



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL**

**FISIOLOGÍA DE HORTALIZAS TROPICALES Y  
EXPRESIÓN DE GENES ASOCIADOS A LA  
FOTOSÍNTESIS EN CONDICIONES DE ALTA  
TEMPERATURA Y ATMÓSFERAS ENRIQUECIDAS CON  
CO<sub>2</sub>**

**TESIS**

Que presenta:  
**Jade Melissa Pereyda González**

Como requisito parcial para obtener el grado de:  
**Doctora en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable**

Director de tesis:  
**René Garruña Hernández**

Conkal, Yucatán, México  
Octubre, 2023



**TecNM**



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL**

**FISIOLOGÍA DE HORTALIZAS TROPICALES Y  
EXPRESIÓN DE GENES ASOCIADOS A LA  
FOTOSÍNTESIS EN CONDICIONES DE ALTA  
TEMPERATURA Y ATMÓSFERAS ENRIQUECIDAS CON  
CO<sub>2</sub>**

**TESIS**

Que presenta:

**Jade Melissa Pereyda González**

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**Doctora en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable**

Director de tesis:

**René Garruña Hernández**

Conkal, Yucatán, México

Octubre, 2023



**TecNM**



Conkal, Yucatán, México a 30 de octubre de 2023.

El comité de tesis del candidato a grado: Jade Melissa Pereyda González, constituido por los CC. Dr. René Garruña Hernández, Dr. Rubén H. Andueza Noh, Dra. Clelia de la Peña Seaman, Dr. Wilmer Tezara Fernández y Dr. Roberto Zamora Bustillos, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **Fisiología de hortalizas tropicales y expresión de genes asociados a la fotosíntesis en condiciones de alta temperatura y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Tropical Sustentable según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

**ATENTAMENTE**

---

Dr. René Garruña Hernández  
Director de Tesis

---

Dr. Rubén H. Andueza Noh  
Asesor de Tesis

---

Dra. Clelia de la Peña Seaman  
Asesor de Tesis

---

Dr. Wilmer Tezara Fernández  
Asesor de Tesis

---

Dr. Roberto Zamora Bustillos  
Asesor de Tesis





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Conkal  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Conkal, Yucatán, México a 30 de octubre de 2023

### DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.

Jade Melissa Pereyda González

## vi. Índice de contenido

ix Resumen.....	20
x Summary.....	20
<b>I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	<b>20</b>
1.1 Introducción.....	21
1.2 Antecedentes.....	21
1.2.1 Cambio Climático.....	21
1.2.2. Impacto del Cambio Climático en la Agricultura.....	22
1.2.3 El CO <sub>2</sub> , como alternativa para mitigar el efecto del estrés en plantas.....	23
1.2.4 Importancia económica de Hortalizas Tropicales.....	24
<i>Capsicum spp</i> .....	24
<i>Solanum lycopersicum L.</i> ....	25
1.2.5 Fotosíntesis.....	25
1.2.6 Fotosistema II (PSII) .....	27
1.2.7 Proteína D1 y proteínas centrales del PSII .....	28
1.3 Hipótesis.....	30
1.4 Objetivos.....	31
<i>Objetivo General</i> .....	31
<i>Objetivos Específicos</i> .....	31
1.5 Procedimiento experimental. ....	32
1.6 Literatura citada.....	33
<b>II. CAPÍTULO 2. High temperature and elevated CO<sub>2</sub> modify phenology and growth in pepper plants.....</b>	<b>37</b>
Abstract .....	37
1. Introduction.....	37
2. Materials and Methods.....	38
2.1 Ubicación, material vegetal y manejo del cultivo.....	38
2.2 Cámaras de crecimiento y tratamientos.....	39
2.3 Variables de emergencia y crecimiento de plántulas.....	39
2.4 Variables de floración y fructificación.....	39
2.5 Diseño experimental y análisis estadístico.....	40
3. Resultados y Discusión.....	40

3.1 <i>Emergencia de semillas</i> .....	40
3.2 <i>Crecimiento de plántulas</i> .....	41
3.3 <i>Floración y fructificación</i> .....	43
4. Conclusiones.....	47
Bibliografía.....	47
<b>III. CAPÍTULO 3. Impacto de la temperatura alta y el enriquecimiento con CO<sub>2</sub> en los rasgos anatómicos y morfológicos en dos especies de <i>Capsicum</i></b> .....	50
Resumen .....	50
1. Introducción.....	52
2. Materiales y Métodos.....	53
2.1 <i>Material vegetal, cámaras de crecimiento y tratamientos</i> .....	53
2.2 <i>Colecta, preparación de muestras y cortes histológicos</i> .....	54
2.3 <i>Parámetros morfoanatómicos foliares</i> .....	54
2.4 <i>Diseño experimental y análisis estadístico</i> .....	55
3. Resultados y Discusión.....	55
3.1 <i>Epidermis adaxial y abaxial</i> .....	55
3.2 <i>Parénquima en empalizada y parénquima esponjoso</i> .....	57
3.3 <i>Cristales de oxalato en el tejido</i> .....	59
3.4 <i>Densidad estomática adaxial y abaxial</i> .....	60
3.5 <i>Características anatómicas</i> .....	62
3.6 <i>Área foliar y biomasa de hoja</i> .....	64
3.7 <i>Grosor de hoja y área foliar específica</i> .....	65
3.8 <i>Cambios en la morfología de las hojas</i> .....	67
4. Conclusiones.....	69
5. Bibliografía.....	69
<b>IV. CAPÍTULO 4. Variaciones morfo-anatómicas de tres variedades de <i>Solanum lycopersicum</i> en condiciones de temperatura alta y CO<sub>2</sub> enriquecido</b> .....	77
Resumen.....	77
1. Introducción.....	80
2. Materiales y Métodos.....	81
2.1 <i>Material vegetal, cámaras de crecimiento y tratamientos</i> .....	81
2.2 <i>Colecta, preparación de muestras y cortes histológicos</i> .....	82

2.3	<i>Parámetros morfoanatómicos foliares evaluados</i> .....	82
2.4	<i>Diseño experimental y análisis estadísticos</i> .....	83
<b>3.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>83</b>
3.1	<i>Grosor de Epidermis Adaxial y Abaxial</i> .....	83
3.2	<i>Grosor de Parénquima en Empalizada y Parénquima Esponjoso</i> .....	86
3.3	<i>Cristales de oxalato en el tejido</i> .....	88
3.4	<i>Densidad Estomática Adaxial y Abaxial</i> .....	90
3.5	<i>Características anatómicas foliares</i> .....	92
3.6	<i>Área foliar y Biomasa</i> .....	95
3.7	<i>Grosor de hoja y SLA</i> .....	97
<b>4.</b>	<b>Discusión</b> .....	<b>100</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>106</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>107</b>
<b>V.</b>	<b>CAPÍTULO 5. Análisis de expresión del gen <i>psbA</i> y acumulación de la proteína D1 y Rubisco en dos solanáceas en condiciones de temperatura y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub></b> .....	<b>116</b>
	<b>Resumen</b> .....	<b>116</b>
<b>1.</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>117</b>
<b>2.</b>	<b>Materiales y Métodos</b> .....	<b>118</b>
2.1	<i>Material vegetal, cámaras de crecimiento y tratamientos</i> .....	118
2.2	<i>Eficiencia del Fotosistema II</i> .....	119
2.3	<i>Intercambio de gases</i> .....	120
2.4	<i>Curvas A/C<sub>i</sub></i> .....	120
2.5	<i>Extracción de RNA, síntesis de de cDNA y PCR punto final</i> .....	121
2.6	<i>Determinación de la expresión del gen <i>psbA</i> por qRT-PCR</i> .....	121
2.7	<i>Electroforesis SDS-PAGE</i> .....	122
2.8	<i>Western Blot para la detección de la proteína D1 y Rubisco</i> .....	123
2.9	<i>Diseño experimental y análisis estadísticos</i> .....	124
<b>3.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>124</b>
3.1	<i>Eficiencia del Fotosistema II</i> .....	124
3.2	<i>Intercambio de gases</i> .....	125
3.3	<i>Curvas A/C<sub>i</sub></i> .....	128

3.4 <i>Expresión absoluta del gen psbA</i> .....	129
3.5 <i>Western Blot para la detección de la proteína D1 y Rubisco</i> .....	131
<b>4. Discusión</b> .....	<b>133</b>
<b>5. Conclusiones</b> .....	<b>136</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>137</b>



## vii. Índice de cuadros y/o figuras

### CAPÍTULO 1

**Cuadro 1.** Principales países emisores de CO<sub>2</sub> en Mt (toneladas métricas)

**Cuadro 2.** Estudios en los que se ha evaluado el uso del CO<sub>2</sub> como estrategia para mitigar el estrés por temperatura

**Figura 1.** Esquema de la fotosíntesis ejemplificando la cadena de transferencia de electrones que inicia en el PSII a la subunidad Cyt b6f y al PSI y las reacciones de óxido-reducción para continuar en el Ciclo de Calvin-Benson.

