 y 70 %, y una concentración de 36 Pa de CO₂. La tasa fotosintética de CO₂ (*TF*) se registró en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la conductancia estomática (*g_s*) en $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y la tasa transpiratoria (*E*) en $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A nivel de la hoja, la eficiencia en el uso del agua (EUA) se estimó con las mediciones de intercambio de gases y fue calculada como la proporción de la tasa de asimilación de carbono entre la tasa transpiratoria (*TF/TT*), dado que *TF* está dado en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y *TT* en $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, esta última se transformó a $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y así el índice EUA es adimensional (Chaves et al., 2004).

3.6 Análisis Estadístico

Se realizó análisis de varianza con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS versión 8.2 año 1998 (SAS Institute, NC, EE. UU.) y prueba de comparación de medias Tukey con un nivel de significancia del 5 % para determinar diferencias significativas entre tratamientos.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Crecimiento

4.1.1 Dinámica de crecimiento de fruto (diámetro)

Las mediciones en secuencia cronológica del diámetro de fruto en las cuatro variedades de fresa permitieron evaluar su crecimiento en el tiempo. La Figura 1 muestra las diferencias entre las cuatro variedades en el desarrollo del diámetro del fruto, comprendiendo las etapas fenológicas desde la flor hasta la madurez completa del fruto. Para el caso de la variedad Zamorana se puede observar una mayor magnitud del diámetro del fruto, alcanzando su valor máximo de 43 mm a los 27 días después de antesis. Por su parte, la variedad Jacona muestra tamaño similar en el diámetro del fruto, ya que a los 34 días de ocurrida la antesis alcanza un valor máximo de 42 mm. La variedad mexicana Jacona también muestra frutos grandes, mayores de 40 mm de diámetro. En contraste, las variedades comerciales cuentan con menores dimensiones para esta variable con un valor de 22 mm a los 26 días y 29 mm a los 27 días para las variedades Festival y Giant respectivamente. Al respecto Larson (2000), menciona que la fresa es una planta altamente variable con adaptación a muchos climas y ambientes. Como ocurre en este caso, al evaluar las variedades mejoradas y comerciales se tiene que se obtuvieron frutos de mayor tamaño con las variedades mexicanas mejoradas, lo que se considera como fruta de alta calidad. Larson (2000), menciona, que la selección del sitio de producción y de variedades mejoradas es esencial para lograr un mayor rendimiento y mejor calidad de fruto.

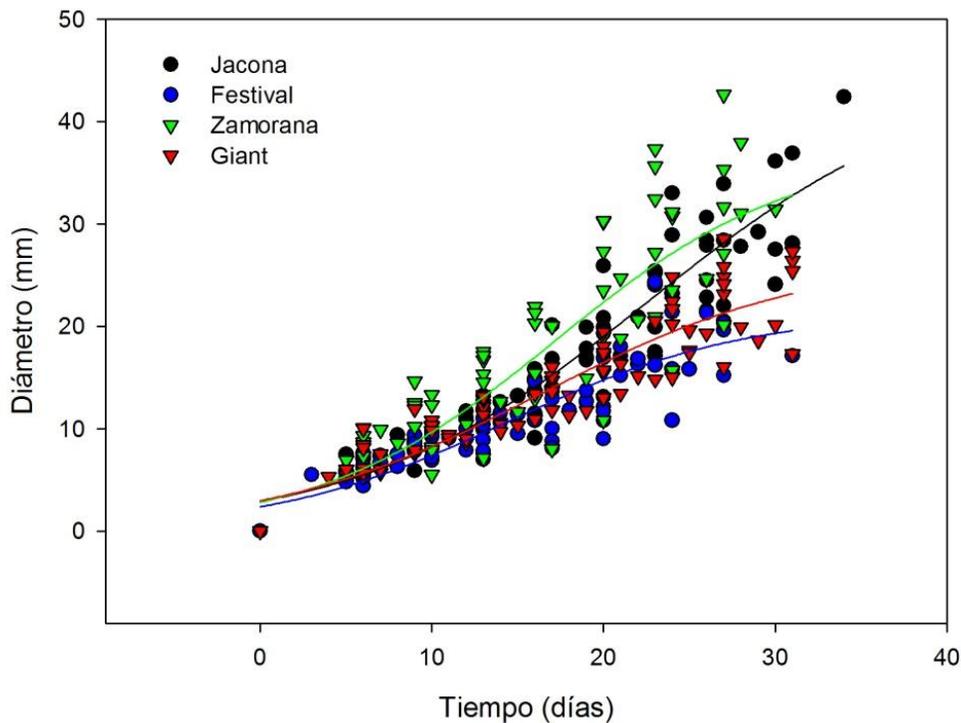


Figura 1. Desarrollo del fruto en el tiempo de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Las líneas muestran las tendencias dentro de cada variedad. Cada punto representa el dato de un fruto creciendo en invernadero en Montecillo, Edo. de México.

4.1.2 Área foliar

El área foliar se utiliza para denotar la magnitud de la maquinaria fotosintética, la cual es considerada como la principal fuente de fotosintatos para satisfacer la demanda ejercida por los órganos vegetativos y reproductivos en crecimiento (Escalante y Kohashi, 1993). Se puede observar en la Figura 2 que la variedad Zamorana presenta

una mayor superficie foliar con una media de 832.3 cm², significativamente superior a las variedades extranjeras introducidas (Festival y Giant) pero sin diferencia significativa con 'Jacona' que presentó un tamaño medio de 637.7 cm² de aparato fotosintético. Gifford *et al* (1984), Farías (2002), mencionan que el incremento del rendimiento está ligado a cambios en la fijación de bióxido de carbono por unidad de área foliar del cultivo y a la distribución de los fotosintatos entre los órganos de la planta, lo que resalta la importancia de un tamaño mayor del aparato fotosintético sin llegar a ser excesivo. En comparación las variedades comerciales Festival con una media de 529.9 cm² y Giant con una media de 574.1 cm² de área foliar sin diferencia significativas entre ellas, ni con 'Jacona', pero si son significativamente menores en comparación con la variedad mexicana Zamorana (Figura 2).

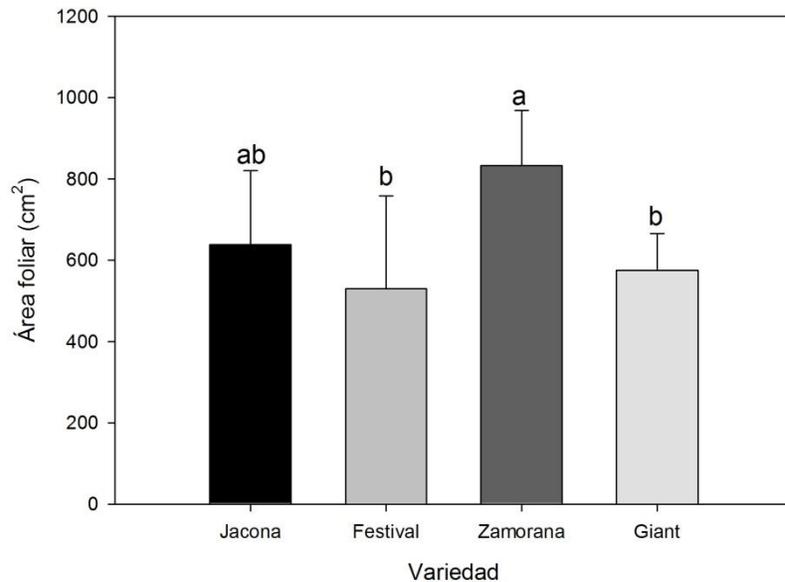


Figura 2. Producción de área foliar de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio y la barra vertical indica la desviación estándar ($n = 10$). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

4.1.3 Producción total y distribución de materia seca

En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos para la variable producción y distribución de materia seca de las variedades analizadas. Es notoria la diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en la producción total acumulada de biomasa de las variedades mexicanas respecto de las comerciales extranjeras. Sin embargo, no hay diferencia entre las variedades nacionales. A su vez, las variedades comerciales presentan valores promedio similares de materia seca total producida. Pessarakli (1997),

menciona que la eficiencia en el control de la partición de carbono asimilado es crucial para la productividad de una planta. El control de la partición de carbono es el resultado de varios factores actuando a nivel celular, hoja o sistema, los cuales están afectando la demanda de carbono en los diferentes órganos. Como se puede apreciar, las variedades nacionales son más eficientes en la partición de carbono para la producción de materia seca en términos totales.

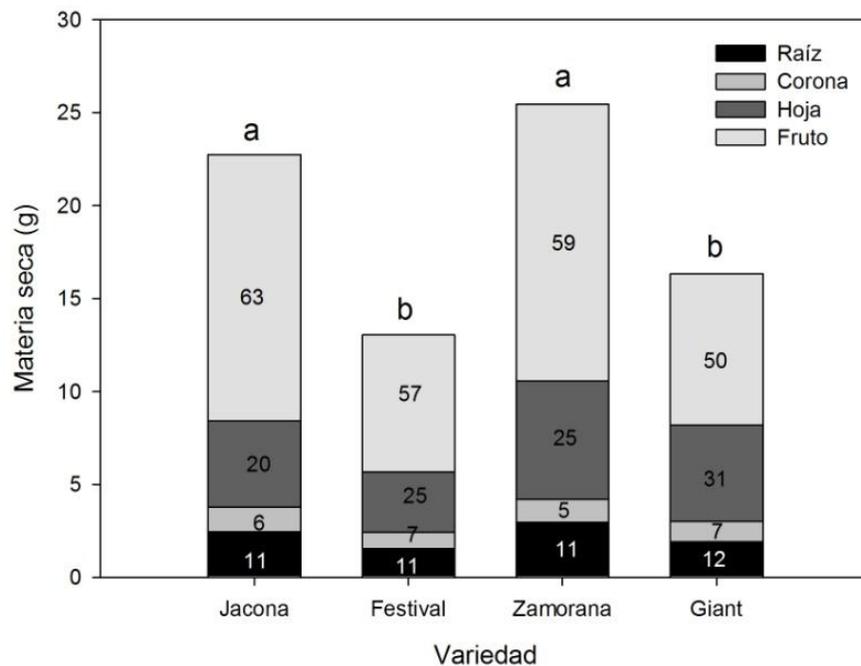


Figura 3. Producción total de materia seca y porcentajes de la partición de biomasa seca por compartimento u órgano (números) en cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero ($n = 10$). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) en materia seca total acumulada por planta.

García y Guardiola (2003), mencionan que la respuesta fotosintética y respiratoria determinan la cantidad de carbono disponible para el crecimiento de los diferentes órganos componentes de las plantas, el rendimiento real del fruto depende de la partición de ese carbono hacia sus componentes; y esa partición es afectada en gran medida por las prácticas de manejo y factores ambientales, principalmente la temperatura. Se observa en la Figura 3 que los mayores porcentajes de materia seca se concentran en el fruto, en promedio el 57.25%.

