

## INDICE DE CONTENIDO

|                                                                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMIENTOS .....                                                                                                | ii   |
| DEDICATORIA.....                                                                                                     | iv   |
| INDICE DE CONTENIDO .....                                                                                            | v    |
| ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS .....                                                                                    | viii |
| INDICE DE ANEXOS .....                                                                                               | xi   |
| RESUMEN.....                                                                                                         | xii  |
| ABSTRACT .....                                                                                                       | xiii |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL .....                                                                               | 1    |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                   | 1    |
| ANTECEDENTES .....                                                                                                   | 2    |
| Absorción, distribución y acumulación de nutrientes en las plantas. ....                                             | 2    |
| Cultivos con suelo vs hidroponía. ....                                                                               | 4    |
| Soluciones nutritivas .....                                                                                          | 6    |
| Importancia del chile habanero ( <i>Capsicum chinense</i> Jacq.) .....                                               | 10   |
| Aspectos nutricionales que influyen en el crecimiento, la fisiología y la calidad de frutos de chile habanero .....  | 11   |
| Microorganismos benéficos de la rizosfera en sistemas hidropónicos .....                                             | 13   |
| El género <i>Trichoderma</i> .....                                                                                   | 14   |
| OBJETIVOS.....                                                                                                       | 16   |
| General.....                                                                                                         | 16   |
| Específicos.....                                                                                                     | 16   |
| HIPÓTESIS .....                                                                                                      | 16   |
| PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....                                                                                     | 17   |
| LITERATURA CONSULTADA .....                                                                                          | 18   |
| CAPITULO II. EL CULTIVO DE CHILE HABANERO ( <i>Capsicum chinense</i> JACQ.)<br>COMO MODELO DE ESTUDIO EN MÉXICO..... | 26   |
| RESUMEN.....                                                                                                         | 26   |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                   | 27   |
| MÉTODO .....                                                                                                         | 28   |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                         | 29   |
| El cultivo de chile habanero en México.....                                                                          | 29   |
| Producción científica por región.....                                                                                | 29   |
| Cronología de los estudios de chile habanero en México.....                                                          | 30   |
| Líneas de investigación sobre chile habanero en México .....                                                         | 32   |

