



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y PROCESAMIENTO AGRÍCOLA

**RESPUESTAS DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DEL CHILE
SOLEDAD (*Capsicum annuum* L.) A LA APLICACIÓN DE QUITOSANO Y
*Bacillus subtilis***

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN PRODUCCIÓN Y PROCESAMIENTO AGRÍCOLA**

PRESENTA:

C. ROSALBA GUADALUPE GOMEZ RAYMUNDO

DIRECTOR:

DR. ADOLFO AMADOR MENDOZA

CODIRECTOR:

DRA. ANA ROSA RAMÍREZ SEÑEZ

LOMA BONITA, OAXACA, MÉXICO 2024



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO	DEP/2024/106
ASUNTO	Autorización de impresión de tesis

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, a 29 de julio de 2024

M. EN C. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA
VICE-RECTOR ACADÉMICO
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Sirva la presente para informarle que, el jurado evaluador del examen para obtener el grado de **Maestra en Producción y Procesamiento Agrícola** de la C. Rosalba Guadalupe Gómez Raymundo, con número de **Matrícula 21180021**, ha autorizado la impresión del manuscrito que lleva por título **"Respuestas de crecimiento y rendimiento del chile soledad (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación de quitosano y *Bacillus subtilis*"**, para su posterior presentación y defensa por el sustentante.

Agradezco su atención y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

Atentamente
terra uberrima, mens aperta
Beu Lo-tama, chí jí jú

Dr. José Abad Zavaleta
Jefe de la División de Estudios de Posgrado



C.c.p. Dr. Adolfo Amador Mendoza – Director de tesis.
C.c.p. Dra. Ana Rosa Ramírez Seañez – Coordinadora de la Maestría en Producción y Procesamiento Agrícola
C.c.p. M. E. Yesenia Barrientos Arenal – Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Archivo.

CAMPUS TUXTEPEC
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial.
C.P. 38301, Tuxtepec, Oax.
Tel. 01(287)8759240

www.unpa.edu.mx

CAMPUS LOMA BONITA
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.
Tel. 01(281)8729230



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO	DEP/2024/107
ASUNTO	Jurado para examen de grado

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, a 29 de julio de 2024

ROSALBA GUADALUPE GÓMEZ RAYMUNDO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y PROCESAMIENTO AGRÍCOLA
UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

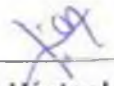
Por este medio le informo que el jurado de su examen para obtener el grado de **Maestra en Producción y Procesamiento Agrícola** estará integrado por los siguientes investigadores.

Profesor Investigador	Jurado de Examen
Dr. Rogelio Enrique Palacios Torres	Presidente
Dr. Hipólito Hernández Hernández	Secretario
Dr. Adolfo Amador Mendoza	Vocal
Dr. José Antonio Yam Tzec	Primer Suplente
Dr. José Orbelin Gutiérrez Hernández	Segundo Suplente

Sin más por el momento, le envío saludos cordiales.

Atentamente
terra uberrima, mens aperta
Bau Lo-tama, chi ji jú


Dr. José Abad Zavaleta
Jefe de la división de estudios
de posgrado.



M. en C. Héctor López Arjona
Vicerrector Académico
Vo. Bo.


C.c.p. Dr. Adolfo Amador Mendoza – Director de tesis.
C.c.p. Dra. Ana Rosa Ramírez Seañez – Coordinadora de la Maestría en Producción y Procesamiento Agrícola
C.c.p. M. E. Yesenia Barrientos Arenal – Jefap del Departamento de Servicios Escolares.
C.c.p. Archivo.

CAMPUS TUXTEPEC
C. Circuito central No. 200, Col. Parque Industrial.
C.P. 38304, Tuxtepec, Oax.
Tel. 01/281/8729230

www.unpa.edu.mx

CAMPUS LOMA BONITA
Av. Ferrocarril S/N, Ciudad universitaria.
C.P. 68400, Loma Bonita, Oax.
Tel. 01/281/8729230

HOJA DE ORIGINALIDAD

El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la Universidad del Papaloapan para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi eterno agradecimiento a:

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme realizar este proyecto.