La mayor acumulación de materia seca en todas las variedades de fresa estudiadas, corresponde al fruto, con valores de entre 50 y 69%, los valores mayores corresponden a las variedades mexicanas. Por su parte, la proporción de materia seca repartida en la hoja para todas las variedades varió de 20 a 31%. La variedad Jacona muestra que con un 20% de su materia seca total acumulada en hojas, tuvo la mayor asignación de materia seca en frutos (63%), lo cual indica que puede ser una planta más eficiente puesto que además de asignar un porcentaje alto de materia seca a sus frutos, mostró una alta producción total de peso seco. Por su parte, se comprueba que la variedad Giant, como lo dice su descripción, posee una fuerte tendencia a adquirir un gran porte ya que tuvo la mayor materia seca en hojas (31%).

En lo que se refiere a la partición de materia seca a la corona todas las variedades acumularon la menor proporción de su materia seca en éste órgano (entre 5 y 7%), los menores valores fueron en las variedades mexicanas. En el caso de la raíz se observa que las cuatro variedades acumularon similar porcentaje de biomasa en éste órgano (de 11 y 12%).

El Índice de Cosecha (IC) es la proporción de materia seca que se acumula en el órgano de mayor interés, en este caso el fruto, en relación a la biomasa total. Al final, se puede indicar que el índice de cosecha de las variedades mexicanas Jacona y Zamorana fue de 0.63 y 0.59, mientras que en 'Festival' y 'Giant' este índice de cosecha fue de 0.57 y 0.50, respectivamente. Es apreciable entonces que las variedades mexicanas pueden ser más eficientes toda vez que muestran un mayor IC. Sin embargo, además, es sobresaliente e importante indicar también que Zamorana y Jacona tuvieron una mayor producción total de biomasa por planta. La partición de materia seca es un indicador de la distribución de carbono (fotoasimilados) hacia los distintos puntos de demanda en crecimiento, por lo que puede considerarse como un parámetro muy importante en la determinación de la productividad (García y Guardiola, 2003).

4.1.4 Diámetro final y peso final de fruto

El ANOVA y la prueba de comparación de medias con base en la prueba de Tukey a un nivel de significancia de $\alpha 0.05$ permitieron evaluar las diferencias entre las variedades de fresa sobre el diámetro de fruto. En la Figura 4 se muestra el diámetro de fruto final para todas las variedades de fresa evaluadas. El análisis de comparación múltiple de medias indica las diferencias significativas entre variedades. 'Zamorana' tuvo el mayor diámetro de fruto con 34.05 mm, significativamente superior a la variedad Jacona con una media de 30.07 mm. Ambas variedades mexicanas con esos valores se muestran significativamente superiores en tamaño de fruto a las variedades

comerciales extranjeras Festival con una media de 21.91 y Giant con diámetro medio de fruto de apenas 20.24 mm.

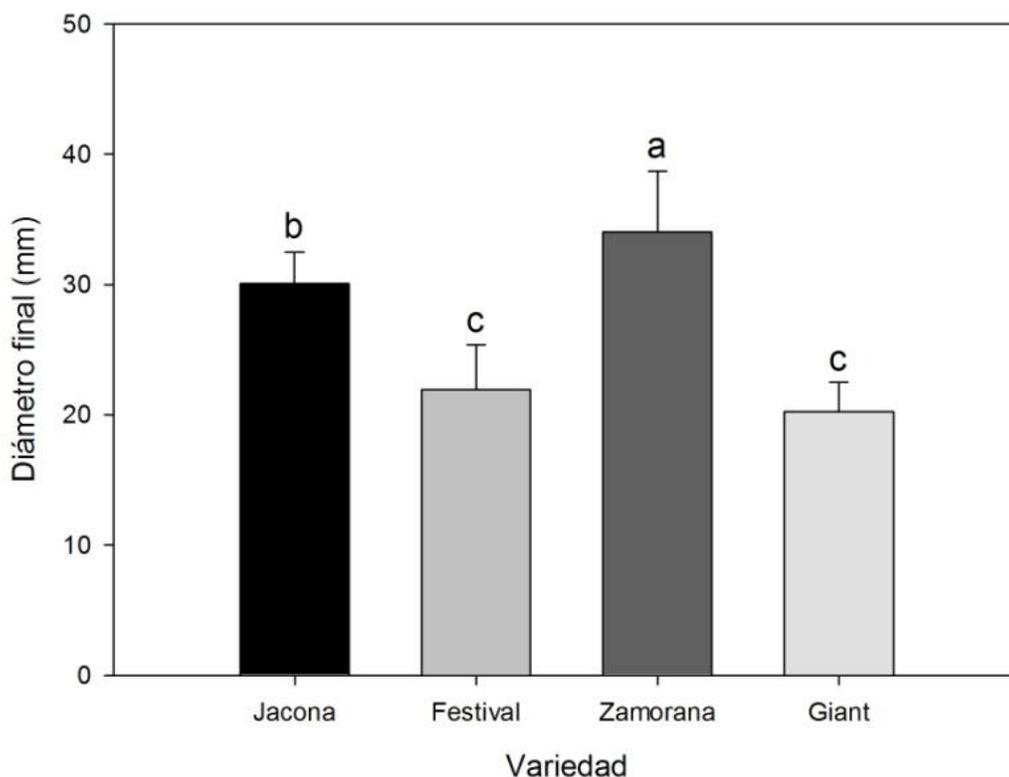


Figura 4. Diámetro final del fruto de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales arriba de cada columna) ($n = 15$). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

En la Figura 5 se presentan los diferentes valores obtenidos para el peso fresco final de fruto, de lo cual se desprende que, de manera similar al diámetro final de fruto, el valor más alto para este parámetro de crecimiento lo reporta la variedad Zamorana

que presenta los mayores valores de peso fresco, seguida de la variedad Jacona. Se distinguen diferencias significativas entre las variedades nacionales en comparación con las variedades comerciales Festival y Giant, que no difieren estadísticamente entre ellas para esta variable, y que resultaron con frutos significativamente ($P \leq 0.05$) menores que las variedades mexicanas. Dados los resultados obtenidos, se considera que las variedades nacionales pueden ser más productivas que las comerciales introducidas, ya que prácticamente duplican el valor para esta variable en particular, lo cual se convierte en un indicador de su mayor capacidad productiva.

En general, zonas de demanda son competencia y los fotoasimilados son distribuidos en todos esos puntos de acumulación de materia seca; sin embargo, el potencial de la demanda de órganos individuales varía con el tiempo anual y edad de la planta, puesto que la demanda potencial de crecimiento y el patrón de desarrollo estacional de la planta cambian con el tiempo. Por lo anterior, el alto potencial de crecimiento de los órganos está estrechamente relacionado con el rendimiento de los cultivos (Hopkins, 1999).

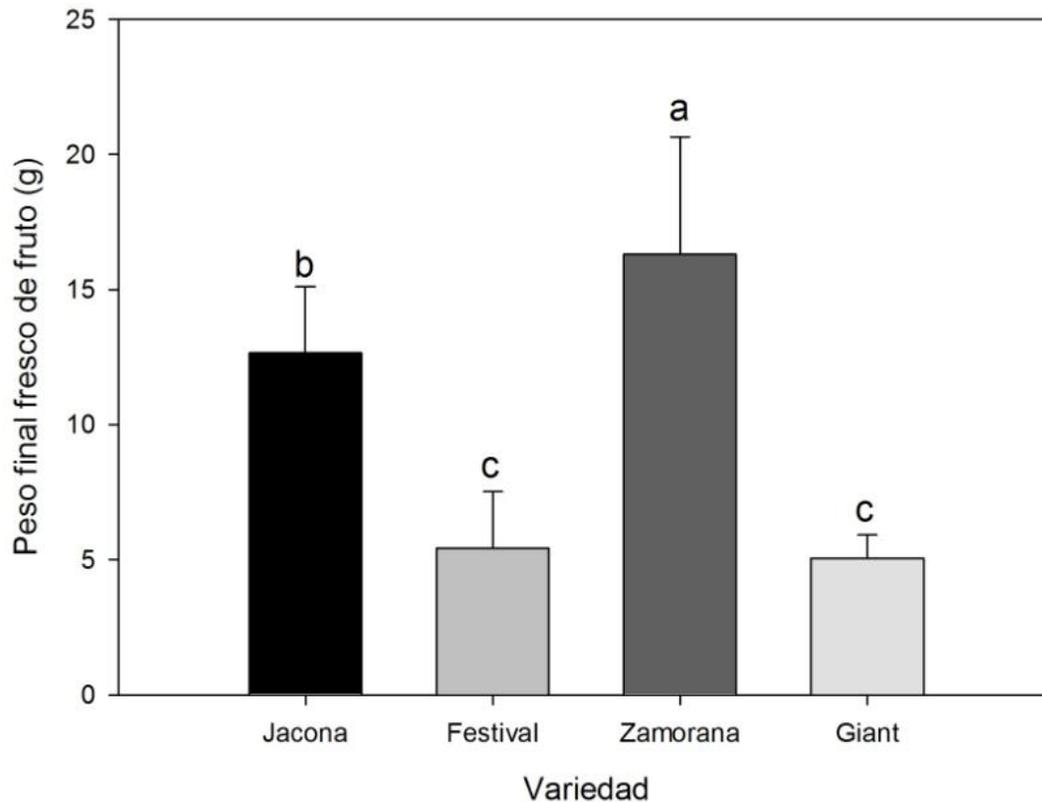


Figura 5. Biomasa fresca final del fruto de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales) ($n = 15$). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

La biomasa seca es un indicador de la fijación de carbono, por lo que puede considerarse como un parámetro muy importante en la determinación de la productividad (García y Guardiola, 2003). En estrecha relación con los indicadores de tamaño de fruto arriba descritos, las variedades Zamorana y Jacona reportan los valores más altos para peso seco final, pero esta vez no se muestran diferencias

significativas para esta variable. Por su parte para las variedades Festival y Giant los valores similares para peso seco final permiten indicar que no existe diferencia entre ellas (Figura 6) pero si fueron significativamente menores a las variedades mexicanas.