|                                                                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Publicaciones sobre chile habanero en revistas indizadas y su factor de impacto .....                                                                                              | 35        |
| CONCLUSIONES.....                                                                                                                                                                  | 37        |
| LITERATURA CONSULTADA .....                                                                                                                                                        | 37        |
| <b>CAPÍTULO III. GROWTH, CHLOROPHYLL FLUORESCENCE AND GAS EXCHANGE OF PEPPER (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.) PLANTS IN RESPONSE TO UPTAKE AND PARTITIONING OF NUTRIENTS. ....</b> | <b>54</b> |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                                                     | 54        |
| INTRODUCTION.....                                                                                                                                                                  | 55        |
| MATERIALS AND METHODS .....                                                                                                                                                        | 56        |
| Plant material and hydroponic systems .....                                                                                                                                        | 56        |
| Nutrient solutions.....                                                                                                                                                            | 56        |
| Nutrient contents of plants .....                                                                                                                                                  | 57        |
| Chlorophyll contents and photosynthetic parameters.....                                                                                                                            | 57        |
| Chlorophyll fluorescence .....                                                                                                                                                     | 58        |
| Gas exchange .....                                                                                                                                                                 | 58        |
| Total nitrate, amino acid and protein contents .....                                                                                                                               | 58        |
| Dry mass and growth parameters .....                                                                                                                                               | 59        |
| Experimental design and statistical analysis .....                                                                                                                                 | 59        |
| RESULTS AND DISCUSSION .....                                                                                                                                                       | 59        |
| Macronutrients in habanero pepper plants.....                                                                                                                                      | 59        |
| Micronutrients in habanero pepper plants.....                                                                                                                                      | 61        |
| Chlorophyll contents.....                                                                                                                                                          | 63        |
| Chlorophyll fluorescence .....                                                                                                                                                     | 64        |
| Gas exchange .....                                                                                                                                                                 | 66        |
| Total nitrate, amino acid and protein contents .....                                                                                                                               | 68        |
| Growth parameters in habanero pepper plants.....                                                                                                                                   | 69        |
| CONCLUSIONS .....                                                                                                                                                                  | 71        |
| REFERENCES.....                                                                                                                                                                    | 72        |
| <b>CAPÍTULO IV. PHENOLOGY AND QUALITY OF HABANERO PEPPER FRUITS (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.). DUE TO NUTRIENT SOLUTION IN HYDROPONICS. ....</b>                                | <b>76</b> |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                                                     | 76        |
| INTRODUCTION.....                                                                                                                                                                  | 77        |
| MATERIALS AND METHODS .....                                                                                                                                                        | 77        |
| Plant material .....                                                                                                                                                               | 77        |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Nutrient solutions.....                                                                                                              | 78  |
| Reproductive phenology and fruit morphology .....                                                                                    | 78  |
| Ash content and moisture percentage in fruits.....                                                                                   | 78  |
| Capsaicinoids content .....                                                                                                          | 79  |
| Experimental desing and statistical analysis .....                                                                                   | 79  |
| RESULTS AND DISCUSSION .....                                                                                                         | 79  |
| Times to flowering and fruiting .....                                                                                                | 79  |
| Fruit morphology .....                                                                                                               | 81  |
| Physicochemical characteristics of the fruit .....                                                                                   | 84  |
| CONCLUSIONS .....                                                                                                                    | 85  |
| REFERENCES.....                                                                                                                      | 85  |
| <b>CAPÍTULO V. ¿<i>Trichoderma asperellum</i> ES UN PROMOTOR DE CRECIMIENTO VEGETAL O UN PARÁSITO EN UN CULTIVO SIN SUELO?</b> ..... | 88  |
| RESUMEN.....                                                                                                                         | 88  |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                                   | 89  |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                                           | 90  |
| Material vegetal y sistema hidropónico NFT.....                                                                                      | 90  |
| Inoculación de <i>Trichoderma asperellum</i> .....                                                                                   | 90  |
| Sistema hidropónico y solución nutritiva.....                                                                                        | 91  |
| Variables de crecimiento .....                                                                                                       | 91  |
| Fotoquímica del fotosistema II y fluorescencia de la clorofila .....                                                                 | 91  |
| Intercambio de gases.....                                                                                                            | 92  |
| Morfo-histología de raíz y hoja.....                                                                                                 | 92  |
| Diseño experimental y análisis estadístico .....                                                                                     | 93  |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                                         | 93  |
| Variables de crecimiento y biomasa .....                                                                                             | 93  |
| Fotoquímica de la hoja e intercambio de gases .....                                                                                  | 96  |
| Morfo-histología de raíz y hoja .....                                                                                                | 98  |
| CONCLUSIONES.....                                                                                                                    | 104 |
| LITERATURA CITADA .....                                                                                                              | 105 |
| PERSPECTIVAS. ....                                                                                                                   | 109 |
| PERSPECTIVAS. ....                                                                                                                   | 110 |
| PERSPECTIVAS. ....                                                                                                                   | 111 |

## ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

### CAPÍTULO 1

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1.</b> Estrategia experimental planteada para el desarrollo del presente trabajo..... | 17 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### CAPÍTULO 2

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.1.</b> Distribución de la producción científica generada sobre chile habanero en diferentes regiones de México (Norte, Centro, Pacífico, Golfo de México y Península de Yucatán)..... | 29 |
| <b>Figura 2.2.</b> Línea temporal (1998-2018) de la producción de artículos científicos sobre chile habanero realizados en México.....                                                            | 31 |
| <b>Figura 2.3.</b> Artículos científicos publicados sobre chile habanero de 1998 al 2018 en México.....                                                                                           | 34 |
| <b>Figura 2.4. A)</b> Artículos de chile habanero en revistas indizadas y no indizadas en.....                                                                                                    | 36 |