Agradezco al Dr. Adolfo Amador Mendoza, por su orientación, asesorías, sugerencias y acertada revisión en este trabajo, de todo corazón muchas gracias por su interés en el desarrollo del trabajo.

A la Dra. Ana Rosa Ramírez Seañez por su apoyo incondicional en el trabajo de campo y paciencia para concluir este proyecto de todo corazón muchas gracias.

A mi asesor, Dr. Hipólito Hernández Hernández por las infinitas asesorías y apoyo en la práctica y redacción de este proyecto.

A la Dra. Nelda Xanath Martínez Galero por ayudarme en la etapa de validación por medio de espectrometría infrarroja de las muestras en la Universidad del Papaloapan campus Tuxtepec, así como sus consejos, infinitas gracias.

A mis compañeros de la carrera de ingeniería agrícola tropical y mis compañeros de maestría por ayudarme en las labores de campo.

A mis amigos Jonas Manuel Jiménez Rodríguez y Keyla Nínive López Luévano por su ayuda incondicional para la realización de este proyecto, infinitas gracias por tanto apoyo consejos y su amistad, por las palabras de aliento y ánimo, impulsándome siempre a salir adelante.

A la Universidad del Papaloapan (UNPA) por permitirme su espacio experimental para la realización de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por proporcionarme la beca durante el periodo de la maestría.

Al M.C Moisés Ramírez Meraz del INIFAP por la donación de las semillas de chile soledad CHISER-522.

Por último, quiero agradecer a la empresa Bioproductos Agrícolas de la Cuenca por la generosa beca de impresión y titulación de tesis que me han otorgado.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación llevado a cabo es dedicado principalmente a dios por permitirme concluirlo.

Dedico con todo mi corazón este trabajo a mi madre, pues sin ella no lo hubiera logrado. Tu bendición a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien, por ello te doy mi trabajo en ofrenda de tu paciencia y amor madre mía.

A mis hermanos por su paciencia en esta etapa.

A mis abuelos por velar por mi bienestar

ÍNDICE DE CONTENIDO

HOJA DE ORIGINALIDAD.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIA.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS	XIII
RESUMEN	XV
ABSTRACT.....	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. PRODUCCIÓN NACIONAL DE CHILE VERDE (<i>Capsicum annuum</i> L.)	4
2.2. PRODUCCIÓN ESTATAL DE CHILE SOLEDAD	6
2.3. PRODUCCIÓN DE CHILE SOLEDAD EN EL ESTADO DE VERACRUZ	7
2.4. TAXONOMÍA Y MORFOLÓGIA DEL CHILE (<i>Capsicum annuum</i> L.)	8
2.5. ETAPAS FENOLÓGICAS DEL CHILE (<i>Capsicum annuum</i> L.)	10
2.5.1. GERMINACIÓN.....	10
2.5.2. PLÁNTULA	10
2.5.3. CRECIMIENTO VEGETATIVO	10
2.5.4. FLORACIÓN Y FRUCTIFICACIÓN	11
2.6. REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS.....	11
2.6.1. TEMPERATURA.....	11
2.6.2. REQUERIMIENTO HÍDRICO.....	11
2.6.3. HUMEDAD RELATIVA.....	12
2.6.4. LUMINOSIDAD	12
2.6.5. ÉPOCA DE SIEMBRA	12
2.7. AGRICULTURA PROTEGIDA	13
2.7.1. CASA SOMBRA Y MALLA SOMBRA.....	13