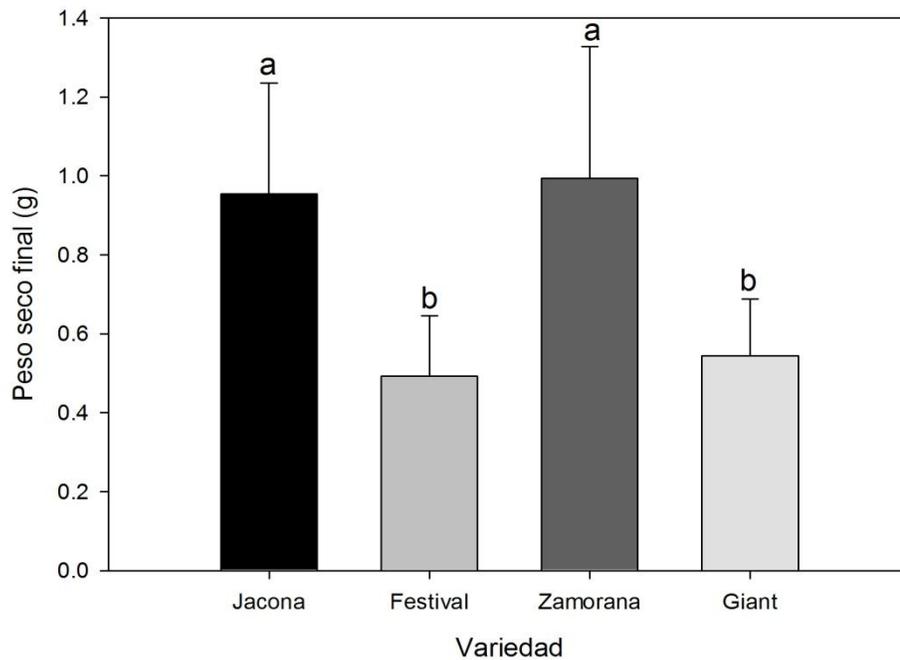


Figura 6. Biomasa seca final del fruto de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales) ($n = 15$). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

De acuerdo con Corelli-Grappadelli y Lakso (2004), la carga de frutos afecta la partición de recursos entre el crecimiento vegetativo y reproductivo. Como se puede observar, y se ha descrito y discutido previamente en la producción total y distribución

de materia seca, en las variedades Jacona y Zamorana estos recursos se concentran mayormente en el fruto contribuyendo a un mayor peso seco en el mismo.

4.2 Producción y rendimiento de fruto

4.2.1 Dinámica de producción de fruto por planta

Durante los últimos días de noviembre de 2009 que concluyó la evaluación de la producción de fruto se aprecia en la Figura 7 que 'Zamorana' inició con mayor producción de fruto que el resto de las variedades. Las variedades Jacona y Festival iniciaron muy similares pero arriba de 'Giant'. Conforme transcurre el tiempo de evaluación, se observa en todas las variedades un aumento en la producción mensual acumulada, esta tendencia se mantiene hasta el final del periodo de evaluación (Figura 7). Hancock (1999), menciona que el aumento en la producción debe ser consecuencia de una abundante diferenciación de yemas florales por efecto de los días cortos que antecedieron ese período; al respecto, se indica que las plantas de día corto, como lo son las variedades estudiadas, presentan la iniciación de las yemas florales en condiciones de fotoperiodo corto, o cuando las temperaturas son menos de 15 °C y con un fotoperiodo de 8 a 12 h, como lo es el caso de este estudio en los meses de septiembre en adelante.

Al paso del tiempo, la dinámica de producción mensual de fruto indica (Figura 7) que las diferencias entre variedades se hacen más evidentes. La variedad mexicana Zamorana se muestra cada vez más superior a todos los demás cultivares, le, sigue

'Jacona' también notablemente mejor que las variedades introducidas (Figura 7). Baumann, *et al.*, (1993) indican que el comportamiento de las plantas en diferentes condiciones de temperatura, influye sobre el rendimiento acumulado por el desbalance entre los componentes de rendimiento. El rendimiento más bajo mensual de fruto en las variedades extranjeras puede deberse a una inadaptación a las condiciones climáticas locales de las altas temperaturas más aun en condiciones de cultivo bajo invernadero, que pudieron ocasionar la disminución del tamaño de fruto, ya que durante el desarrollo reproductivo, las plantas son sensibles a las altas temperaturas (Mckee y Richards, 1998). En contraste, las variedades mexicanas han sido creadas y seleccionadas para su buen desempeño en condiciones cálidas en el subtrópico mexicano (Rodríguez y Calderón, 2007; Calderón y Vega, 2009; Calderón *et al.*, 2009). Está reportado que temperaturas por encima de 30 °C, reducen el tamaño de la fruta el peso de fruto y el crecimiento de la planta (Hellman y Travis, 1988); (Wang y Camp, 2000).

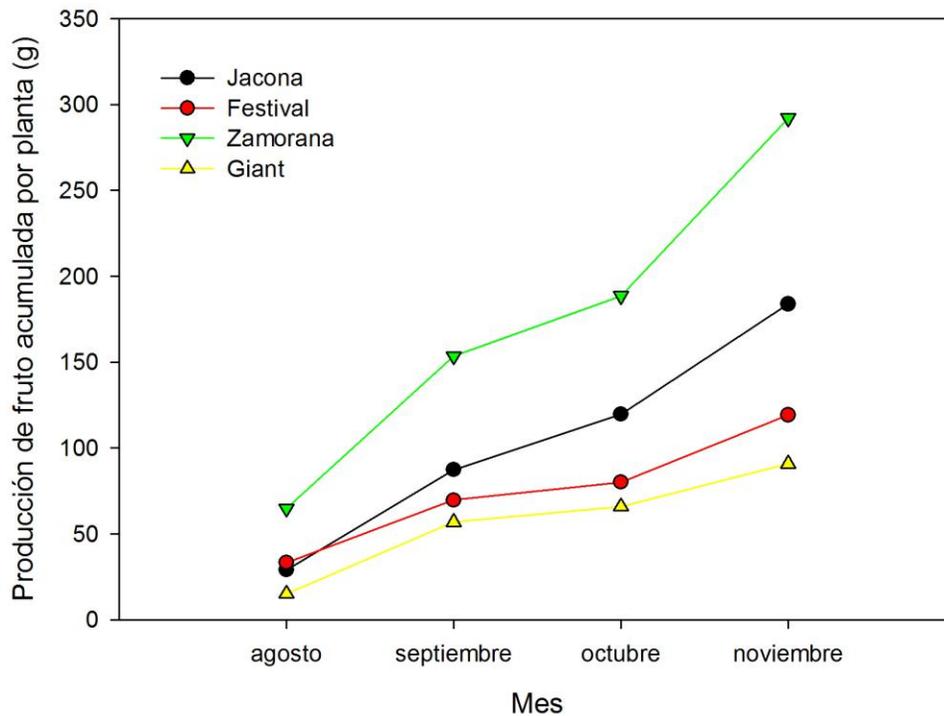


Figura 7. Dinámica de producción de fruto acumulada por planta durante el periodo experimental de cuatro variedades de fresa en Montecillo, Edo. de México. Los datos son el promedio de 10 plantas por variedad.

Es recomendable estudiar todos los factores que pueden incidir en la producción de las variedades de fresa analizadas, desde los aspectos intrínsecos a su biología, hasta las prácticas culturales como son: la adecuación del espacio de crecimiento, el control de la humedad y la temperatura, las fertilizaciones riegos y podas. Todo esto con el fin de mejorar e incrementar en cantidad y calidad las cosechas.

4.2.2 Producción mensual por planta

Los resultados de la producción mensual de los cultivares de fresa (Figura 8) indican que la variedad Zamorana es la más productiva, ya que durante los meses de evaluación de septiembre, octubre y noviembre presentó los mayores valores para el peso fresco del fruto, seguida de la variedad Jacona. Solamente durante el mes de agosto la variedad Festival tuvo más rendimiento que la 'Jacona'. Durante los meses de septiembre a noviembre las variedades comerciales extranjeras (Festival y Giant) presentan los menores valores para el peso fresco del fruto, lo que demuestra su menor rendimiento respecto a las variedades nacionales.

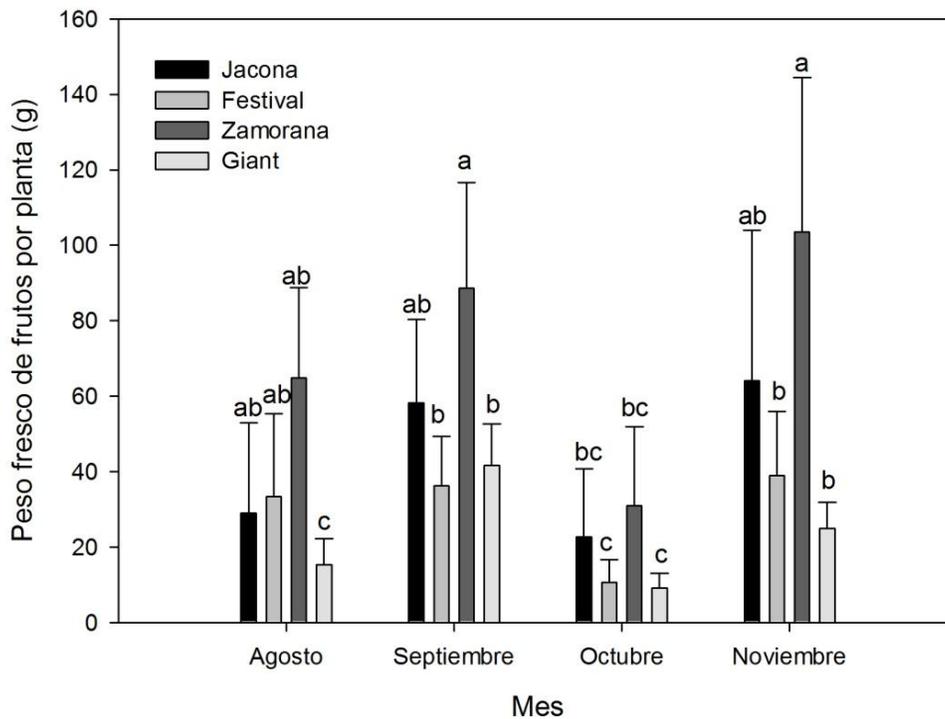


Figura 8. Comparación de la producción promedio mensual final por planta de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero en Montecillo, Edo. de México. Las columnas son el promedio más la desviación estándar (barras verticales). ($n = 10$). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Mitcham (1996) menciona que en el cultivo de fresa, uno de los factores más importantes para asegurar su rendimiento y calidad inicia desde la selección de cultivares. En ese sentido, las variedades nacionales de fresa (Jacona y Zamorana),

son las opciones más recomendables cuando se pretenden alcanzar los mayores rendimientos de fruto en las condiciones de estudio.

4.2.3 Producción acumulada total por planta

Coincidentemente con los resultados presentados en la Figura 7, la variedad Zamorana presenta mayor producción acumulada total por planta, seguida de la variedad Jacona (Figura 9). Las variedades comerciales Festival y Giant no presentan diferencias significativas entre ellas pero si se muestran inferiores respecto de las variedades nacionales. Al respecto Wilson (1972), menciona que el rendimiento de un cultivo está dado por la capacidad de acumular biomasa (materia fresca-seca) en los órganos que se destinan a la cosecha y un incremento proporcional de la biomasa destinada a estos órganos garantiza un aumento del rendimiento. Por su parte, Flore y Layne (1999), mencionan que el incremento del rendimiento está ligado a cambios en la fijación fotosintética de bióxido de carbono.