**Figura 2.** Proteínas Intrínsecas de Membrana encontradas en el fotosistema II (PSII).

**Figura 3.** Estrategia experimental

### CAPÍTULO 2

**Figura 1.** Emergencia y mortalidad de plántulas de *C. annuum* (A,C) y *C. chinense* (B,D) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>. C1= 30 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C2 = 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C3 = 30 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C4 = 40 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>. Los datos son medias ± EE;\* = diferencias estadísticas significativas (2-way ANOVA  $p \leq 0.05$ ,  $n=100$ ).

**Figura 2.** Área foliar, altura y volumen radicular de plántulas de *C. annuum* (A,C,E) y *C. chinense* (B,D,F) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>. C1= 30 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C2 = 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C3 = 30 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C4 = 40 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>. Los datos son medias ± EE; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 20$ ).

**Figura 3.** Biomasa de plántulas de *C. annuum* (A) y *C. chinense* (B) cultivadas cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>. C1= 30 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C2 = 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C3 = 30 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C4 = 40 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>. Los datos son medias ± EE; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 20$ ).

**Figura 4.** Plantas con botones florales, plantas con flores y plantas con frutos de *C. annuum* (A,C,E) y *C. chinense* (B,D,F) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>. C1= 30 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C2 = 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C3 = 30 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C4 = 40 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>. en

atmósferas con diferentes temperaturas y CO<sub>2</sub>. Los datos son medias; ± SE.\* = diferencias estadísticas significativas (ANOVA  $p \leq 0.05$ ,  $n=120$ ).

**Figura 5.** Número de flores por planta, número de frutos por planta y porcentaje de abortos florales en plantas de *C. annuum* (A,C,E) y *C. chinense* (B,D,F) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>. C1= 30 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C2 = 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C3 = 30 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C4 = 40 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>. en atmósferas con diferentes temperaturas y CO<sub>2</sub>. Los datos son medias ± EE calculados al primer corte de frutos. Literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 32$ ).

**Figura 6.** Peso, diámetro y longitud de fruto de *C. annuum* (A,C,E) y *C. chinense* (B,D,F) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>. C1= 30 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C2 = 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C3 = 30 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> C4 = 40 °C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>. Los datos son medias ± EE calculados al primer corte de frutos; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 100$ ).

### CAPÍTULO 3

**Figura 1.** Epidermis Adaxial y Abaxial en *Capsicum annuum* (A y C, respectivamente) y *Capsicum chinense* (B y D, respectivamente) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con C<sub>a</sub> (T1= 30°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T2= 30° C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T3= 40°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T4= 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>). Los datos son medias ± EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ).

**Figura 2.** Grosor de Parénquima en empalizada y parénquima esponjoso en *Capsicum annuum* (A y B, respectivamente) y *Capsicum chinense* (B y D, respectivamente) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con C<sub>a</sub> (T1= 30°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T2= 30° C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T3= 40°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T4= 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>). Los datos son medias ± EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ).

**Figura 3.** Área de cristales de oxalato en tejido en *Capsicum annuum* (A) y *Capsicum chinense* (B), cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con C<sub>a</sub> (T1= 30°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T2= 30° C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; T3= 40°C y 400

$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 3$ ).

**Figura 4.** Densidad estomática Adaxial y Abaxial en *Capsicum annuum* (A y B, respectivamente) y *Capsicum chinense* (B y D, respectivamente) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (T1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 12$ ).

**Figura 5.** Anatomía transversal de la sección intermedia de la hoja de *Capsicum annuum* (A,B,C,D) y *C. chinense* (E,F,G,H); (20x – 100  $\mu\text{m}$ ) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (T1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ). AdE (Epidermis Adaxial); AbE (Epidermis Abaxial); PP (Parénquima en empalizada); ST (Estoma); CV-HV (Célula de la vaina-haz vascular); TR (Tricoma); SP (Paréquima esponjoso); CO (Cristales de Oxalato).

**Figura 6.** Área foliar y biomasa de hoja en *Capsicum annuum* (A y B, respectivamente) y *Capsicum chinense* (B y D, respectivamente) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (T1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 20$ , 16).

**Figura 7.** Grosor de hoja y área foliar específica en *Capsicum annuum* (A y B, respectivamente) y *Capsicum chinense* (B y D, respectivamente) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (T1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 20$ ).

**Figura 8.** Hojas de *Capsicum annuum* (A) y *C. chinense* (B) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (T1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T2= 30°

C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ).

**Figura 9.** Plantas de *Capsicum annuum* (A) y *Capsicum chinense* (B) a los 120 dds. cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (T1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; T4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ).

## CAPÍTULO 4

**Figura 1.** Epidermis Adaxial y Abaxial en hojas de *Solanum lycopersicum*, variedades Pony Express (A,B) 104 Rosa Pack (C,D) y 120 Cherry (E,F) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ).

**Figura 2.** Parénquima en empalizada (A) y Grosor de Parénquima Esponjoso (B), en hojas de *Solanum lycopersicum*, variedades Pony Express (A,B) 104 Rosa Pack (C,D) y 120 Cherry (E,F) cultivadas bajo diferentes tratamientos de temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ).

**Figura 3.** Área de Tejido foliar y área de cristales de oxalato en el tejido con el porcentaje que representa en el tejido de hojas de *Solanum lycopersicum* de las variedades Pony Express, 104 Rosa Pack y 120 Cherry cultivadas bajo diferentes tratamientos de temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ).

**Figura 4.** Densidad estomática Adaxial y Abaxial en hojas de *Solanum lycopersicum* de las variedades Pony Express (A,B) 104 Rosa Pack (C,D) y 120 Cherry (E,F) cultivadas bajo diferentes tratamientos de temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales

diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

**Figura 5.** Anatomía transversal de la sección intermedia de las hojas de *Solanum lycopersicum* var. Pony Express (A,B,C,D); 104 Rosa Pack (E,F,G,H) y 120 Cherry (I,J,K,L); (20x – 100  $\mu\text{m}$ ) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). AdE (Epidermis Adaxial); AbE (Epidermis Abaxial); PP (Parénquima en empalizada); SP (Parénquima esponjoso); BSC (Células de la vaina-haz vascular); TR (Tricoma); ST (Estomas) (Paréquima esponjoso); CO (Cristales de Oxalato).

**Figura 6.** Área foliar y Biomasa seca de hojas de *Solanum lycopersicum* de las variedades Pony Express (A,B) 104 Rosa Pack (C,D) y 120 Cherry (E,F) cultivadas bajo diferentes tratamientos de temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ).

**Figura 7.** Grosor de hoja y Área Foliar Específica en hojas de *Solanum lycopersicum* de las variedades Pony Express (A,B) 104 Rosa Pack (C,D) y 120 Cherry (E,F) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 15$ ).

**Figura 8.** Plantas de *Solanum lycopersicum* de las variedades Pony Express (A,B) 104 Rosa Pack (C,D) y 120 Cherry (E,F) cultivadas bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ).

## CAPÍTULO 5

**Tabla 1.** Medidas de la eficiencia máxima del PSII de dos variedades de *S. lycopersicum* (Pony Express y 104 Rosa Pack). Eficiencia cuántica del PSII ( $\Phi\text{PSII}$ ), Coeficiente de extinción fotoquímico (qP) y no fotoquímico (qN) y Tasa de Transporte de Electrones (ETR).



**Figura 1.** Curvas de respuesta de la  $P_N$  en función de la Densidad de Flujo de Fotones Fotosintéticos constante de 0 a  $2500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  en *S. lycopersicum* var. Pony Express a  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  (A) y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  (B) y de la var. 104 Rosa Pack a  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  (C) y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ (D), bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1=  $30^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C2=  $30^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C3=  $40^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C4=  $40^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas

**Figura 2.** Curvas de respuesta del WUE en función de la Densidad de Flujo de Fotones Fotosintéticos constante de 0 a  $2500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  en *S. lycopersicum* var. Pony Express a  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  (A) y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  (B) y de la var. 104 Rosa Pack a  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$  (C) y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ (D), bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1=  $30^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C2=  $30^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C3=  $40^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C4=  $40^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 16$ ).