2.7.2. MACRO TÚNEL O TÚNEL ALTO	14
2.7.3. MICRO TÚNEL O TÚNEL BAJO	14
2.7.4. INVERNADEROS	14
2.8. NUTRICIÓN EN EL CULTIVO DE CHILE	15
2.9. BIOFERTILIZANTES EN LA AGRICULTURA	16
2.9.1. MICROORGANISMOS UTILIZADOS COMO BIOFERTILIZANTES	17
2.9.2. BACTERIAS PROMOTORAS DE CRECIMIENTO VEGETAL (BPCV)	18
2.9.3. EL GÉNERO BACILLUS	19
2.9.4. <i>Bacillus subtilis</i>	19
2.10. QUITOSANO	21
2.10.1. PROPIEDADES DEL QUITOSANO EN LA AGRICULTURA	22
2.10.2. PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS Y BACTERICIDAS DEL QUITOSANO	22
2.10.3. ACTIVIDAD FUNGICIDA DEL QUITOSANO	23
2.10.4. ACTIVIDAD ANTIVIRAL DEL QUITOSANO	24
2.10.5. ESTIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL QUITOSANO	24
2.10.6. INDUCCIÓN DE RESISTENCIA DEL QUITOSANO	25
3. ANTECEDENTES.....	26
3.1. OBTENCIÓN DE QUITOSANO A PARTIR DE EXOESQUELETOS DE CAMARÓN	26
3.2. APLICACIÓN DE <i>Bacillus subtilis</i> EN <i>Capsicum annuum</i>	27
3.3. APLICACIÓN DE QUITOSANO EN CULTIVOS	28
6. OBJETIVOS.....	35
6.1. OBJETIVO GENERAL	35
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	35
7. HIPÓTESIS.....	36
8. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
8.1. LOCALIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL	37
8.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS	37
8.3. OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS QUITINOSAS	38
8.4. PURIFICACIÓN DE QUITOSANO	39
8.4.1. DESPROTEINIZACIÓN QUÍMICA (HIDRÓLISIS ALCALINA)	39

8.4.2. DESMINERALIZACIÓN QUÍMICA (HIDRÓLISIS ÁCIDA).....	39
8.4.3. DESACETILACIÓN DE LA QUITINA (HIDRÓLISIS ALCALINA)	40
8.4.4. DESPIGMENTACIÓN QUÍMICA.....	40
8.4.5. SECADO DE LA MUESTRA OBTENIDA	40
8.5. ANÁLISIS DE LA MUESTRA.....	40
8.5.1. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO OBTENIDO	40
8.5.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL QUITOSANO	41
8.5.3. CARACTERIZACIÓN CON ANÁLISIS INSTRUMENTAL.....	41
8.6. ELABORACIÓN DE BIOESTIMULANTE DE CRECIMIENTO	42
8.6.1. REPRODUCCIÓN DE <i>Bacillus subtilis</i>	42
8.6.2. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS	42
8.6.3. ELABORACIÓN DEL QUITOSANO Y <i>Bacillus subtilis</i>	42
8.7. MANEJO AGRONÓMICO	43
8.7.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SUSTRATO UTILIZADO	43
8.8. DETERMINACIÓN FÍSICOQUÍMICA	47
8.8.1. DETERMINACIÓN DE CAROTENOIDES, CLOROFILA A Y B	47
8.8.2. CONTENIDO DE EXTRACTO CELULAR DE PECIOLO, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y pH	48
8.8.3. PARÁMETROS DE CALIDAD EN FRUTOS	49
8.8.4. LONGITUD Y DIÁMETRO	49
8.8.5. PESO INDIVIDUAL (g).....	49
8.8.6. GROSOR DEL PERICARPIO (mm) Y NÚMERO DE LÓCULOS	50
8.8.7. GRADOS BRIX Y ACIDEZ TOTAL TITULABLE	50
8.8.8. CONDUCTIVIDAD Y PH.....	51
8.8.9. CONTENIDO DE CAPSAICINA	51
8.8.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	52
9. RESULTADOS	53
9.1. CARACTERIZACIÓN DE QUITOSANO OBTENIDO	53
9.2. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FT- IR)	56
9.3. REPRODUCCIÓN DE <i>Bacillus subtilis</i>	57
9.4. RESPUESTA DE CRECIMIENTO EN PLÁNTULAS EN LAS CHAROLAS.....	58
9.5. DESARROLLO DE LA PLANTA.....	60