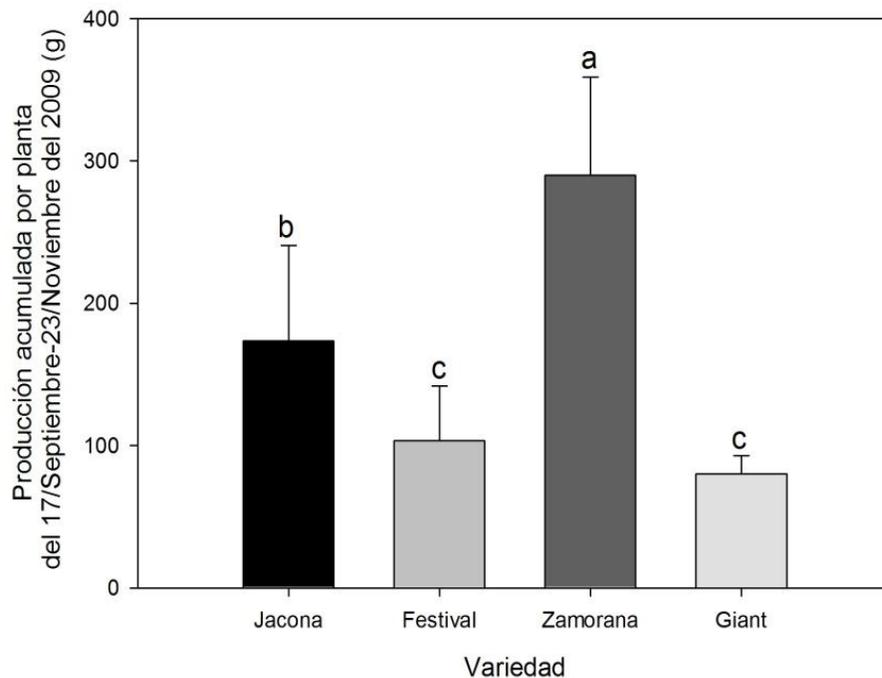


Figura 9. Producción total acumulada de fruto por planta de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero en Montecillo, Edo. de México. Los datos son el promedio más la desviación estándar (barras verticales) ($n = 10$). Letras distintas entre variedades indican diferencias significativas mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

La respuesta de las variedades en producción total de fruto acumulada en el periodo de estudio, coincide con la respuesta que tuvieron las variedades en producción total de materia seca y su partición a fruto (Figura 3). La variedad Giant, sin embargo, presentó mayor acumulación total de materia seca, aunque no en forma significativa, que 'Festival' (Figura 3) pero menor producción de fruto que 'Festival' (Figura 9) debido a que mostró un menor índice de cosecha pues acumuló mayor cantidad de materia seca en hojas y no en frutos.

4.3 Variables fisiológicas

4.3.1 Tasa Fotosintética (TF)

En la Figura 10 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de Fotosíntesis Neta (Asimilación de CO₂) para las cuatro variedades en estudio. Durante las primeras mediciones coinciden en su mayoría con una floración más abundante a partir del 17 de septiembre, la variedad Zamorana presentó la mayor tasa de fotosíntesis neta, sin embargo, en las mediciones coinciden con mayor número de frutos en desarrollo, a partir de octubre, la variedad Jacona presentó las mayores tasas de fotosíntesis hasta el 13 de noviembre, al final la asimilación de CO₂ fue mayor para la variedad Zamorana (Figura 10).

Las tendencias de las variedades extranjeras son similares entre ellas, las discrepancias más notables se presentan durante la etapa de floración más abundante, en la primera medición, ya que la variedad Giant presenta mayor asimilación de CO₂ al inicio del periodo de muestreo. Posterior al 21 de octubre y el 13 de noviembre se invierten las tendencias pues es más notable que 'Festival' presenta mayor TF que 'Giant' (Figura 10). En las dos mediciones finales la variedad Giant presenta mayor fotosíntesis que 'Festival'. Así, en general, las tasas de asimilación de CO₂ son mayores para la variedad Jacona, seguida de Zamorana, Festival y Giant. De acuerdo con Gifford *et al.* (1984), el incremento del rendimiento está ligado a cambios en la fijación de bióxido de carbono por unidad de área foliar del cultivo y a la distribución de los fotosintatos entre los órganos de la planta. De esta manera, posiblemente la mayor producción de las variedades mexicanas puede ser explicada por altas tasas de

asimilación de CO₂ aunadas a una mayor producción de área foliar. Es de suma importancia considerar la relación fuente-demanda entre hojas y frutos, puesto que la cosecha genera una competencia alta por fotosintatos y productos de reserva y esta competencia repercute en la fisiología de toda la planta (Ryugo, 1993). Las hojas, y en menor medida, los tallos verdes y los frutos inmaduros abastecen el resto de la planta con compuestos orgánicos de carbono. Así pues, los órganos que sintetizan y exportan sustancias son los llamados fuentes. Pero la principal fuente que interviene en el desarrollo son las hojas maduras (Ryugo, 1993).

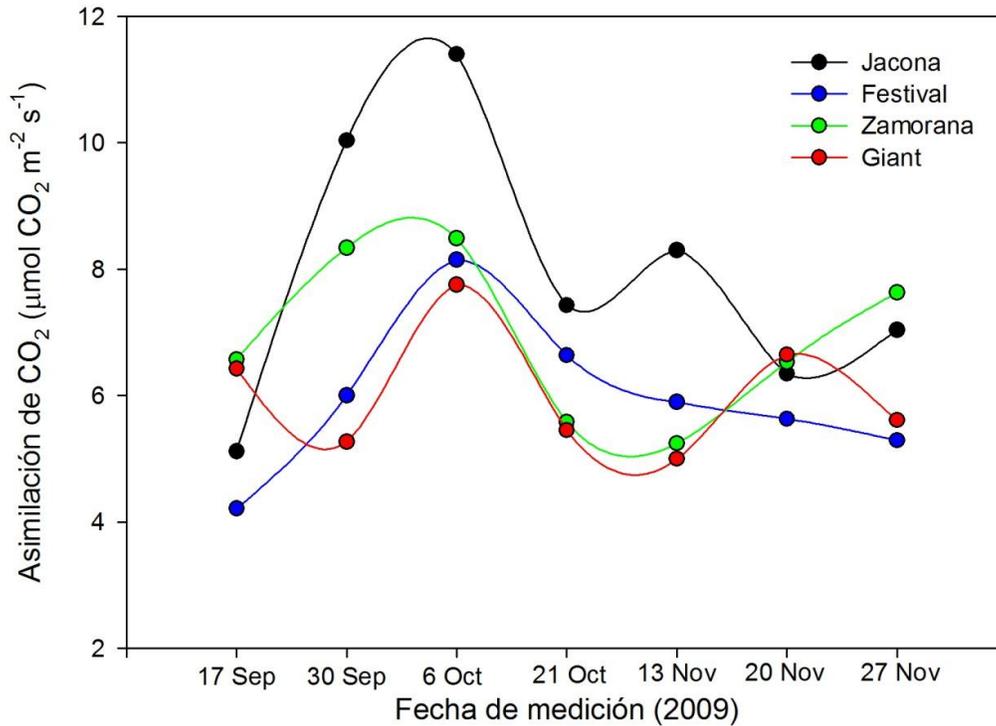


Figura 10. Fotosíntesis Neta de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero en Montecillo, Edo. de México.. Los datos son el promedio de tres mediciones en 10 plantas de cada variedad en cada medición. Las condiciones de Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y Temperatura (T° , en $^\circ\text{C}$) fueron como sigue: 17 de septiembre = 183.2 ± 39.1 , (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , T° = 26.7 ± 0.8 ; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , T° = 25.3 ± 1.1 ; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , T° = 27.4 ± 0.9 ; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , T° = 24.8 ± 0.9 ; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , T° = 27.5 ± 0.6 ; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , T° = 26.9 ± 0.9 .

El comportamiento de la transpiración, conductancia estomática y la tasa fotosintética varió grandemente durante el periodo de estudio (Figura 10, y Cuadros 1, 2 y 3, que muestran los datos de una medición inicial, una intermedia y una final durante el tiempo de estudio), esto puede ser debido a la variabilidad en las condiciones ambientales del invernadero (temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa); así como también a los hábitos de crecimiento de las distintas variedades en relación a la etapa fenológica de la planta. La tasa de asimilación de CO₂ es significativamente afectada por varios factores, incluyendo el nivel de luz, temperatura, disponibilidad de nutrientes, concentración de CO₂, estado de desarrollo, cultivo o cultivar y método de propagación (Dale y Luby, 1990).

Cuadro 1. Comparación de la Tasa de Asimilación de CO₂ (TF, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Tasa Transpiratoria (TT, en $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Conductancia Estomática (CE, en $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) de cuatro variedades de fresa durante el muestreo realizado el 17 de septiembre del año 2009 en Montecillo, Edo. de México.

Variedad	TA	TT	CE	EUA
JACONA	5.11 b	3.62 a	174 a	0.00144 a
FESTIVAL	4.44 b	2.60 b	109 b	0.00175 a
ZAMORANA	6.57 a	4.01 a	199 a	0.00171 a
GIANT	6.42 a	3.87 a	166 a	0.00166 a

Los datos son el promedio de mediciones en 10 plantas. Letras distintas dentro de cada columna denotan diferencias significativas mediante la prueba Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Comparación de la Tasa de Asimilación de CO₂ (TF, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Tasa Transpiratoria (TT, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Conductancia Estomática (CE, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) de cuatro variedades de fresa durante el muestreo realizado el 06 de octubre del 2009 en Montecillo, Edo. de México.

Variedad	TA	TT	CE	EUA
JACONA	11.40 a	3.84 ab	153 a	0.00297 a
FESTIVAL	8.14 b	2.85 c	106 b	0.00291 ab
ZAMORANA	8.48 b	3.37 b	122 b	0.00251 b
GIANT	7.75 b	3.93 a	122 b	0.00194 c

Los datos son el promedio de mediciones en 10 plantas ($n = 10$). Letras distintas dentro de cada columna denotan diferencias significativas mediante la prueba Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 3. Comparación de la Tasa de Asimilación de CO₂ (TF, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Tasa Transpiratoria (TT, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), Conductancia Estomática (CE, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) de cuatro variedades de fresa durante el muestreo realizado el 20 de noviembre del año 2009 en Montecillo, Edo. de México.

Variedad	TA	TT	CE	EUA
JACONA	6.34 a	3.31 a	93 a	0.00197 a
FESTIVAL	5.63 a	3.12 a	84 a	0.00183 a
ZAMORANA	6.52 a	3.31 a	87 a	0.00197 a
GIANT	6.64 a	3.01 a	76 a	0.00217 a

Los datos son el promedio de mediciones en 10 plantas ($n = 10$). Letras distintas dentro de cada columna denotan diferencias significativas mediante la prueba Tukey ($P \leq 0.05$).