**Figura 3.** Curvas de respuesta de la tasa de asimilación ( $P_N$ ) vs. la concentración intercelular de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) en *Solanum lycopersicum* var. Pony Express (A) y var. 104 Rosa Pack (B) bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1=  $30^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C2=  $30^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C3=  $40^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C4=  $40^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 16$ ).

**Figura 4.** Cuantificación absoluta (Número de copias de cDNA ( $\text{ng}/\mu\text{L}$ ) en base  $\text{Log}^{10}$  del gen *psbA* por qPCR Tiempo Real en *Solanum lycopersicum* var. Híbrido Pony Express (A) y var. Criollo Rosa Pack (B) en la mañana (7:00 – 9:00 am) y tarde (1:00 – 3:00 pm), bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1=  $30^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C2=  $30^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C3=  $40^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ; C4=  $40^\circ \text{C}$  y  $1200 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 12$ ).

**Figura 5.** Modelo propuesto en la expresión del gen *psbA* en cuatro tratamientos de temperatura y  $\text{CO}_2$  en *Solanum lycopersicum* var. Pony Express y var. 104 Rosa Pack bajo diferentes temperaturas y atmósferas enriquecidas con  $C_a$  (C1=  $30^\circ\text{C}$  y  $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$

<sup>1</sup>; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 12$ ).

**Figura 6.** Western Blots representativos de la proteína D1 (A,C) con la acumulación relativa de la proteína (B,D), usando como control el tratamiento a una temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> estables (30°C - 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ) en *Solanum lycopersicum* var. Pony Express y 104 (A,B) Rosa Pack (C,D) evaluados en la mañana (7:00 – 9:00 am) y en la tarde (1:00 – 3:00 pm) bajo diferentes tratamientos de temperatura y CO<sub>2</sub> (Control= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ) (Figura representativa). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 12$ ).

**Figura 7.** Western Blots representativos de Rubisco (A,C) con su acumulación relativa (B,D), usando como control el tratamiento a una temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> estables (30°C - 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ) en *Solanum lycopersicum* var. Pony Express y 104 (A,B) Rosa Pack (C,D) evaluados en la mañana (7:00 – 9:00 am) y en la tarde (1:00 – 3:00 pm) bajo diferentes tratamientos de temperatura y CO<sub>2</sub> (Control= 30°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C2= 30° C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C3= 40°C y 400  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; C4= 40 °C y 1200  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ). Los datos son medias  $\pm$  EE calculadas; literales diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. (Tukey,  $p \leq 0.05$ ,  $n = 12$ ).

## **ix. Resumen**

El calentamiento Global en las últimas décadas ha propiciado un cambio extremo en las condiciones climáticas causando altas temperaturas, incrementando la radiación UV-B, estrés hídrico y salinidad de suelos; esto representa pérdidas en el sector agrícola (FAO; SIAP, 2019) y disminuye la productividad en los cultivos y ocasionando graves pérdidas económicas (IPCC, 2019). Ya que las regiones del trópico se encuentran más propensas a las fluctuaciones ocasionadas por efecto del cambio climático, éste genera un impacto negativo importante en los factores abióticos y también afecta el proceso fotosintético dañando proteínas específicas que permiten que ocurra la fotosíntesis; sin embargo estudios previos demuestran que ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub> pueden mejorar el funcionamiento fotosintético, debido a que las hortalizas tropicales son especies de importancia económica que a nivel nacional se ven afectadas por el efecto del Cambio Climático el presente trabajo tiene como objetivo evaluar las respuestas adaptativas de dos hortalizas de importancia económica y agrícola, así como evaluar proteínas que participan en el proceso fotosintético y la expresión de genes que codifican para éstas proteínas bajo condiciones de ambientes enriquecidos con atmósferas de CO<sub>2</sub>

## **x. Abstract**

Global warming in recent decades has led to an extreme change in climatic conditions causing high temperatures, increasing UV-B radiation, water stress and soil salinity; This represents losses in the agricultural sector (FAO; SIAP, 2019) and reduces productivity in crops leading to serious economic losses (IPCC, 2019). Since the tropic regions are more susceptible to fluctuations caused by the effect of climate change, this generates a significant negative impact on abiotic factors and also affects the photosynthetic process, damaging specific proteins that allow photosynthesis to occur; however, previous studies demonstrated that CO<sub>2</sub>-enriched environments can improve photosynthetic functioning, due to tropical vegetables are species of economic importance that are nationally affected by the effect of climate change, this work aims to assess adaptive responses of two crops of economic and agricultural importance, as well as evaluating proteins that participate in the photosynthetic process and the expression of genes that code for protected proteins under conditions of CO<sub>2</sub> enriched environments.

## **I. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

### **1.1 Introducción**

El calentamiento Global es un hecho que en las últimas décadas ha dado lugar a cambios extremos en las condiciones climáticas causando altas temperaturas, alterando el clima, ocasionando huracanes, tormentas tropicales, cambios en las estaciones, el IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, por sus siglas en Inglés), prevé un aumento de 1.5 °C en la temperatura global hacia el año 2050; así como un incremento en los niveles de CO<sub>2</sub> de 1 200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>. Entre los organismos encargados de implementar acciones para mitigar los efectos del Cambio Climático se encuentra la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUPCC); sin embargo la creciente población y su demanda han retrasado éstos esfuerzos, teniendo como consecuencias daños importantes en el sector agrícola principalmente, ocasionando graves pérdidas económicas (IPCC, 2019). Ya que las regiones del trópico se encuentran más propensas a las fluctuaciones ocasionadas por efecto del cambio climático, éste genera un impacto negativo importante en los factores abióticos y también afecta el proceso fotosintético dañando proteínas específicas que permiten el inicio del proceso de la fotosíntesis; sin embargo estudios previos demuestran que ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub> pueden mejorar el funcionamiento fotosintético, debido a que las hortalizas tropicales son especies de importancia económica que a nivel nacional se ven afectadas por el efecto del Cambio Climático

### **1.2 Antecedentes**

#### **1.2.1 Cambio Climático**

Existen diversas definiciones alrededor del término *Cambio Climático* la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) lo define como el “*Cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables*” (CMNUCC, 2019); mientras que el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, por sus siglas en inglés IPCC, lo define como “*Cualquier cambio en el clima en el tiempo ya sea debido a la variabilidad natural o a la actividad humana*” (IPCC, 2019). Entre las principales causas a las que se atribuye se encuentran la sobrepoblación, el cambio de uso del suelo, la deforestación,

erosión; sin embargo, las actividades antropogénicas han sido el principal actor para el cambio climático. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica menciona que se ha presentado un acelerado incremento en el calentamiento global (NOAA, 2019); por lo que el cambio climático se ha convertido en uno de los principales problemas a nivel mundial y un desafío global. Es claro que el impacto del Cambio Climático genera una problemática global, necesaria de resolver y mitigar sus efectos es estrictamente necesario.

### **1.2.2. Impacto del Cambio Climático en la Agricultura**

El calentamiento Global en las últimas décadas ha propiciado un cambio extremo en las condiciones climáticas causando altas temperaturas, incremento la radiación UV-B, sequías extremas, salinidad de suelos, fluctuaciones en la precipitación, y en el clima (Bathiany *et al.*, 2018; Siddig *et al.*, 2020). La FAO (2019) registra a la agricultura como el principal sector afectado por los efectos del cambio climático (FAO; SIAP, 2019). Entre los factores que limitan la productividad de los cultivos el IPCC (2019) menciona a las altas temperaturas y la sequía que ocasionan pérdidas agrícolas que ascienden al 49% de la producción mundial (FAO, 2019). Los efectos del Cambio Climático están teniendo un impacto negativo en la agricultura especialmente en regiones tropicales, lo que representa un riesgo para la seguridad alimentaria, teniendo en cuenta la creciente población y demanda per cápita; por otra parte Martínez & Patiño, (2012) también mencionan el incremento en la temperatura como el principal efecto del cambio climático que ocasiona un estado de estrés en los cultivos promoviendo su susceptibilidad hacia factores bióticos como el ataque de patógenos, guiando a pérdidas económicas y en consecuencia menor accesibilidad a alimentos (IPCC, 2019). Algunos autores mencionan la capacidad adaptativa de las plantas ante tales condiciones de estrés y su habilidad de modificar su morfología, metabolismo y fisiología (Karimi *et al.*, 2018).