9.5.1. DESARROLLO DEL CULTIVO DE CHILE SOLEDAD (<i>Capsicum annuum</i> L.)	60
9.6. DETERMINACIÓN DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS (CLOROFILA A Y B)	62
9.7. CONTENIDO DE EXTRACTO CELULAR DE PECIOLO	64
9.8. Número de frutos y rendimiento por planta	68
9.9. RENDIMIENTO GLOBAL	69
9.10. CALIDAD DE FRUTO	70
10. DISCUSIÓN	83
10.1. CARACTERIZACIÓN DEL QUITOSANO OBTENIDO	83
10.2. CARACTERIZACIÓN DEL QUITOSANO UNPA Y QUITOSANO SIGMA POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR)	87
10.3. CRECIMIENTO EN PLÁNTULAS	88
10.4. RESPUESTA DE CRECIMIENTO DESPUÉS DEL TRASPLANTE	90
10.5. DETERMINACIÓN DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS	92
10.6. DETERMINACIÓN DE NUTRIENTES EN SAVIA	95
10.7. RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTO	96
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
12. LITERATURA CITADA	100
13. ANEXOS.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Producción de chile soledad a nivel nacional en la modalidad de temporal. 6
Tabla 2	Producción de chile soledad (<i>Capsicum annuum</i> L.) en el estado de Oaxaca. 7
Tabla 3	Producción de chile soledad (<i>Capsicum annuum</i> L.) en el estado de Veracruz. 8
Tabla 4	Clasificación taxonómica de (<i>Capsicum annuum</i> L.) 9
Tabla 5	Descripción de los tratamientos realizados. 38
Tabla 6	Resultados obtenidos del análisis de lombricomposta. 44
Tabla 7	Cantidad de fertilizante preparado para 1,000 L de solución nutritiva de las diferentes concentraciones utilizadas. 45
Tabla 8	Contenido de minerales, proteína, humedad y pH en las diferentes muestras analizadas: exoesqueleto de camarón, quitosano UNPA y quitosano Sigma. 53
Tabla 9	Determinación de color de las diferentes muestras analizadas: exoesqueleto de camarón, quitosano UNPA y quitosano Sigma. 55
Tabla 10	Efecto de los tratamientos en el número de frutos de chile soledad (<i>Capsicum annuum</i> L.). 68
Tabla 11	Rendimiento en gramos de frutos de chile soledad (<i>Capsicum annuum</i> L.). 69

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Principales estados productores de chile verde en México	5
Figura 2	Estructura molecular del quitosano	21
Figura 3	Ubicación del campo experimental de la universidad del Papaloapan	38
Figura 4	Espectros FTIR de quitosano (UNPA) extraído a partir de exoesqueletos de camarón y quitosano (SIGMA) a un rango de longitud de onda de 4000 cm ⁻¹ a 500 cm ⁻¹ .	56
Figura 5	<i>Bacillus subtilis</i> (A) Bacilos gram positivos no esporulados, (B) esporas de <i>Bacillus subtilis</i> . Resultados de la Coloración de Gram 100X.	57
Figura 6	Altura de la planta (cm) (A), diámetro del tallo (mm) (B) y Número de hojas en chile soledad (<i>Capsicum annuum</i> L.). Evaluadas a los 15, 30 y 45 días después de la siembra (DDS), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= <i>Bacillus subtilis</i> , Q+BS = Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> , y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, P < 0.05).	59
Figura 7	Altura de la planta (cm), (A), Diámetro del tallo (mm), (B), Área foliar (cm ²) (C) y Número de brotes (D) en chile soledad (<i>Capsicum annuum</i> L.). Evaluadas de los 15 a 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= <i>Bacillus subtilis</i> , Q+BS = Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> , y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, P < 0.05).	61
Figura 8	Clorofila A (µg mL ⁻¹) (A), clorofila B (µg mL ⁻¹) (B) y clorofila A y B (µg mL ⁻¹) (C) en chile soledad (<i>Capsicum annuum</i> L.). Evaluadas de los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= <i>Bacillus subtilis</i> , Q+BS = Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> , y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, P < 0.05).	63