Todos los valores promedio de la tasa de asimilación de CO₂ (TF) que se obtuvieron en las 7 mediciones (Figura 10) que se llevaron a cabo de septiembre a noviembre de 2009, indican TF siempre inferiores a $12 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; los valores medios de la TF van de un promedio mínimo de 4.4 a un máximo de $11.4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 10, y Cuadros 1. 2 y 3), los cuales son tasas de asimilación de CO₂ muy bajas en relación a las tasas fotosintéticas reportadas en cultivos de fresa *Fragaria x*

ananassa Duch. en campo en niveles de 15 a 25 $\mu\text{moles}/\text{m}^2/\text{s}$ (Hancock *et al.*, 1989). Esas tasas bajas de asimilación de CO_2 encontradas como resultados en este estudio comparativo de las cuatro variedades pueden deberse a que las condiciones de luz, específicamente de radiación fotosintéticamente activa (RFA), fueron deficientes ya que los valores de esta variable ambiental durante las condiciones de medición en el interior del invernadero estuvieron en el intervalo de 183.2 y 345 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 10) aun cuando la temperatura del aire fue de entre 23.1 y 27.5 °C. Los valores de RFA son muy inferiores al punto de saturación por luz indicado para plantas C3 de entre 800 y 1000 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ (Dale y Luby, 1990), aunque las temperaturas caen en el intervalo de temperatura considerada como óptima para la fotosíntesis de una C3, reportada entre 20 y 35°C en niveles ambientales de CO_2 y saturación de luz (Jiao *et al.*, 1997).

4.3.2 Tasa Transpiratoria (TT)

La transpiración es la pérdida de agua en forma de vapor a través de los estomas (Nobel, 1999). Son muchos los factores que afectan la pérdida de agua por las plantas, los más importantes son los factores ambientales que afectan directamente la presión de vapor del agua en la hoja (Anderson, 1982). Por esta situación, se considera que la transpiración es un proceso en constante cambio. Los resultados muestran diferentes tendencias en los periodos de evaluación (Figura 11) pero no es apreciable la existencia de diferencias significativas. Para el 17 de septiembre, las variedades Zamorana y Giant reportan los valores más altos, seguidas de las variedades Jacona y Festival. Para el 6 y 21 de octubre al menos una de las variedades comerciales

introducidas tiene niveles de transpiración superiores a la variedad Zamorana. En los periodos finales de evaluación, las variedades nacionales (Jacona y Zamorana) presentan los valores más altos de transpiración, respecto a las variedades comerciales extranjeras (Festival y Giant), tal vez, debido a que esas variedades nacionales presentaron un mayor crecimiento de su área foliar ya discutido (Figura 2).

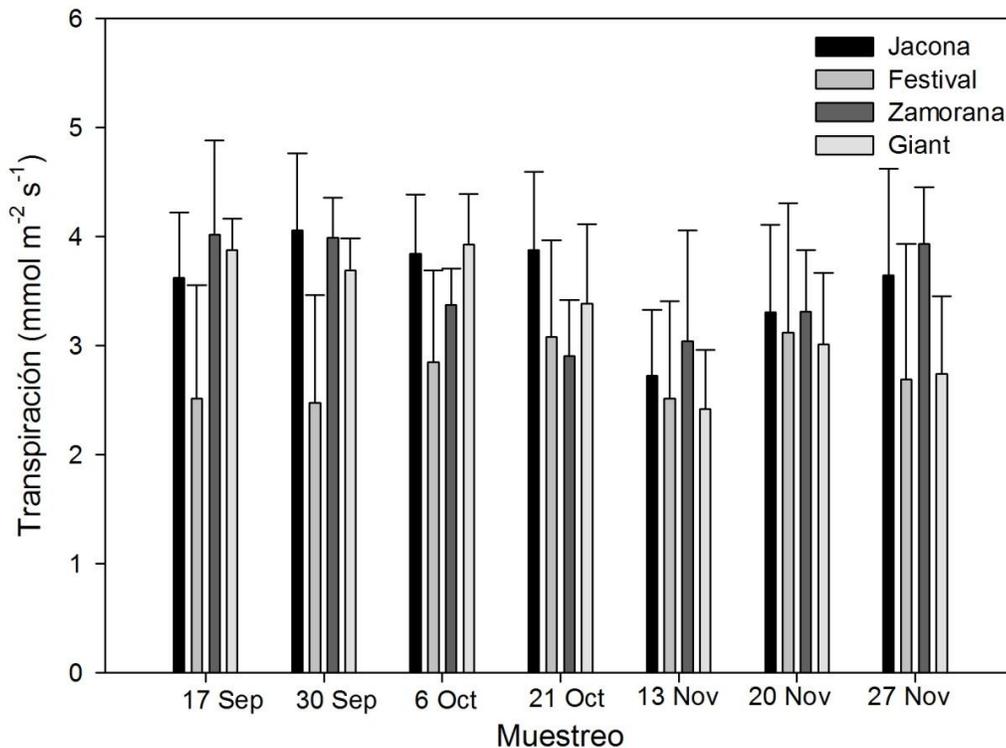


Figura 11. Transpiración de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero durante el periodo experimental. Los datos son el promedio + D.E. ($n = 10$). Se realizaron 7 muestreos los días 17 septiembre Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) = 183.2 ± 39.1 , Temperatura (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , $T^\circ = 26.7 \pm 0.8$; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , $T^\circ = 25.3 \pm 1.1$; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , $T^\circ = 27.4 \pm 0.9$; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , $T^\circ = 24.8 \pm 0.9$; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , $T^\circ = 27.5 \pm 0.6$; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , $T^\circ = 26.9 \pm 0.9$.

La transpiración como variable fisiológica es de gran interés con respecto al rendimiento de los cultivos, ya que el flujo de agua a través de la planta inducido por la transpiración, provee un buen sistema de transporte para los minerales, que son absorbidos por las raíces y que se mueven en la corriente transpiratoria. De esta forma la absorción de agua del suelo, tiene un efecto en la movilización de sales minerales del suelo hacia la raíz, facilitando su absorción (Caird, *et al.*, 2007). Otro efecto de la transpiración es la acción refrigerante de la hoja, ejerciendo un efecto de enfriamiento de la superficie foliar, lo que ayuda a mantener una temperatura adecuada de la hoja, durante días muy soleados. Se ha sugerido que la transpiración es necesaria para el crecimiento normal de las plantas, ya que ayuda a mantener un estado de turgor óptimo, ya que la pérdida de agua por transpiración mantiene la presión de turgencia por debajo de la presión osmótica (Nobel, 1999). Probablemente debido a todo ello, es que las variedades mexicanas resultaron con mayor capacidad de producción y acumulación de materia seca y tuvieron los mayores rendimientos de fruto e índices de cosecha.

4.3.3 Conductancia Estomática (CE)

De manera similar a los resultados obtenidos para la transpiración, y debido a la estrecha relación de ésta con la conductancia estomática, en la Figura 12 se presentan los valores obtenidos para esta última variable fisiológica con tendencia muy parecida a lo descrito en la TT de las cuatro variedades de fresa analizadas. No se aprecian diferencias significativas entre ellas. Los valores más altos se obtuvieron en la variedad

Zamorana al inicio del periodo de evaluación (17 de septiembre), seguida de la variedad Jacona. Los valores más bajos se presentan en las variedades comerciales. A partir del segundo muestreo (30 de septiembre), la tendencia se invierte, es decir, la variedad Jacona presenta los valores más altos de conductancia estomática, seguida de la variedad Zamorana, la Giant y Festival respectivamente. Para el resto de los periodos evaluados las variedades nacionales reportan los valores más altos para esta variable, y las comerciales extranjeras se mantienen en niveles inferiores prácticamente en todos los periodos, excepto para el 21 de octubre, donde las variedades comerciales superan a la variedad Zamorana. Sin embargo, en la última fecha de evaluación esta variedad, reporta el valor más alto de conductancia estomática.

La conductancia estomática en plantas con fotosíntesis C3 están expuestas a fluctuaciones periódicas en la diferencia de vapor de agua en las hojas del medio en el que se encuentran, esto presenta una amenaza de deshidratación por la pérdida de agua (transpiración) (Franks y Farquhar, 1999). Medrano, *et al.*, (2002) mencionan que los estomas frecuentemente se cierran en respuesta a la sequía antes de cualquier cambio en el potencial hídrico de la hoja, lo cual tiene un efecto importante en la productividad y rendimiento de las plantas cultivadas puesto que al cerrarse los estomas la planta deja de fotosintetizar y por consiguiente se limita un proceso clave para la producción como es la fotosíntesis. Los niveles más altos de esta variable se presentaron en las variedades mexicanas, las cuales tuvieron mayor productividad.

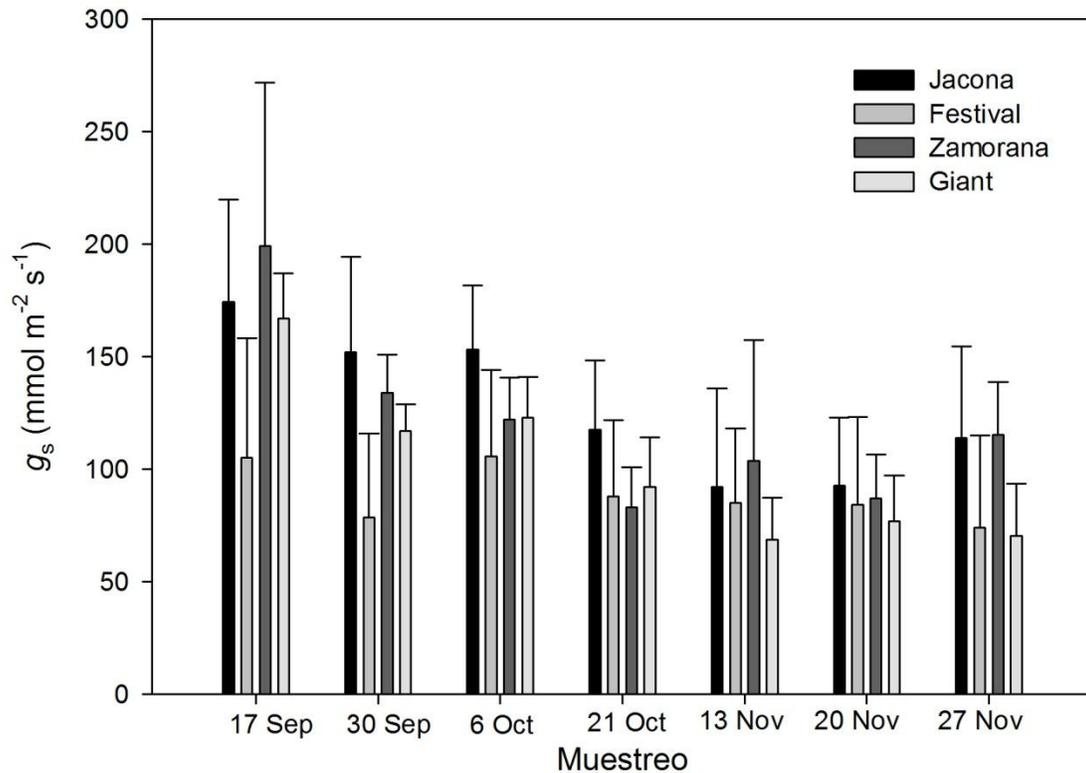


Figura 12. Conductancia estomática (g_s) de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero durante el periodo experimental. Los datos son el promedio + D.E. ($n = 10$). Se realizaron 7 muestreos los días 17 septiembre Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) = 183.2 ± 39.1 , Temperatura (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , $T^\circ = 26.7 \pm 0.8$; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , $T^\circ = 25.3 \pm 1.1$; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , $T^\circ = 27.4 \pm 0.9$; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , $T^\circ = 24.8 \pm 0.9$; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , $T^\circ = 27.5 \pm 0.6$; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , $T^\circ = 26.9 \pm 0.9$.