### CAPÍTULO 3

|                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 3.1.</b> Total N (A), P (B), S (C), K (D), Ca (E) and Mg (F) contents in habanero pepper plants with three nutrient solutions.....                                                                                                               | 61 |
| <b>Figure 3.2.</b> Iron (A), Mn (B), Cu (C) and Zn (D) contents in habanero pepper plants with three nutrient solutions.....                                                                                                                               | 62 |
| <b>Figure 3.3.</b> Chlorophyll <i>a</i> (Chl <i>a</i> ) (A), chlorophyll <i>b</i> (Chl <i>b</i> ) (B), total chlorophylls (Chl <sub>a+b</sub> ) (C), and Chl <i>a</i> /Chl <i>b</i> ratio (D) in habanero pepper plants with three nutrient solutions..... | 64 |
| <b>Figure 3.4.</b> Electron transport rate (ETR) (A) and maximum quantum yield of photosystem II ( $\Phi_{PSII}$ ) (B). ....                                                                                                                               | 65 |
| <b>Figure 3.5.</b> Photosynthetic CO <sub>2</sub> response curves ( $A_N/C_i$ ) (A) and photosynthetic light response curves ( $A_N/PPFD$ ) (B) in habanero pepper plants with three nutrient solutions...                                                 | 67 |
| <b>Figure 3.6.</b> Total nitrates in leaves (A) and roots (B), total amino acids in leaves (C) and roots (D), and total proteins in leaves (E) and roots (B) in habanero pepper plants with three nutrient solutions.....                                  | 69 |
| <b>Figure 3.7.</b> Plant height (A), stem diameter (B), number of leaves (C) and leaf area (D) of habanero pepper plants with three nutrient solutions.....                                                                                                | 70 |
| <b>Figure 3.8.</b> Leaf (A), stem (B), root (C) and total (D) dry mass in habanero pepper plants with three nutrient solutions.....                                                                                                                        | 71 |
| <b>Table 3.1.</b> Formulation of nutrient solutions used in the growth stage of habanero pepper plants cultivated in nutrient film technique (NFT) hydroponic systems.....                                                                                 | 57 |
| <b>Table 3.2.</b> Maximum quantum efficiency ( $F_v/F_m$ ), photochemical (qP) and non-photochemical (NPQ) quenching in habanero pepper plants with three nutrient solutions.                                                                              | 65 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Table 3.3.</b> Maximum photosynthetic rate ( $A_{\max}$ ), light-saturated $\text{CO}_2$ assimilation rate ( $A_{\text{sat}}$ ), maximum catalytic activities of Rubisco ( $V_{\text{cmax}}$ ), maximum rate of electron transport demand to RuBP regeneration ( $J_{\max}$ ) and stomatal limitation ( $I$ ) in habanero pepper plants with three nutrient solutions..... | 67 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## CAPÍTULO 4

|                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 4.1.</b> Time to flowering (A) and fruiting (B) of habanero pepper plants ( <i>Capsicum chinense</i> Jacq.), fertilized with different nutrient solutions (Steiner, Hoagland and Soria) in a hydroponic system.....                                             | 80 |
| <b>Figure 4.2.</b> Fruit length (A), fruit diameter (B), pericarp thickness (C) and fruit weight (D) of habanero pepper plants ( <i>Capsicum chinense</i> Jacq.), fertilized with different nutrient solutions (Steiner, Hoagland and Soria) in a hydroponic system. .... | 82 |
| <b>Figure 4.3.</b> Morphological differences in habanero pepper plants and fruits ( <i>Capsicum chinense</i> Jacq.), fertilized with Steiner (A, D, G), Hoagland (B, E, H) and Soria (C, F, I) nutrient solutions, in a hydroponic system.....                            | 83 |
| <b>Table 4.1.</b> Weight and percentage of ashes and moisture content of habanero fruits ( <i>Capsicum chinense</i> Jacq.) grown with three nutrient solutions.....                                                                                                       | 82 |
| <b>Table 4.2.</b> Contents of capsaicin (CAP), dihydrocapsaicin (DHCAP), total capsaicinoids (total CAP's) and Scoville units (SHU) in habanero pepper fruits ( <i>Capsicum chinense</i> Jacq.), evaluated with three nutritional solutions.....                          | 85 |