Si bien existen organizaciones mundiales encargadas de regular las acciones que reduzcan el impacto del Cambio Climático las actividades antropogénicas contribuyen en gran medida a generar la mayor parte del carbono liberado a la atmósfera; de acuerdo con el Atlas Global del Carbono el principal país emisor de CO<sub>2</sub> es China (10065 MtCO<sub>2</sub>), seguido por Estados Unidos (5416 MtCO<sub>2</sub>) e India (2654 MtCO<sub>2</sub>); al respecto, México ocupa el 12° lugar en emisiones de CO<sub>2</sub> (477 MtCO<sub>2</sub>) (GCA, 2019). (Cuadro 1).



**Cuadro 1.** Principales países emisores de CO<sub>2</sub> en Mt (toneladas métricas)

<b>Principales países emisores de CO<sub>2</sub></b>	<b>Toneladas métricas de CO<sub>2</sub> (MtCO<sub>2</sub>)</b>
China	10065 MtCO <sub>2</sub>
Estados Unidos	5416 MtCO <sub>2</sub>
India	2654 MtCO <sub>2</sub>
México	477 MtCO <sub>2</sub>

### 1.2.3 El CO<sub>2</sub>, como alternativa para mitigar el efecto del estrés en plantas

En su capacidad adaptativa las plantas han encontrado las estrategias para contrarrestar el efecto del estrés producido por los factores abióticos; estudios recientes mencionan que el CO<sub>2</sub> puede contribuir a mitigar el estrés ocasionado por el incremento de la temperatura y por sequía (Sánchez et al., 2005; Roy et al., 2016 y Oliveira & Marengo, 2019). El CO<sub>2</sub> es un gas de efecto invernadero, indispensable para el intercambio gaseoso de las plantas y la conversión de CO<sub>2</sub> a Oxígeno (O<sub>2</sub>), Sánchez et al., (20059; Roy et al., (2016) y Oliveira & Marengo (2019) también mencionan que el CO<sub>2</sub> puede tener un efecto positivo en condiciones de estrés por sequía pero su efecto disminuye en plantas que no se encuentran bajo éstas condiciones, lo que nos puede dar un panorama del efecto positivo que puede tener éste gas en condiciones críticas para las plantas tomando en cuenta las características inherentes de cada especie (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Estudios en los que se ha evaluado el uso del CO<sub>2</sub> como estrategia para mitigar el estrés por temperatura

<b>Especie</b>	<b>CO<sub>2</sub> como estrategia para mitigar el estrés por temperatura</b>	<b>Referencia</b>
<i>Pinus halepensis</i>	Mejora de la termotolerancia	Birami et al., (2020)
<i>Picrorhiza kurroa</i>	Modificaciones adaptativas en respuesta al enriquecimiento con CO <sub>2</sub>	Kumar et al., (2020)
<i>Theobroma cacao</i>	CO <sub>2</sub> pudo mitigar el efecto de la temperatura y el uso eficiente del agua	Hebbar et al., (2020)
<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Hiponastía de hojas e incremento fotosintético	Jayawardena et al., (2019)

<i>Eucalyptus tereticornis</i>	Incremento de Biomasa	Duan et al., (2019)
<i>Solanum lycopersicum</i> L.	Incremento de la eficiencia fotosintética	Pan et al., (2018)
<i>Coffea arabica</i> – <i>Coffea canephora</i>	Modificaciones anatómicas	Rodrigues et al., (2016)

Se ha reportado principalmente que en ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub>, éste gas es capaz de mejorar la eficiencia fotosintética en plantas y disminuir la disipación de la energía en forma de calor (Ermakova et al., 2019) incluso en plantas C4; éste mecanismo puede activar otros mecanismos adaptativos en las plantas, como generación de biomasa, cambios morfológicos y fisiológico y fortalecer su termotolerancia con la finalidad de adaptarse mejor a las condiciones climáticas.

#### **1.2.4 Importancia económica de Hortalizas Tropicales**

Como se ha mencionado previamente las especies del trópico son las que se encuentran más expuestas al efecto del Cambio Climático; es por ello que en este apartado se aborda la importancia de estudiar estas respuestas en especies tropicales.

Los cultivos tropicales, principalmente las hortalizas se encuentran distribuidas a nivel mundial, su importancia radica en que son especies de importancia agronómica con amplia distribución y consumo nacional e internacional (FAO, 2019). Los cultivos de mayor consumo a nivel nacional son: papa (*Solanum tuberosum* L.); maíz (*Zea mays*); tomate (*Solanum lycopersicum* L.); pimientos (*Capsicum* spp.); su producción se ha visto afectada por el efecto del Cambio Climático ya que las altas temperaturas de la región ocasionan bajos rendimientos, pérdida de la cosecha, impidiendo satisfacer la demanda poniendo en riesgo en la seguridad alimentaria del país. Los cultivos que se abordarán en el presente trabajo de investigación son tres genotipos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y dos especies de chile (*Capsicum* spp.) de mayor importancia en la región.

#### ***Capsicum* spp.**

Los pimientos, comúnmente conocidos como chiles (*Capsicum* spp.) son especies una especie pertenecientes a la familia de las solanáceas, las características de la región le

confieren a los frutos las características agronómicas y organolépticas deseables (Latournerie, 2015); una de las especies de mayor exportación es el chile habanero al cual el Diario Oficial de la Federación publicó bajo la norma (NOM 189-SCFI-2012) (DOF, 2010) el reconocimiento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) como “Chile habanero de la Península de Yucatán” y declaró la Denominación de Origen a los estados que comprenden a la Península (Yucatán, Campeche y Quintana Roo) (DOF, 2010).

De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2016); los pimientos son productos con demanda en el mercado local, nacional e internacional; de acuerdo a la literatura las pérdidas en la producción pueden estar ligadas a las variaciones extremas del cambio climático. Ruiz et al., (2011) menciona que el estrés hídrico es un factor abiótico que influye sobre los cultivos y la pungencia del fruto, siendo ésta una de las características agronómicas más apreciadas.

### ***Solanum lycopersicum L.***

Por otra parte, el tomate (*Solanum lycopersicum L.*) es una de las hortalizas de mayor producción a nivel mundial, siendo China el principal productor (FAO, 2019) a nivel nacional es una de las hortalizas de mayor consumo principalmente en fresco y contiene los nutrientes esenciales de la dieta, es una solanácea de rápido crecimiento y adaptada a las condiciones de la región. Ambas hortalizas previamente descritas son modelos idóneos para entender los efectos del Cambio Climático de igual manera entender sus mecanismos de adaptación y las estrategias de mitigación de estrés mediante ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub>.

### **1.2.5 Fotosíntesis**

La fotosíntesis es un proceso de conversión de energía lumínica a energía química, involucra la síntesis de carbohidratos a partir de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) (Taiz y Zeiger, 2002); para producir azúcares (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O)