4.3.4 Eficiencia en el Uso del Agua (EUA)

Los resultados obtenidos acerca de la eficiencia en el uso del agua (EUA), son extremadamente variables, los valores más altos se intercalan entre todas las variedades en distintos periodos de evaluación, por lo que no hay un patrón claro en el comportamiento de esta variable y no se observan diferencias significativas (Figura 13 y Cuadros 1, 2 y 3). Al respecto Medrano *et al.* (2007) menciona que los estomas establecen un control fino sobre el gasto de agua, control que experimenta amplias variaciones a lo largo del día en función de la cantidad de luz y de otras variables ambientales, pero sobretodo en función de la disponibilidad de agua en las hojas. Junto a estas variables, el estoma también depende de la actividad fotosintética, que en condiciones limitantes (a causa de falta de luz, temperaturas bajas o infecciones) provoca el cierre estomático independiente de la disponibilidad hídrica.

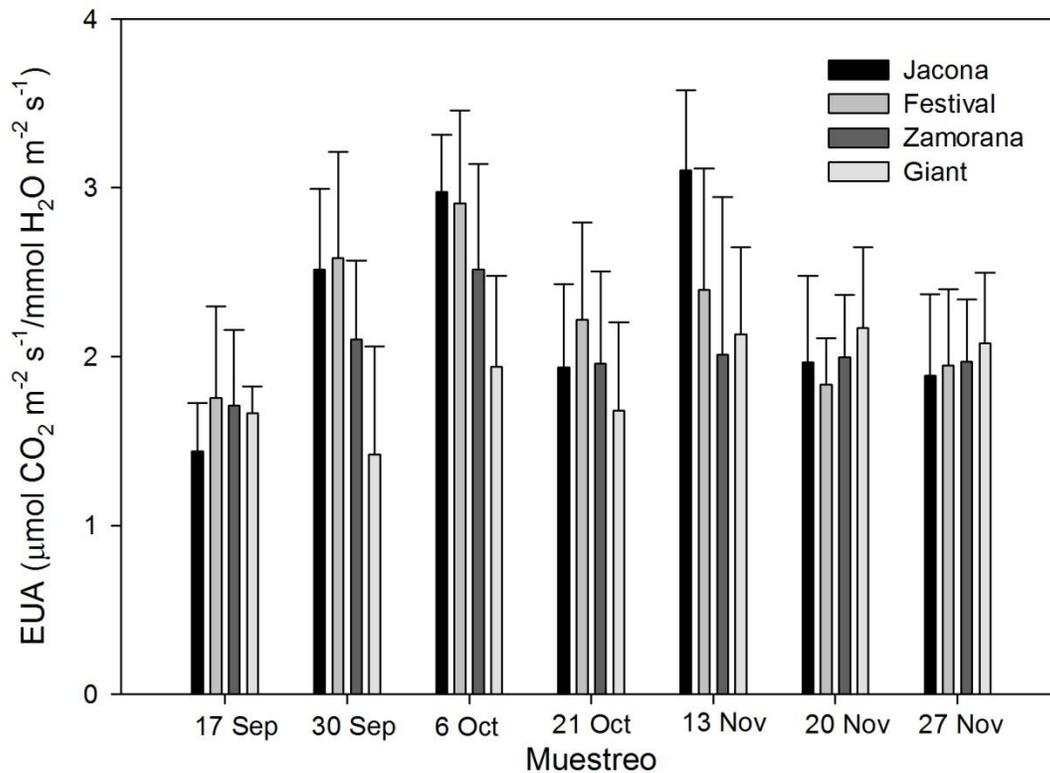


Figura 13. Eficiencia en el uso del agua (EUA) de cuatro variedades de fresa cultivadas en invernadero durante el periodo experimental. Los datos son el promedio + D.E. ($n = 10$). Se realizaron 7 muestreos los días 17 septiembre Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) = 183.2 ± 39.1 , Temperatura (T°) = 23.1 ± 0.7 ; 30 septiembre: RFA = 294.9 ± 114.6 , $T^\circ = 26.7 \pm 0.8$; 06 octubre: RFA = 344.9 ± 125.3 , $T^\circ = 25.3 \pm 1.1$; 21 octubre: RFA = 269.4 ± 107.5 , $T^\circ = 27.4 \pm 0.9$; 13 noviembre: RFA = 273 ± 118.9 , $T^\circ = 24.8 \pm 0.9$; 20 noviembre: RFA = 245.1 ± 75.3 , $T^\circ = 27.5 \pm 0.6$; 27 noviembre: RFA = 270.3 ± 72.6 , $T^\circ = 26.9 \pm 0.9$.

V CONCLUSIONES

Los cultivares mexicanos 'CP-Zamorana' y 'CP-Jacona' representan una alternativa con gran potencial de crecimiento y producción de biomasa y fruto en comparación con las variedades comerciales introducidas.

Las variedades 'CP-Zamorana' y 'CP-Jacona' bajo las condiciones evaluadas producen frutos de mayor diámetro y peso que los cultivares introducidos Festival y Giant.

'CP-Zamorana' y 'CP-Jacona' son dos nuevas variedades con adaptación a las condiciones ambientales de México que tienen alta capacidad de producción y acumulación de materia seca, de la cual pueden transformar en fruto hasta el 63%.

Los cultivares mexicanos 'CP-Zamorana' y 'CP-Jacona' tuvieron mayores rendimientos de fruto mensual y total que las variedades introducidas y un mayor índice de cosecha.

Con un mayor índice de cosecha, un mayor aparato fotosintético (área foliar) y mayores tasas de asimilación de CO₂, las variedades mexicanas 'CP-Zamora' y 'CP-Jacona' se muestran como dos variedades fisiológicamente más eficientes y con mayor capacidad productiva que las variedades extranjeras Festival y Cal Giant.

Los resultados de este trabajo presentan una alternativa de cultivares nuevos de fresa con mayor crecimiento y rendimiento en comparación con dos variedades comerciales extranjeras, con una alta probabilidad de éxito en el área de producción, comercialización y exportación de cultivares de fresa originados y seleccionados para

prosperar en el subtrópico mexicano para el que fueron seleccionados. Pero también cabe señalar que hacen falta estudios de campo para corroborar estos resultados.

VI RECOMENDACIONES

La implementación de la adopción y cultivo de los cultivares mexicanos de fresa parece ser una opción viable para la producción y comercialización puesto que dichas variedades mostraron un mejor desempeño fisiológico que dio como resultado un mayor crecimiento y rendimiento en comparación con las dos variedades comerciales, por lo que las variedades mexicanas se proponen como una alternativa de cultivo recomendable para México ya que son altamente competentes tanto fisiológica como productivamente.

La continuación de estudios fisiológicos con el enfoque del presente estudio pero en dirección de estudios de intercambio de gases a nivel de planta completa, puede ayudar a entender los mecanismos en el crecimiento de estas plantas de fresa mexicanas para entender su comportamiento y desarrollo ya sea en condiciones de cultivo bajo invernadero o en campo y generar conocimiento que permita hacer modificaciones a los distintos sistemas de producción. A su vez se propone delinear estudios en cuanto a parámetros de calidad del fruto como contenido de azúcares y acidez, características organolépticas y de aceptación que pudiesen dar un valor agregado a las variedades mexicanas e impulsar así su siembra en campo.

VII LITERATURA CITADA

- Albregts, E. E., C. M. Howard, and C. K. Chandler. 1991. Strawberry responses to K rate on a fine sand soil. *HortScience* 26: 135-138.
- Anderson, J., E. 1982. Factors controlling transpiration and photosynthesis. *J Ecol* 63: 48-56.
- Aspuria, J. R., Y. Fujime, and N. Okuda. 1996. Strawberry and other small fruits for the highlands of the Philippines. *Tech. Bull. Fac. Agric. Kagawa Univ.* 48:1-6.
- ASERCA. 1998. La fresa, sorgo y trigo. *Claridades Agropecuarias*. No. 55. SAGARPA.
- ASERCA. 2002. Descripción de los sectores agroalimentario y pesquero y características del medio rural. *Claridades Agropecuarias*. No. 108. SAGARPA.
- Azodanlou, R., C. Darbellay, J. L. Luisier, J. C. Villettaz, and R. Amado. 2003. Quality assessment of strawberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 51:715-721.
- Baumann, T.E., G.W. Eaton, and D. Spaner. 1993. Yield components of day-neutral and short-day strawberry varieties on raised beds in British Columbia. *Horticulturae Science* 28:891-894.
- Bepete M. and A. N. Lakso. 1998. Differential effects of shade on early-season fruit and growth rates in Empire apple. *HortScience* 33: 823-825.
- Beers, E. P. and Duke, S., H. 1990. Characterization of α -Amylase from Shoots and Cotyledons of Pea (*Pisum sativum* L.) Seedlings. *Plant Physiology*. April; 92(4): 1154-1163.
- Becerril R., A. E., Beech M., G. and Quinlan J., D. 1995. Carbohydrate distribution in the strawberry plant. *Revista Chapingo Serie: Horticultura*. 1 (4): 7-20.
- Bianchi, P.G. 1986. *Guía Completa del Cultivo de Fresas*. 1^a ed. Editorial De Vecchi, España. 57p.
- Bianchi, P.G. 1999. *Guía Completa del Cultivo de Fresas*. 2^a ed. Editorial De Vecchi, España. 94p.
- Blanke, M. 2002. Photosynthesis of strawberry fruit. *Acta Horticulturae* 567: 373-375.