## CAPÍTULO 5

|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 5.1. A)</b> Altura de planta, <b>B)</b> diámetro de tallo, <b>C)</b> área foliar y <b>D)</b> volumen de raíz de plantas de chile habanero inoculadas con <i>T. asperellum</i> y cultivadas en un sistema NFT..               | 95  |
| <b>Figura 5.2. A)</b> Peso seco de hojas, <b>B)</b> peso seco del tallo, <b>C)</b> peso seco de raíz y <b>D)</b> peso seco total de plantas de chile habanero inoculadas con <i>T. asperellum</i> y cultivadas en un sistema NFT. .... | 96  |
| <b>Figura 5.3.</b> Cambios morfo-histológicos en raíces secundarias de plantas de chile habanero. ....                                                                                                                                 | 99  |
| <b>Figura 5.4.</b> Presencia de pelos radicales en raíces de plantas de chile habanero. ....                                                                                                                                           | 100 |
| <b>Figura 5.5.</b> Corte transversal de la zona media de la lámina foliar (vena central) de hojas de chile habanero. ....                                                                                                              | 103 |
| <b>Figura 5.6.</b> Cambios morfo-histológicos en lámina foliar (zona lateral) de plantas de chile habanero. ....                                                                                                                       | 104 |

|                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Cuadro 5.1.</b> Extinción fotoquímica (qP) y no fotoquímica (NPQ), fluorescencia de la clorofila ( $F_v/F_m$ ) y tasa de transporte de electrones (ETR) de plantas de chile habanero en un sistema hidropónico. ....                        | 97  |
| <b>Cuadro 5.2.</b> Tasa de asimilación de $CO_2$ ( $A_N$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ), transpiración (E) y uso eficiente del agua (WUE) en plantas de chile habanero hidropónico. ....                                                 | 98  |
| <b>Cuadro 5.3.</b> Área de la estela (AERS) y longitud de parénquima cortical (LPC) de raíces secundarias de chile habanero inoculadas <i>T. asperellum</i> y cultivadas en hidroponía con diferente concentración de solución nutritiva. .... | 98  |
| <b>Cuadro 5.4.</b> Área de la haces vasculares (AHV), espesor de lámina foliar (ELF) y espesor de parénquima empalizada (EPE) de hojas de chile habanero en hidroponía.....                                                                    | 101 |

## **INDICE DE ANEXOS**

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ANEXO 1. DETERMINACIÓN DE NITRATOS, AMINOÁCIDOS Y PROTEÍNAS. .</b> | <b>111</b> |
| <b>ANEXO 2. DETERMINACIÓN DE CLOROFILAS A, B Y TOTALES.....</b>       | <b>114</b> |
| <b>ANEXO 3. DETERMINACIÓN DE CAPSAICINOIDES.....</b>                  | <b>115</b> |

## RESUMEN

En chile habanero, son pocos los estudios sobre cómo los nutrientes influyen en su crecimiento y fisiología. La hidroponía permite un mejor control de los fertilizantes y el uso de *Trichoderma* podría mejorar el aprovechamiento de los nutrientes. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el crecimiento, la fisiología y bioquímica de chile habanero en respuesta a la solución nutritiva y a la inoculación con *T. asperellum*. Se evaluó el crecimiento, la fenología, el contenido de capsaicinoides y la actividad fisiológica con dos soluciones nutritivas universales (Steiner, Hoagland) y una convencional para chile habanero (Soria). También se analizó el crecimiento, la fisiología y la anatomía de tejidos de chile habanero inoculadas con *T. asperellum*. La concentración de K, Mg, Ca, Cu y Zn fue alto con la solución Steiner e incrementó la  $A_{max}$  (81%), la  $A_{sat}$  (380%) y el peso seco total (80%) y el contenido de aminoácidos (169.97 mg g<sup>-1</sup> PF). La solución Soria adelantó la floración cuatro días; la solución de Steiner incrementó los capsaicinoides (36.5 mg g<sup>-1</sup>). Por tanto, la solución Steiner fue elegida como la mejor y se utilizó con plantas inoculadas con *T. asperellum* (*Tasp*). Las plantas no inoculadas + Steiner al 100% registraron mayor peso seco total (1.91 g) comparado con los tratamientos inoculados; en plantas con *Tasp* + Steiner al 100% incrementó la ETR (30%), la  $A_N$  (25%), y la longitud del parénquima cortical (31%). Las plantas con *Tasp* + Steiner al 25% incrementó el espesor de la lámina foliar (25 %) y del parénquima empalizada (30%). La solución Steiner provee nutrientes que aumenta el crecimiento, la actividad fisiológica de las plantas y contenido de capsaicinoides en frutos de chile habanero; mientras que *T. asperellum* mejora la fotosíntesis, genera cambios en tejidos de interés, pero no promueve su crecimiento en hidroponía.

**Palabras clave:** *Capsicum chinense*, nutrición, capsaicina, hongo, hidroponía.