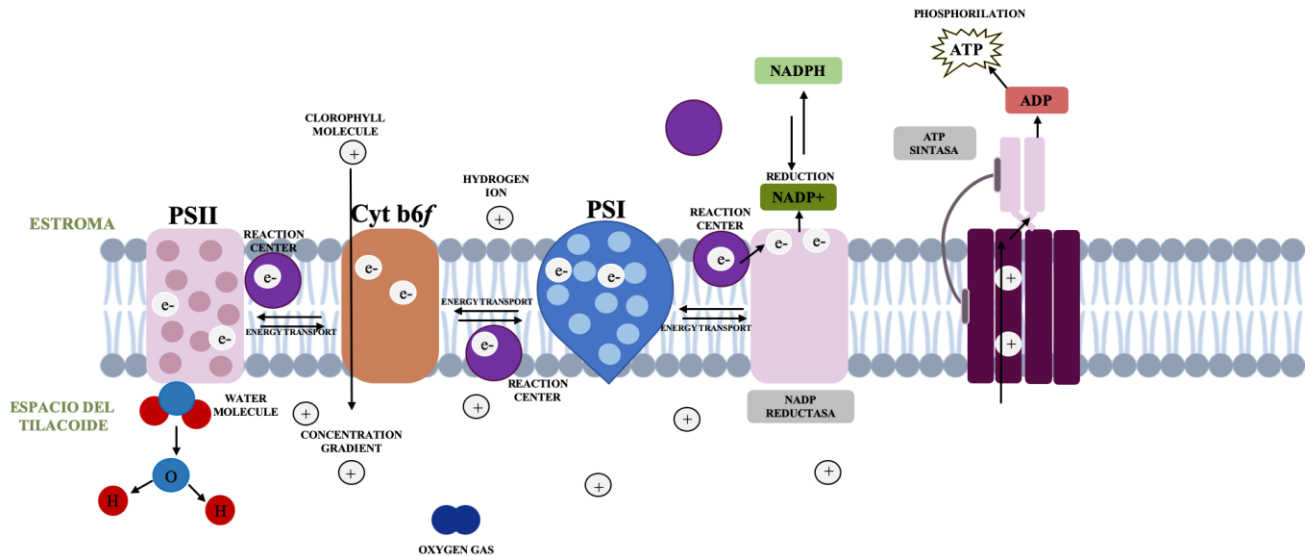
La fotosíntesis oxigénica es un proceso de óxido-reducción realizado por plantas superiores y otros microorganismos como algas y cianobacterias (Kiss *et al.*, 2019); en términos generales; este complejo proceso parte de la captación de partículas de luz, (fotones) que

contienen energía, la cual es absorbida y transferida a través de la cadena de transporte de electrones. La fotosíntesis se lleva a cabo en la membrana de los tilacoides simultáneamente en los centros de reacción del fotosistema II (PSII) y el fotosistema I (PSI) y consta de dos fases: la primera fase, conocida como fase lumínica en la que se realizan las reacciones de oxidación, y la segunda fase, el ciclo de fijación de carbono o ciclo de Calvin-Benson-Bassham, en la que se llevan a cabo reacciones de reducción y se generan compuestos de alta energía (ATP- (Adenosin Trifosfato) y NADPH (Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato) necesarios para la formación de biomasa.

La membrana de los tilacoides alberga los cloroplastos, estructuras especializadas dentro de las cuales está la clorofila, principalmente la clorofila  $\alpha$  y  $\beta$ , y otros pigmentos como los carotenoides, que sirven como complejos antena pigmento-proteína, que colectan la luz, la mayor parte de ésta energía es transformada a energía química redox y una pequeña parte de energía se disipa en forma de calor; ya que los cloroplastos deben moverse para poder capturar la luz; las condiciones actuales de temperatura y radiación pueden ser un factor limitante para este proceso, un estudio realizado por Rozak *et al.*, (2002) demuestra que al recibir diferentes intensidades de luz los cloroplastos son capaces de incrementar o disminuir el número de grana adaptándose a condiciones de luz u oscuridad por otra parte, Yamamoto (2016) menciona que cuando se captura una radiación excesiva lo más probable es que sea disipada como calor lo que comúnmente se conoce como coeficiente de extinción no fotoquímico (NPQ) y puede ser un mecanismo de fotoprotección; de acuerdo con Ermakova *et al.*, (2019), en un estudio realizado en *Setaria viridis* la sobreexpresión de la proteína Rieske FeS puede mejorar la eficiencia fotosintética en plantas C4, disminuyendo la disipación de energía (NPQ), éste mecanismo podría ser útil para aprovechar la energía cosechada y evitar el daño ocasionado al PSII y a las proteínas involucradas por la radiación.

La captura de fotones excita a los electrones y la energía es transferida al centro de reacción (RC) donde inicia a la cadena de transporte de electrones a partir del PSII (Kale *et al.*, 2017; Taiz y Zeiger 2002). En éste proceso de transferencia de energía también están involucradas algunas proteínas intermembranales, como la proteína D1 que forma parte del complejo del PSII y es blanco del daño oxidativo en presencia de luz excesiva, siendo degradada por la acción de enzimas; que da lugar al daño reversible cuando la proteína puede sintetizarse rápidamente; sin embargo, el daño se vuelve irreversible cuando la

proteína dañada no puede sintetizarse nuevamente (Kale *et al.*, 2017; Paradiso *et al.*, 2017; Theis *et al.*, 2016; Tkemaladze & Makhashvili, 2016; Edelman & Mattoo, 2008; Taiz & Zeiger, 2002).



**Figura 1.** Esquema de la fotosíntesis ejemplificando la cadena de transferencia de electrones que inicia en el PSII a la subunidad Cyt b6f y al PSI y las reacciones de óxido-reducción para continuar en el Ciclo de Calvin-Benson.

### 1.2.6 Fotosistema II (PSII)

El Fotosistema II (PSII) es una multi-subunidad de los tilacoides, complejo protéico intermembranal conformado por complejos de proteínas, en el PSII inicia la cadena de transporte de electrones por medio de la activación de fotones a partir de la captura de la luz solar, emplea la energía de la luz para producir oxígeno atmosférico e indirectamente gran parte de la biomasa del planeta (Hankamer & Barber, 1997; Whitmarsh & Govindjee., 2002). El PSII se encuentra en la grana y se compone por cerca de 30 proteínas codificadas por genes del cloroplasto y del núcleo, entre las cuales 17 son proteínas intrínsecas de membrana; entre las que destacan por su importancia en el proceso fotosintético la proteína D1, D2, CP43 y CP47, según Whitmarsh & Govindjee., (2002) las proteínas antena (CP43 y CP47) en conjunto con el centro de reacción se encargan de unir moléculas de clorofila  $\alpha$ , carotenoides, cloruro, calcio y iones de bicarbonato; mientras que las familias de proteínas de los complejos cosechadores de luz del PSII (LHC-II) unen clorofila  $\alpha$ , clorofila  $b$  y carotenoides. El fotosistema II puede sufrir daño principalmente por el exceso de luz y el daño en la tasa de reparación de la síntesis de la proteína D1 principalmente y otras



proteínas, también es blanco de otros factores abióticos, como la temperatura (Taub *et al.*, 2000; Xu, *et al.*, 2015), así como por factores bióticos tal como lo reportan Cheng *et al.*, (2016) en un estudio realizado en *Pseudomonas syringae*. Por otra parte Järvi *et al.*, (2015) mencionan que los organismos que realizan la fotosíntesis oxigénica se encargan de mantener la actividad del PSII.

### 1.2.7 Proteína D1 y proteínas centrales del PSII

Las Proteínas Intrínsecas de Membrana son proteínas clave para la mayor parte de los procesos que involucra la fotosíntesis; entre las que destacan por su importancia en el proceso fotosintético se encuentra la proteína D1, la cual está involucrada en la fotoinhibición, es una proteína de baja masa molecular (30-35 kDa) que participa en procesos de ensamblaje, estabilización y dimerización del PSII, se encarga de la separación de cargas del centro de reacción. Ésta proteína central es sintetizada en los fotosistemas (PSI y PSII) y su función es necesaria para llevar a cabo la fotosíntesis. Por otra parte el PSII está integrado por complejos de proteínas intermembranales, como el que forma la proteína D1 acoplada a la proteína D2; entre sus funciones ambas proteínas son cofactores activos de redox, mientras que la proteína D1 es la proteína de unión al centro de reacción que permite el inicio de la cadena de transporte de electrones; otras proteínas intrínsecas de membrana como las CP43 y CP47 son complejos pigmento-proteína que funcionan como antenas del centro de reacción, inducen la separación de cargas con el LHCII (Light Harvesting Complex II) que habilita el OCE (Oxygen Evolving Complex) para poder llevar a cabo la oxidación de las moléculas de agua; éstas proteínas son de baja masa molecular y participan en otros procesos como la estabilización y ensamblaje del PSII.



**Figura 2.** Proteínas Intrínsecas de Membrana encontradas en el fotosistema II (PSII).

Cuando la energía fotoquímica es excesiva esto tiene un efecto directo en la señalización de la planta en condiciones de estrés (Bhattacharjee, 2019), lo cual está íntimamente relacionado con la degradación de la proteína D1 por acción de factores abióticos. Una respuesta en las plantas es la disipación de energía en forma de calor como efecto de una serie de mecanismos como pueden ser la emisión de luz, la transferencia de electrones y la irradiación de calor, desde los fotosistemas donde los fotones son excitados hasta fuentes alternativas, la sobreexcitación del PSI ocasiona la reversión de electrones y da lugar a la generación y acumulación de ROS, debido a ésta acumulación los sistemas enzimáticos y no enzimáticos de detoxificación no son capaces de contrarrestar el efecto de las ROS y se produce daño fotooxidativo en el aparato fotosintético, bloqueo de la fotosíntesis y muerte celular, también puede incrementar la tasa de degradación de la proteína D1 del LHCII, éste proceso da lugar a la separación del centro de reacción del PSII y sus LHC y a la fotoinhibición, lo cual también es un mecanismo de fotoprotección. El exceso de energía puede ocasionar la aclimatación de las plantas (Bhattacharjee, 2019).