- Brazanti, E. C., 1989. La Fresa. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España. 118p.
- Brownleader, M. D., P. Jackson, A. Mobasheri, A. T. Pantelides, S. Sumar., and M. Trevan. 1999. Molecular aspects of cell wall modifications during fruit ripening. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 39:149-164.
- Butler D. R. and J. J, Landsberg. 1981. Respiratioin rates of apple trees, estimated by CO₂-efflux measurements . *Plant, Cell and Environment* 4: 153-159.
- Capocasa, F., J. Scalzo, B. Mezzetti, and M. Battino. 2008. Combining quality and antioxidant attributes in the strawberry: The role of genotype. *Food Chemistry* 111:872-878.
- Calderón Z. G. 2005. Temperature effects on fruit and vegetative growth, carbon dioxide exchange and dry matter partitioning in the apple tree. PhD. Dissertation, Cornell University, NY, USA.
- Calderón, Z. G., J. Rodríguez A., O. Carrillo M., M. Lara Ch. y R. Vega del R. 2009. 'CP Zamorana' y 'CP Jacona', dos nuevas variedades de fresa para el subtrópico. 55 Reunión Anual de la Sociedad Interamericana para la Horticultura Tropical. Barquisimeto, Venezuela. 12-16 Oct. 9p.
- Calderón, Z. G. y R. Vega del R. 2009. Variedades Mexicanas y Cultivares Comerciales Extranjeros de Fresa. Pp. 56-60. **In:** Cano, M. R., A. E. Becerril-Román, G. Calderón Z., A. López J. y C. Saucedo V. (Editores). 2009. II Simposium Nacional de Producción Forzada de Frutales y I Curso Nacional de Producción Forzada de Durazno y Frutillas. Colegio de Postgraduados. México, 147 p.
- Caird, A., M., Richards, H., J. and Donovan, A., L. 2007. Nighttime Stomatal Conductance and Transpiration in C3 and C4 Plants. *Plant Physiology*. Vol. 143, 4–10, pp.
- Cameron, J. S., and C. A. hartley. 1990. Gas exchange characteristics of *Fragaria chiloensis* germplasm. *HortScience* 25:327-329.
- Chaves M.M., Osório J. y Pereira J.S. 2004. Water use efficiency and photosynthesis. En: *Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 42-74.
- Castellanos y F. Guerra O'Hart (eds). *Memorias Simposium Internacional Fresa, Zamora 2000*. Zamora, Michoacán, México. SAGARPA., 2001. *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. México.

- Corelli-Grappadelli, L. and E. Magnanini. 1993. A Whole-tree System for Gas-exchange Studies. *HortScience* 28 (1): 41-45.
- Corelli-Grappadelli, L. and A. N. Lakso. 2004. Fruit development in deciduous tree crops as affected by physiological factors and environmental conditions. *Acta Horticulturae* 636: 425-441.
- Cordenunsi, B., J. Oliveira, M. Genovese, and F. Lajolo. 2002. Influence of cultivar on quality parameters and chemical composition of strawberry fruits grown in Brazil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50: 2581-2586.
- Cowling, S. A. 2001. Plant carbon balance, evolutionary innovation and extinction in land plants. *Global Change Biology*. 7:231-239.
- Dale A. and J. J. Luby. 1990. The strawberry into the 21st century. Timber Press. Portland, Oregon. 133-135.
- Dávalos, P. 1999. Producción de fresa en el Edo., de Guanajuato. Folleto para productores de fresa. Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Celaya, Guanajuato, México.
- Davies, W. J. 1986. Transpiration and the water balance of plants. *in*. Steward, F. C., ed. *Plant Physiology: A Treatise*. Press. 49-154.
- (DGDE) Dirección General de Desarrollo Económico. Panorama de la Fresa en el Entorno Mundial, Nacional y Local. Coordinación de Economía y Estadística. Marzo, 2003.
- Escalante E., J. A., Kohashi, S. J. 1993. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 84 p.
- Esparza G., T. M. DeJong and Y. L. Grossman. 1999. Modifying 'peach' to model the vegetative and reproductive growth of almonds. *Acta Horticulturae* 499: 91-98.
- Farías A. J. R. 2002. Claridades Agropecuarias. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. México, D. F.
- Flore J. A. And D. R. Layne. 1999. Photoassimilate production and distribution in chery. *HortScience* 34: 1015-1019.
- Franks, P. J. and Farquhar, G, D. 1999. A relationship between humidity response, growth form and photosynthetic operating point in C3 plants. *Plant, Cell and Environment*. Vol. 22, 1337-1349.

- García L. A. Y J. L. Guardiola. 2003. Transporte en el Floema. En: Azcón-Bieto J. Y Talón M. Fundamentos de Fisiología Vegetal. McGRAW-HILL. 3^{ra} reimpresión. Barcelona, España. 65-82.
- Garzon, G. A., and R. E. Wrolstad. 2002. Comparison of the stability of pelargonidinbased anthocyanins in strawberry juice and concentrate. *Journal of Food Science*.67:1288-1299.
- Génard M., L. Pagés and J. Kervella. 1998. A carbon balance model of peach tree growth and development for studying the pruning response. *Tree Physiology* 18: 351-362.
- Gengotti, S.; Lucchi, C.; Antoniacci, L. 2005. Pest and disease management in organic strawberry (*Fragaria x Ananassa*) production in Emilia Romagna (Italy). *Informatore Fitopatologico*. 55:5. 6-11.
- Gifford, R. M., Thorpe, J. H., Hitz, W. D. And Giaquinta, R. T. 1984. Crop Productivity and Photoassimilate Partitioning. *Science* 225:801-808.
- Grifford, R. M. and Evans L. T. 1981. Photosynthesis, carbon partitioning and yield. *Ann. Rev. Plant Physiol*. 32:485-509.
- Goldschmidt E. E. and A. N. Lakso. 2005. Fruit tree models: scope and limitations. In: Information and Communication Technology (ICT) Development and Adoption: Perspectives of Technology Innovation, (E. Gelb, A. Offer, eds.), European Federation for Information Technologies in Agriculture, Food and the Environment. URL. <http://departments.agri.huji.ac.il/economics/gelb-fruit-8.pdf>.
- Gossiger, M., S. Moritz, M. Hermes, S. Wedelin, H. Scherbichler, H. Halbwirth, K. Stich, and E. Berg hofer. 2009. Effects of processing parameters on colour stability of strawberry nectar from puree. *Journal of Food Engineering* 90:171-178.
- Guo, C., J. Yang, J. Wie, Y. Li Xu., and J. Y. Jiang. 2003. Antioxidant activities of peel, pulp and seed fraction of common fruits as determined by FRAP assay. *Nutrition Research*, 23:1719-1726
- Haffner, K., and S. Vestrheim. 1998. Fruit quality of strawberry cultivars. *Acta Horticulturariae*. 439 (I): 325-332.
- Haldrup, A., Jensen, P. E., Lunde, C., and Scheller, H. V. 2001. Balance of power: a view of the mechanism of photosynthetic state transitions. *Trends Plant Sci*. 6:301-305 p.

- Hancock, J.F., J. A. Flore, and G. J. Galletta. 1989. Gas exchange properties of strawberry species and their hybrids. *Scientia Hort.* 40: 139-144.
- Hancock, J.F. 1999. Strawberries. CAB international. 107-109.
- Hancock, J.F., J.J. Luby, A. Dale , P.W. Callow, S. Serçe and A. El-Shiek. 2002. Utilizing wild *Fragaria virginiana* in strawberry cultivar development: Inheritance of photoperiod sensitivity, fruit size, gender, female fertility and disease resistance. *Euphytica*. Vol. 126:2. 177-184.
- Heinonen, I. M., A. S. Meyer., and E. N. Frankel. 1998. Antioxidant activity of berry phenolics on human low-density lipoprotein and liposome oxidation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46:4107-4112.
- Hellman, E.W.,and J.D. Travis. 1988. Growth inhibition of strawberry at high temperatures. *Adv. Strawberry Prod.* 7:36-38.
- Ho C. L. 1988. Metabolism and compartmentation of imported sugars in sink organs in relation to sink strength. *Annual Reviews of Plant Physiology* 39: 355-378.
- Hochmuth, G.; M.C. Vavrina y E. Hanlon. 1991. Plant tissue analysis and interpretation for vegetable crops in Florida. Fla. Coop. Ext. Serv. Special. Series SS-VEC-42.
- Hopkins W. G. 1999. Introduction to plant physiology. 2a. Edition. Ed. John Wiley & Sons, Inc. United States of America. 512.
- Hubbard N, D.M. Pharr, S. C. Huber. 1991 Sucrose phosphatesynthase and other sucrose metabolising enzymes in fruits of various species. *Plant Physiology*. 82:191-196
- Huber, D. 1997. Manejo de la nutrición para el combate de patógenos de las plantas pp 12-13. En: *Informaciones Agronómicas, INPOFOS, No 32, Quito.*
- Hunt, R. 1978. Plant growth analysis. *Studies in biology*, No. 96. Edward Arnold. London. P 67.
- Jiao J., Leonardos, E. D. and Grodzinski, B. 1997. Approaches to Measuring Plant Bioproductivity and Growth. In: Pessaraki, M. *Handbook of Photosynthesis*. Marcel Dkker. Nueva York. Pp 699-716.

- Jiménez-Bermúdez, S., Redondo-Nevado, J., Muñoz-Blanco, J., Caballero, J.L., López-Aranda, J. M., y V. Valpuesta. 2002. Manipulation of strawberry fruit softening by antisense expression of a pectate lyase gene. *Plant Physiology*. 128:751-759.
- Johnson R. S. and A. N. Lakso. 1986a. Carbon Balance model of a growing apple shoot: I. Development of the model. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 111(2): 160-164 p.
- Johnson R. S. and A. N. Lakso. 1986b. Carbon Balance model of a growing apple shoot: II. Simulated effects of light and temperature on long and short shoots. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 111(2): 164-169.
- Jones, H. G., A. N. Lakso and J. P. Syvertsen. 1985. Physiological control of water status in temperate and subtropical fruit trees. *Hort. Rev.* 7:301-344.
- Jones H. 2004. What is water use efficiency? En: *Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 27-41.
- Jurik, T. W., J. F. Chabot and B. F. Chabot. 1982. Effects of light and nutrients on leaf size, CO₂ exchange, and anatomy in wild strawberry (*Fragaria virginiana*). *Plant Physiology*. 70: 1044-1048.
- Kader, A. A. 1991. Quality and its maintenance in relation to the postharvest physiology of strawberry, pp. 145-151. In: *The strawberry into the 21st Century*. J. J. Luby; A. Dale (eds.). Timber Press. Portland, Oregon, USA.
- Kader, A. A. 2002. Postharvest biology and technology: an overview. In: KADER, A.A. (Ed.). *Postharvest technology of horticultural crops*. Davis: University of California. 39-47 p.
- Kafkas, E. 2004. Bazı Çilek Genotiplerinde Aroma Bileşiklerinin Tayini Ve Aroma Bileşikleri İle Bazı Meyve Kalite Kriterleri Arasındaki İlişkiler, PhD. Thesis.
- Knee, and M., J. A. Sargent, and D. J. Osborne. 1997. Cell wall metabolism in developing strawberry fruits. *Journal of Experimental Botany*. 28: 377-396.
- Kuehl R.O. 2001. Diseño de experimentos. Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones. 2^a Edición. Thomson Matemáticas. 666 p.
- Lakso A. N., Corelli-Grappadelli, L., Wünsche J. and Robinson T. 1997. Understanding apple tree productivity-balancing carbohydrate supply and demand. *Compact Fruit Tree* 30: 11-17.