Las altas temperaturas como efecto del Cambio Climático pueden tener un impacto negativo en la fotosíntesis de las plantas, lo cual implica daño en el fotosistema y proteínas específicas de la fotosíntesis. Es indispensable conocer los mecanismos de las plantas y brindar alternativas que ayuden a mitigar los efectos del Cambio Climático es por ello que con el panorama previo se propone la siguiente Hipótesis para el presente trabajo de investigación.

### **1.3 Hipótesis**

El CO<sub>2</sub> atmosférico mitigará los efectos negativos ocasionados por el aumento en la temperatura del aire, incrementará el crecimiento, modificará la fenología reproductiva, la eficiencia fotosintética, la concentración de proteínas involucradas en la fotosíntesis y la expresión de genes que codifican para estas proteínas. De igual manera las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> modificarán la morfología y anatomía de las hojas de plantas de tomate (*S. lycopersicum*) y chile (*Capsicum* spp.).

## 1.4 Objetivos

### *Objetivo General*

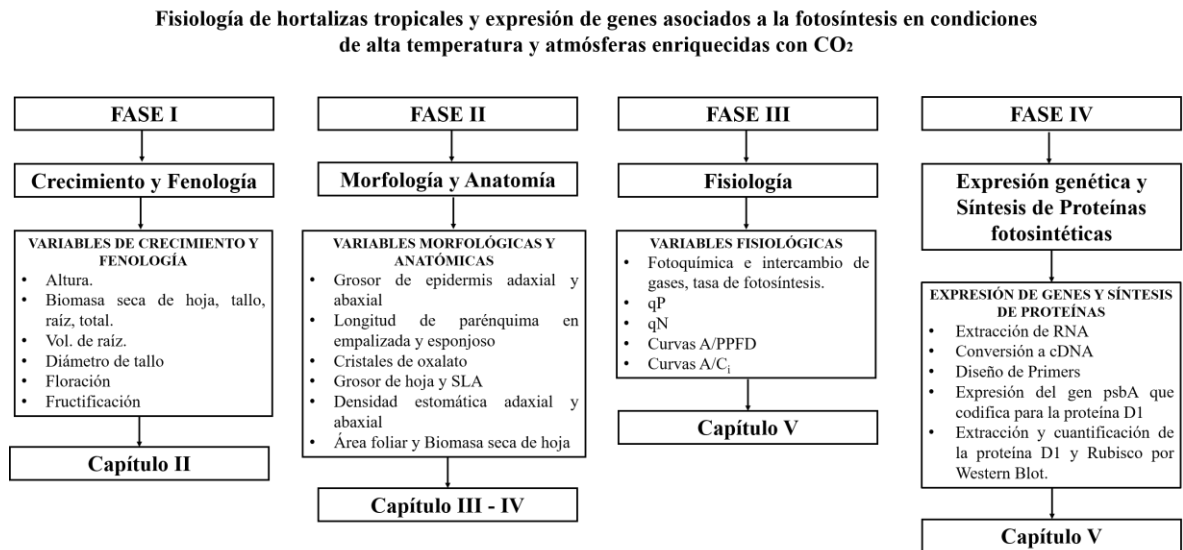
Evaluar el crecimiento, la fenología, la fotosíntesis, la morfología y la anatomía de hoja; así como la concentración de la proteína D1 y Rubisco involucradas en la fotosíntesis y la expresión del gen *psbA* que codifica para la proteína D1 en plantas de tomate (*S. lycopersicum*) y chile (*Capsicum* spp.), en condiciones de temperatura alta y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>.

### *Objetivos Específicos*

- Evaluar el crecimiento y la fenología de plantas de tomate (*S. lycopersicum*) y chile (*Capsicum* spp.) en condiciones de altas temperaturas y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>.
- Evaluar la morfología y la anatomía de hojas de tomate (*S. lycopersicum*) y chile (*Capsicum* spp.) en condiciones de alta temperatura y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>.
- Evaluar la fotoquímica de la hoja y el intercambio de gases en las hojas de tomate (*S. lycopersicum*) y chile (*Capsicum* spp.) en condiciones de alta temperatura y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>.
- Evaluar la concentración de la proteína D1 y Rubisco así como la expresión del gen *psbA* en hojas de tomate (*S. lycopersicum*) y chile (*Capsicum* spp.) en condiciones de temperatura alta y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>.

## 1.5 Procedimiento experimental.

Se establecieron cuatro fases esquematizadas en el siguiente diagrama con la intención de cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación (Figura 3).



**Figura 3.** Estrategia experimental

## 1.6 Literatura citada

1. Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) 2019.
2. Atlas Global del Carbono (GCA) 2019.
3. Bathiany, S., Dakos, V., Scheffer, M., & Lenton, T. M. (2018). Climate models predict increasing temperature variability in poor countries. *Science Advances*, 4(5), 1–11.
4. Bhattacharjee, S. (2019). Reactive Oxygen Species in *Plant Biology*.
5. Birami, B., Nägele, T., Gattmann, M., Preisler, Y., Gast, A., Arneith, A., & Ruehr, N. K. (2020). Hot drought reduces the effects of elevated CO<sub>2</sub> on tree water-use efficiency and carbon metabolism. *New Phytologist*, 1607–1621.
6. Cheng, D., Zhang, Z., Sun, X., Zhao, M., Sun, G., & Chow, W. S. (2016). Photoinhibition and photoinhibition-like damage to the photosynthetic apparatus in tobacco leaves induced by *Pseudomonas syringae* pv. Tabaci under light and dark conditions. *BMC Plant Biology*, 1–11.
7. Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, CMNUPCC (2019).
8. Duan, H., Onteddu, J., Milham, P., Lewis, J. D., & Tissue, D. T. (2019). Effects of elevated carbon dioxide and elevated temperature on morphological, physiological and anatomical responses of *Eucalyptus tereticornis* along a soil phosphorus gradient. *Tree Physiology*, 39(11), 1821–1837.
9. Edelman, M., & Mattoo, A. K. (2008). D1-protein dynamics in photosystem II: the lingering enigma. 609–620.
10. Ermakova, M., Lopez-calcagno, P. E., Caemmerer, S. Von, Raines, C. A., & Furbank, R. T. (2019). Overexpression of the Rieske FeS protein of the Cytochrome b6f complex increases. *Communications Biology*, 2019, 1–12.
11. Hankamer, B., & Barber, J. (1997). STRUCTURE AND MEMBRANE ORGANIZATION OF PHOTOSYSTEM II IN GREEN PLANTS. 9–11.
12. Hebbar, K. B., Apshara, E., Chandran, K. P., & Prasad, P. V. V. (2020). Effect of elevated CO<sub>2</sub> high temperature, and water deficit on growth, photosynthesis, and whole plant water use efficiency of cocoa (*Theobroma cacao* L.). *International Journal of Biometeorology*, 64(1), 47–57.

13. Järvi, S., Suorsa, M., & Aro, E. (2015). Biochimica et Biophysica Acta Photosystem II repair in plant chloroplasts — Regulation assisting proteins and shared components with photosystem II *Biogenesis*. 1847, 900–909.
14. Jayawardena, D. M., Heckathorn, S. A., Bista, D. R., & Boldt, J. K. (2019). Elevated carbon dioxide plus chronic warming causes dramatic increases in leaf angle in tomato, which correlates with reduced plant growth. *Plant Cell and Environment*, 42(4), 1247–1256.
15. Kale, R., Hebert, A. E., Frankel, L. K., Sallans, L., & Bricker, T. M. (2017). Amino acid oxidation of the D1 and D2 proteins by oxygen radicals during photoinhibition of Photosystem II. 1–6.
16. Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1–15.
17. Kiss, É., Knoppová, J., Aznar, P., Pilný, J., Yu, J., Halada, P., & Nixon, P. J. (2019). A Photosynthesis-Specific Rubredoxin-Like Protein Is Required for Efficient Association of the D1 and D2 Proteins during the Initial Steps of Photosystem II Assembly. 31(September), 2241–2258.
18. Kumar, R., Joshi, R., Kumari, M., Thakur, R., Kumar, D., & Kumar, S. (2020). Elevated CO<sub>2</sub> and temperature influence key proteins and metabolites associated with photosynthesis, antioxidant and carbon metabolism in *Picrorhiza kurroa*. *Journal of Proteomics*, 103755.
19. Latournerie, L. (2015). EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE GERMOPLASMA DE CHILE HABANERO (*Capsicum Chinense* Jacq.). JANUARY, 2–7.
20. Martínez, P., & Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(1), 5–20.
21. Oliveira, M. F., & Marengo, R. A. (2019). Gas exchange, biomass allocation and water-use efficiency in response to elevated CO<sub>2</sub> and drought in andiroba (*Carapa surinamensis*, Meliaceae). *IForest*, 12(1), 61–68.
22. Pan, C., Ahammed, G. J., Li, X., & Shi, K. (2018). Elevated CO<sub>2</sub> Photosynthesis under high temperature by attenuating the functional limitations to energy fluxes, electron transport and redox homeostasis in tomato leaves. *Frontiers in Plant Science*, 871(November), 1–11.



23. IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Available online: <https://www.ipcc.ch/> (2019).
24. Rodrigues, W. P., Martins, M. Q., Fortunato, A. S., Rodrigues, A. P., Semedo, J. N., Simões-Costa, M. C., Pais, I. P., Leitão, A. E., Colwell, F., Goulao, L., Máguas, C., Maia, R., Partelli, F. L., Campostrini, E., Scotti-Campos, P., Ribeiro-Barros, A. I., Lidon, F. C., Damatta, F. M., & Ramalho, J. C. (2016). Long-term elevated air [CO<sub>2</sub>] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supra-optimal temperatures in tropical *Coffea arabica* and *C. canephora* species. *Global Change Biology*, 22(1), 415–431.
25. Roy, J., Picon-Cochardb, C., Augustib, A., Benotb, M.-L., Thieryb, L., Darsonvilleb, L., Landaisa, D., Piela, C., Defosseza, M., Devidala, S., Escapea, C., Ravela, O., Fromine, N., Volairee, F., Milcua, A., Bahng, M., Soussana, J.-F., & AECotron. (2016). Elevated CO<sub>2</sub> maintains grassland net carbon uptake under a future heat and drought extreme. 113(22).
26. Ruiz, Lau. Nancy, Medina, Lara. Fátima y Martínez, E. M. (2011). *Orig en. Ciencia*, 70–77.
27. Sánchez-Guerrero, M. C., Lorenzo, P., Medrano, E., Castilla, N., Soriano, T., & Baille, A. (2005). Effect of variable CO<sub>2</sub> enrichment on greenhouse production in mild winter climates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3–4), 244–252.
28. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2019.
29. Siddig, K., Stepanyan, D., Wiebelt, M., Grethe, H., & Zhu, T. (2020). Climate change and agriculture in the Sudan: Impact pathways beyond changes in mean rainfall and temperature. *Ecological Economics*, 169
30. Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology* (3rd ed.). Sinauer Associates.
31. Taub, D. R., Seemann, J. R., & Coleman, J. S. (2000). *Growth in elevated CO<sub>2</sub> protects photosynthesis against high-temperature damage*. 1, 649–656.
32. Theis, J., Schroda, M., Theis, J., Schroda, M., Theis, J., & Schroda, M. (2016). Revisiting the photosystem II repair cycle Revisiting the photosystem II repair cycle. *Plant Signaling & Behavior*, 11(9), 1–8.
33. Tkemaladze, G. S., & Makhshvili, K. A. (2016). Climate changes and photosynthesis. *Annals of Agrarian Science*, 14(2), 119–126.
34. Whitmarsh, J., & Govindjee. (2002). Photosystem II. 1.

35. Xu, Z., Jiang, Y., & Zhou, G. (2015). Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO<sub>2</sub> with environmental stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6(September), 1–17.
36. Yamamoto, Y. (2016). Quality Control of Photosystem II: *The Mechanisms for Avoidance and Tolerance of Light and Heat Stresses are Closely Linked to Membrane Fluidity of the Thylakoids*. 7, 1–13.

## High Temperature and Elevated CO<sub>2</sub> Modify Phenology and Growth in Pepper Plants

**Abstract:** The aim of this study was to determine the effect of temperature and CO<sub>2</sub> on seed emergence, seedling quality, and phenological stage of *Capsicum chinense* and *Capsicum annuum* cultivated in four controlled growth chambers (C1: 30 °C and 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C2: 40 °C and 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C3: 30 °C and 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C4: 40 °C and 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>). Neither temperature nor elevated CO<sub>2</sub> influenced seed emergence, although differences were observed in seedling mortality, with high temperature affecting seedling survival in both species; the mortality rate at 40 °C was 20 and 53% in *C. annuum* and 45 and 58% in *C. chinense* at 400 and 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>, respectively. Differences were also observed in growth parameters, where positive effects were observed on leaf area, which reached 45.9 cm<sup>2</sup> in *C. annuum* and 23.9 cm<sup>2</sup> in *C. chinense* with elevated CO<sub>2</sub> at 30 °C, but negative effects were observed with high temperature. CO<sub>2</sub> enrichment increased flower and fruit production per plant. However, high temperature delayed flower phenology, increased flower abortion and inhibited fruit set. Elevated CO<sub>2</sub> counteracted the detrimental effects of high temperature on growth parameters and flower number, but this was not sufficient to prevent flower abortion and the detrimental morphological characteristics of fruit caused by a temperature of 40 °C.

### Lista de Autores

MC. Jade Melisa Pereyda González (jade.pereyda@itconkal.edu.mx)

Dr. Clelia de la Peña Seaman

Dr. Wilmer Tezara Fernández

Dr. Roberto Zamora Bustillos

Dr. Rubén Andueza Noh

Biol. Jehú Noh Kú

Biol. María Carrera Marín

Dr. René Garruña Hernández (renegh10@hotmail)

**Publicado en la Revista:** Agronomy de la editorial MDPI.

DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081836>

## Resumen:

Las especies de *Capsicum* están bien adaptadas a las condiciones de cambio climático en las regiones tropicales, reportes previos indican que los ambientes enriquecidos con CO<sub>2</sub> pueden mejorar el impacto negativo de la temperatura alta. Con la finalidad de cuantificar las modificaciones morfo-anatómicas foliares de dos especies del género *Capsicum* (*Capsicum annuum* y *Capsicum chinense*) cultivadas en cuatro cámaras de crecimiento con ambientes controlados (C1= 30°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C2= 30° C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C3= 40°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C4= 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>). *Capsicum annuum* tuvo el mayor grosor en la epidermis adaxial en temperatura alta y C<sub>a</sub> elevado (28.13 μm); mientras que ambas especies presentaron un incremento en la epidermis abaxial en C4 (23.57 μm en *C. annuum* y 23.19 μm en *C. chinense*). *C. annuum* mostró diferencias significativas en el parénquima de empalizada en todos los tratamientos (C2; C3; C4) con respecto C1; mientras que *C. chinense* únicamente mostró diferencias en la interacción de temperatura alta y CO<sub>2</sub> elevado en C4; el parénquima esponjoso solo mostró diferencias en alta temperatura (C3) (20.14 μm) en *C. annuum*. El grosor de hoja incrementó en ambientes con temperatura alta-C<sub>a</sub> elevado. La densidad estomática en *C. annuum* se vió favorecida por temperatura y el C<sub>a</sub>; mientras que *C. chinense* por el C<sub>a</sub>. No se encontraron diferencias significativas en el área foliar, pero si en la anatomía foliar, se encontraron presentes cristales de oxalato con mayor abundancia en ambientes con alta temperatura. Los resultados obtenidos y las diferencias estadísticas encontradas indican una interacción positiva entre la temperatura y el CO<sub>2</sub> en las variables anatómicas evaluadas lo cual está relacionado con adaptaciones estructurales en función de la protección de los órganos fotosintéticos. Las adaptaciones estructurales de las hojas le permiten a la planta su supervivencia en ambientes pocos favorables, el entendimiento sobre el funcionamiento y las adaptaciones morfológicas nos brinda un enfoque hacia el futuro para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático.