- Lakso A. N. and T. L. Robinson. 1997. Principles of orchard systems management optimizing supply, demand and partitioning in apple trees. *Acta Horticulturae*. 451: 405-515.
- Lakso A. N., M. Bepete, M. C. Goffinet and L. Corelli-Grappadelli. 1998. Aspects of carbon supply and demand in apple fruits. *Acta Horticulturae* 466: 13-22.
- Lakso A. N., J. N. Wunsche, J. W. Palmer, and L. C. Grappadelli. 1999. Measurement and modeling of carbon balance of the apple tree. *HortScience* 34 (6): 1040-1047.
- Lakso A. N., M. D. White and D. S. Tustin. 2001. Simulation modeling of the effects of short and long-term climatic variations on carbon balance of apple trees. *Acta Horticulturae* 557: 473-480.
- Larson, D. K. 2000. Comportamiento y manejo de la fresa: desarrollo de programas para máxima calidad y rendimiento en México. In: Memoria del Simposio Internacional de Fresa. J. Z. Castellanos y F. Guerra O. Hart. (Editores). Zamora, Michoacán, México.
- Larson K. D., and D. V. Shaw. 2000. Soil fumigation and runner plant production: A synthesis of four years of strawberry nursery field trials. *Horticulturae Science*. 35:642-646.
- Lee, S.K., and A.A. Kader. 2000. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest Biological Technology*. 20:207-220.
- Maas, J. L. 1998. Compendium of Strawberry Diseases. 2a ed. American Phytopathological Society St. Paul, MN, USDA, USA.
- Maroto, J. V., B. Pascual, J. Alagarda, y S. López Galarza. 1986. Mejora de la precocidad del cultivo del fresón (*Fragaria x ananassa* Duch. Cv Pájaro) mediante aplicaciones invernales de ácido giberélico. *ITEA* 63:36-38.
- Maroto, J. V. y G. López, 1988. Producción de fresas y fresones. Ediciones Mundi-Prensa. España. 119p.
- Martínez-Bolaños M., D. Nieto-Ángel, D. Téllez-Ortiz, J. Rodríguez-Alcanzar, Ma. T. Martínez-Damián, H. Vaquera-Huerta, y O. Carrillo-Mendoza. 2008. Comparación cualitativa de fresas (*Fragaria x ananassa* Duch.) de cultivares Mexicanos y Estadounidenses. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. Vol. XIV (2): 113-119.

- McKee, J., and A.J. Richards. 1998. The effect of temperature on reproduction in five *Primula* species. *Ann. Bot.* 82:359-374.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbo, M. y Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas.* 43: 63-84 p.
- Medrano, H., Escalona, J., M., Bota, J., Gulías, J., and Flexas, J. 2002. Regulation of Photosynthesis of C₃ Plants in Response to Progressive Drought: Stomatal Conductance as a Reference Parameter. *Annals of Botany.* Vol. 89: 895-905 p.
- Mitcham, B. 1996. Quality assurance for strawberries: a case study. Publ. 85. *Perishables Handling Newsletter.* Department of Pomology, University of California, Davis, CA. 3 p.
- Monroy, J. A., Vera-Núñez, M. A., Carrera, O. A., Grageda-Cabrera, y Peña-Cabriales, J. J. 2001. Absorción de nitrógeno (15n) y productividad del agua por el cultivo de fresa (*fragaria x ananasa*) en "El Bajío", México. *Terra* vol. 20 no. 1. 65-69.
- Mooney H. A. 1972. The carbon balance of plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 3: 315-346.
- Nilsen E. T. and D. M. Orcutt. 1996. The physiology of plants under stress, abiotic factors. Ed. John Wiley & Sons, Inc. United States of America. 689 p.
- Nobel P.S. 1999. *Physicochemical and environmental plant physiology.* 2a edición. Academic Press. USA. 474 p.
- Oda, Y. 1997. Effects of Light intensity, CO₂ concentration and leaf temperature on gas exchange of strawberry plants – feasibility studies on CO₂ enrichment in japanese conditions. *Acta Horticulturae.* No. 439, pp. 563-573.
- Oda, Y. 2002. Photosynthetic characteristics and geographical distribution of diploid *Fragaria* species native in Japan. *Acta Horticulturae* 567: 381-383.
- Olsson, M. E., J. Ekvall, K. E. Gustavsson, J. Nilsson, D. Pillai, I. Sjöholm, U. Svensson, B. Akesson, and M. G. L. Nyman. 2004. Antioxidants, low molecular weight carbohydrates, and total antioxidant capacity in strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch): effects of cultivar, ripening, and storage. *Journal of Agricultural and Food.* 52: 2490-2498.
- Pelayo, C., S. E. Ebeler., and A. A. Kader. 2002. Postharvest life and flavor quality of three strawberry cultivars kept at 5 °C in air or air 20 kPa CO₂. *Postharvest Biological Technology.* 27 (2):171-183.

- Pessaraki M. 1997. Handbook of photosynthesis. Ed. Marcel Dekker, INC. New York. 1027p.
- Pérez A. G., R. Olías, J. Espada, J. M. Olías, and C. Sanz. 1997. Rapid determination of sugars, nonvolatile acids, and ascorbic acid in strawberry and other fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 45:3545-3549.
- Pérez, G. M., González, H. V. A., Peña, L. A., Mendoza, C. M. C., Peña, V. C. and Sahagún, C. J. 2004. Physiological characterization of manzano hot pepper (*Capsicum pubescens* R. y P.) landraces. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 129 (1):88-92.
- Redgwell, R. J., E. MacRae, I. Hallet, M. Fischer, J. Perry, and R. Harker. 1997. In vivo and in vitro swelling of cell walls during fruit ripening. *Plant Physiology*. 20:3162-173.
- Scalzo, J., A. Politi, N. Pellegrini, B. Mezzetti., and M. Battino. 2005a. Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit. *Nutrition*, 21:207-213.
- Salisbury B. F. and C. W. Ross. 1994. *Fisiología Vegetal*. Grupo editorial Iberoamericana S. A. de C. V. México, D. F. 759.
- Sánchez-Sánchez, J. L. 2006. Producción orgánica de Fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.), en tubos de PVC. Universidad Autónoma de Sinaloa, 1-4 p.
- Sánchez, R. G. 2008. La red de valor fresa: Sistema de inteligencia de mercados. Fundación Produce Michoacán. 145 p.
- Sivori E. M; Montaldi E. R. Y Caso O. H. 1986. *Fisiología Vegetal I*. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Sharma, R. R., and R. Singh. 2008. Fruit nutrient content and lipoxygenase activity in relation to the production of malformed and button berries in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) *Scientia Horticulturae*. 119:28-31.
- Shaw, D. V., y Hansen, J. J. 1993. The inheritance of vegetative growth traits in strawberries (*Fragaria x ananassa*) grown at low temperatures and their relationship to field productivity. *Theoretical and Applied Genetics (TAG)*. vol. 87, no. 1-2.

- Sturm, K., D. Koron, and F. Stampar. 2003. The composition of fruit of different strawberry varieties depending on maturity stage. *Food Chemistry*.83:417-422.
- Taiz L. and Zeiger E. 2002. *Plant Physiology*. Sinauer Associates. 3 edition (Aug 30 2002). Language: English. pp. 111-172.
- Tulipani, S., S. Romandani, F. Busco, S. Bompadre, B. Mezzetti and M. Battino. 2009. Ascorbate, not urate, modulates the plasma antioxidant capacity after strawberry intake. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 117:181-188.
- Vega del Rio,. R. 2002. Historia de la introducción del cultivo de la fresa al Valle de Zamora, Michoacán. 1938-2000. Fundación Produce Michoacán, A. C.
- Vinson, J. A., P. Bose, J. Proch, H. Al Kharrat, and N. Samman. 2008. Cranberries and cranberry products: Powerful in vitro, ex vivo and in vivo sources of antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56(14):584-589.
- Wang, S., and M.J. Camp.2000. Temperatures after bloom affect plant growth and fruit quality of strawberry. *Scientia Horticulturae*. 85:183-199.
- Wardlaw I. F. 1990. The control of carbon partitioning in plants. *New Phytologist* 116: 341-381.
- Wilkinson S. 2004. Water use efficiency and chemical signalling. En: *Water use efficiency in plant biology* (ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd., London, UK. pp. 75- 112.
- Wills R., McGlasson B., Graham D. y Joyce D. 1998. *Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales*. Segunda edición. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
- Wills, R. B. H., W.B.Mcglasson.,D.Graham., and D. Joyce.2004. *Postharvest:an introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals*. (4ed). Wallingford: CABI.262 p.
- Wilson, J. W. 1972. Control of crop processes. *In: Crop processes in controlled environments*. A. R. R. Ress. (Ed.) Academic Prees. New York, EUA, pp. 7-30.
- Wesche-Ebeling, P., and M. W. Montgomery.1990. Strawberry polyphenoloxidase: It is role in anthocyanin degradation. *Journal of Food Science*, 55, 731-734.

Wong, S., C., Cowan, I., R., and Farguhar, G., D. 1979. Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity. Nature. vol. 282: 424-426 p.

Zabetakis, I., Holden, M., A. 1997. Strawberry Flavour: Analysis and Biosynthesis. Journal of the Science of Food and Agriculture. feb vol.74, Issue 4. 421-434.

Zabetakis, I., D. Leclerc, , and P. Kajda. 2001. The effect of high hydrostatic pressure on the strawberry anthocyanins. Journal of Agriculture and Food Chemistry.48:2749-2754.

SAGARPA, 2005, http://conafresa.com/plan_rector.pdf

SIAP, 2009: <http://www.siap.gob.mx>

FAO, 2005. http://www.fao.org/index_es.htm

FAOSTAT 2008, <http://faostat.fao.org/default.aspx>

VIII APÉNDICE

Cuadro A1. Valores de cuadrado medio del error (CME), coeficiente de variación (CV) y prueba de significancia del modelo ($Pr > F$) para área foliar y biomasa seca.

VARIABLE	CME	CV	Pr>F
Área foliar	115615.031	29.40699	<.0001
Biomasa seca	1.08638889	32.88164	<.0001

Cuadro A2. Valores de cuadrado medio del error (CME), coeficiente de variación (CV) y prueba de significancia del modelo ($Pr > F$) para diámetro final, peso final fresco de fruto, peso final seco de fruto y producción acumulada por planta.

VARIABLE	CME	CV	Pr>F
Diámetro final	28.6382391	16.58039	<.0001
Peso final fresco de fruto	461.753111	27.74972	<.0001
Peso final seco de fruto	1.08638889	32.88164	<.0001
Producción acumulada por planta	88972.3047	32.19996	<.0001

Cuadro A3. Valores de cuadrado medio del error (CME), coeficiente de variación (CV) y prueba de significancia del modelo ($Pr > F$) para tasa de asimilación de CO₂, tasa transpiratoria, conductancia estomática y eficiencia en el uso del agua.

VARIABLE	CME	CV	Pr>F
Tasa de asimilación de CO ₂	20.7951310	18.49982	<.0001
Tasa transpiratoria	7.88682840	20.68500	<.0001
Conductancia estomática	27981.5132	31.18937	<.0001
Eficiencia en el uso del agua	0.00000039	23.47234	0.0573