## Lista de Autores

MC. Jade Melisa Pereyda González (jade.pereyda@itconkal.edu.mx)

Dr. René Garruña Hernández (renegh10@hotmail)

## Resumen

Las Solanáceas son especies con un amplio rango de distribución, están adaptadas a condiciones climáticas en el trópico, estudios previos reportan que un incremento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico (C<sub>a</sub>) puede atenuar el efecto de la temperatura alta como efecto del cambio climático; sin embargo, diversos autores señalan que el incremento en las concentraciones de este gas atmosférico puede propiciar modificaciones estructurales en hoja. Debido a esto, el objetivo de esta investigación se enfoca en determinar los cambios estructurales en hojas de tres variedades de *Solanum lycopersicum* L. (híbrido Pony Express, criollo 104 Rosa Pack y criollo 120 Cherry), cultivadas en cuatro cámaras de crecimiento con ambientes controlados (C1= 30°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C2= 30° C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C3= 40°C y 400 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>; C4= 40 °C y 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>). Se presentó variabilidad en los rasgos morfo-anatómicos evaluados entre el híbrido Pony Express y las variedades criollas 104 Rosa Pack y 120 Cherry. Las tres variedades presentaron una dinámica diferente en la Ad ET y la Ab ET; sin embargo, la temperatura ( $p < 0.0001$ ) tuvo un rol significativo en el incremento del grosor de la epidermis en las tres variedades. El grosor de Ad ET y Ab ET, incrementó de manera significativa en las tres variedades de *S. lycopersicum* evaluadas (Pony Express, 104 Rosa Pack y 120 Cherry) en temperatura alta - C<sub>a</sub> ambiental. En el PPT, todas las variedades superaron al tratamiento control, Pony Express incrementó el PPT en el tratamiento a temperatura baja – C<sub>a</sub> elevado (112.33 ± 2.66 μm), 104 Rosa Pack en temperatura alta - C<sub>a</sub> elevado (123.29 ± 2.26 μm) y el criollo 120 Cherry, en los tratamientos de temperatura alta, (102.15 ± 0.72 μm) en C<sub>a</sub> ambiental y de (100.06 ± 1.34 μm) en C<sub>a</sub> elevado. Las tres presentaron una tendencia similar en el incremento del SPT a temperatura alta y C<sub>a</sub> elevado: Pony Express (147.22 ± 1.51 μm); 104 Rosa Pack (130.04 ± 1.97 μm) y 120 Cherry (114.79 ± 1.45 μm). Los OxC se encontraban presentes en las células del mesófilo e incrementaron en los ambientes con C<sub>a</sub> elevado, a pesar de la temperatura, en temperatura alta – C<sub>a</sub> elevado se obtuvo la mayor área de OxC; Pony Express (3,913.80 ± 12.03 μm<sup>2</sup>); 104 Rosa Pack (3,178.88 ± 12.85 μm<sup>2</sup>) y 120 Cherry (3,084.97 ± 20.80 μm<sup>2</sup>); que corresponde a 2.69%; 1.53% y 1.55 % del TA. La mayor Ad SD se encontró a temperatura alta y C<sub>a</sub> elevado en Pony Express (13.24 ± 0.79 μm) y 104 Rosa Pack (19.63 ± 0.69 μm) y en 120 Cherry a temperatura baja – C<sub>a</sub> elevado (15.83 ± 0.80 μm). La mayor densidad de estomas se encontró en Ab SD. El tejido presentó desarreglo celular más notorio en el ambiente con temperatura alta – C<sub>a</sub> ambiental.

Todas las variedades disminuyeron su LA en temperatura alta – C<sub>a</sub> ambiental, la LDM incrementó significativamente en Pony Express en el control. El mayor LT se presentó a temperatura baja - C<sub>a</sub> ambiental en Pony Express ( $245.42 \pm 3.63 \mu\text{m}$ ), a temperatura alta – C<sub>a</sub> ambiental ( $272.42 \pm 2.93 \mu\text{m}$ ) en 104 Rosa Pack y a temperatura alta en 120 Cherry (C<sub>a</sub> ambiental:  $267.60 \pm 4.31 \mu\text{m}$ ; C<sub>a</sub> elevado:  $266.97 \pm 1.78 \mu\text{m}$ ); la SLA en Pony Express incrementó en todos los tratamientos, excepto en el control (temperatura baja - C<sub>a</sub> elevado:  $121.55 \pm 7.77 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ; temperatura alta - C<sub>a</sub> ambiental:  $97.90 \pm 19.41 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  y temperatura alta - C<sub>a</sub> elevado:  $144.73 \pm 7.42 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ), en 104 Rosa Pack aumentó a temperatura alta – C<sub>a</sub> elevado ( $163.50 \pm 16.82 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) y en 120 Cherry a temperatura baja (C<sub>a</sub> ambiental:  $137.43 \pm 15.11 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  y C<sub>a</sub> elevado ( $153.94 \pm 13.97 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ). Los resultados obtenidos y las diferencias estadísticas encontradas indican variabilidad entre las especies evaluadas, así como las modificaciones anatómicas una adaptación del tejido ante las condiciones ambientales a la que estaban expuestas las plantas como mecanismos de protección de los órganos fotosintéticos.

#### **Lista de Autores**

MC. Jade Melisa Pereyda González (jade.pereyda@itconkal.edu.mx)

Dr. René Garruña Hernández (renegh10@hotmail)

## Resumen

Las hortalizas son cultivos importantes en áreas tropicales debido a su amplia distribución y consumo por parte de la población global; sin embargo, existen factores asociados al cambio climático que afectan su producción. Por otra parte, estudios previos demuestran que el incremento en los niveles de CO<sub>2</sub> puede mitigar el estrés producido por las altas temperaturas, adicionalmente evaluar su rendimiento fotosintético es indispensable para conocer el funcionamiento de las plantas bajo condiciones de estrés extremo. En el presente estudio analizamos las respuestas fisiológicas de dos variedades de *Solanum lycopersicum* (Híbrido Pony Express y Criollo 104 Rosa Pack), así como la expresión absoluta del gen *psbA*, que codifica para la proteína D1, de igual manera se evaluó la acumulación relativa de la proteína D2 y de Rubisco en respuesta a la temperatura alta y atmósferas enriquecidas con CO<sub>2</sub>, con la finalidad de determinar el comportamiento fisiológico y molecular de *S. lycopersicum* ante el efecto del cambio climático, así como la capacidad del C<sub>a</sub> para mitigar el estrés ocasionado por la temperatura. En la eficiencia del PSII, La ΦPSII no presentó diferencias entre tratamientos entre especies, la ETR de Pony Express incrementó a temperatura alta – C<sub>a</sub> elevado (125.167 a) el qP incrementó en el mismo tratamiento en 104 Rosa Pack (0.482 a) y se observó un marcado efecto del CO<sub>2</sub> en el qN. En el intercambio de gases la P<sub>N</sub> incrementó a temperatura alta – C<sub>a</sub> ambiental a 1200 μmol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>, se observó un efecto del C<sub>a</sub> elevado a temperatura baja, ya que en este tratamiento se obtuvo la mayor eficiencia del WUE, en las curvas A/Ci, el híbrido mostró mayores tasas de fotosíntesis en relación a la concentración intercelular de CO<sub>2</sub>. El análisis de expresión absoluta del gen *psbA* incrementó en temperatura alta – C<sub>a</sub> ambiental en ambas variedades, la acumulación de la proteína D1 se observó en C<sub>a</sub> ambiental durante la mañana en Pony Express (10.86), mientras que el criollo presentó un incremento en el nivel de la proteína D1 por la tarde en todos los tratamientos, excepto en el tratamiento control, la acumulación de Rubisco incrementó en Pony Express en temperatura alta – C<sub>a</sub> ambiental por la tarde y se mantuvo estable en 104 Rosa Pack por lo que no se encontraron diferencias significativas asociadas al C<sub>a</sub> elevado en la expresión del gen ni en la acumulación de la proteína D1 ni Rubisco. Las plantas que se encontraban en el ambiente más estresado presentaron una mejor respuesta en los parámetros fotoquímicos, y destacaron en el análisis de expresión del gen *psbA* y de la acumulación relativa de la proteína D1 y Rubisco.



**Lista de Autores**

MC. Jade Melisa Pereyda González (jade.pereyda@itconkal.edu.mx)

Dr. René Garruña Hernández (renegh10@hotmail)