Figura 9	Efecto de la conductividad eléctrica (A), el pH (B) Y grados brix (C) en chile soledad (<i>Capsicum annum</i> L.). Evaluadas de los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= <i>Bacillus subtilis</i> , Q+BS = Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> , y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).	66
Figura 10	Variables nutritivas: Nitratos en savia (D), fósforo en savia (E) y potasio en savia (F) en chile soledad (<i>Capsicum annum</i> L.). Evaluado a los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= <i>Bacillus subtilis</i> , Q+BS = Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> , y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$)	67
Figura 11	Efecto de la aplicación de biofertilizantes en el número de frutos y peso en gramos en chile soledad (<i>Capsicum annum</i> L.) evaluadas con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= <i>Bacillus subtilis</i> , Q+BS = Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> , y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).	70
Figura 12	Variables morfológicas de calidad en frutos de chile soledad (<i>Capsicum annum</i> L.) primer corte Longitud de fruto (A1), Diámetro de fruto (B1), peso de fruto en gramos (C1) y grosor de pericarpio (D1) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= <i>Bacillus subtilis</i> , Q+BS = Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> , y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$)	74
Figura 13	Variables fisicoquímicas de calidad en frutos de chile soledad (<i>Capsicum annum</i> L.) primer corte número de lóculos (E1), grados brix (F1), porcentaje de ácido cítrico (G1) potencial de hidrogeno (H1) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro	75

tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$)

- Figura 14** Variables morfológicas de calidad en frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) segundo corte Longitud de fruto (A1), Diámetro de fruto (B1), peso de fruto en gramos (C1) y grosor de pericarpio (D1) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$) 79
- Figura 15** Variables fisicoquímicas de calidad en frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) segundo corte número de lóculos (E2), grados brix (F2), porcentaje de ácido cítrico (G2) potencial de hidrogeno (H2) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$). 80
- Figura 16** Efecto de la aplicación de los biofertilizantes en el contenido de capsaicina en el cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) primer corte (A1), segundo corte (A2) clasificados en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$). 81
- Figura 17** Triturado del exoesqueleto de camarón seco. 113
- Figura 18** Tamizado de la muestra para obtener un tamaño de partícula de 250 μm . 113
- Figura 19** Desproteínización con HCl al 0.4 M. 113
- Figura 20** Lavado con agua de la llave de la muestra después de la desproteínización. 113

Figura 21	Desacetilación de la muestra	114
Figura 22	Desmineralización con HNCI al 4 M.	114
Figura 23	Blanqueado de la muestra obtenida.	114
Figura 24	Determinación de minerales del quitosano sigma y quitosano obtenido.115	114
Figura 25	Quitosano UNPA.	115
Figura 26	Medio de cultivo de <i>Bacillus subtilis</i> .	115
Figura 27	Aplicación de los tratamientos a plántulas de chile soledad.	115
Figura 28	Bioproductos de <i>Bacillus subtilis</i> y quitosano.	115
Figura 29	Instalación del sistema de riego.	116
Figura 30	Trasplante a invernadero.	116
Figura 31	Medición de nutrientes en savia (fosfatos, nitrógeno, potasio, magnesio).	116
Figura 32	Determinación de capseicina.	116
Figura 33	Determinación de capseicina y corte de.chiles.	117
Figura 34	Secado de las muestras.	117
Figura 35	Cosechas.	118
Figura 36	Toma de datos morfológicos en plántulas	118

ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS

t ha ⁻¹	Toneladas por hectárea
BPCV	Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal
CONAPROCH	Consejo Nacional de Productores de Chile
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
DDS	Días después de la siembra
MSNM	Metros sobre el nivel del mar
AP	Agricultura protegida
C	Carbono
N	Nitrógeno
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
S	Azufre
P	Fósforo
K	Potasio
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
Na	Sodio
Si	Silicio
Fe	Hierro
Mg	Manganeso
Cu	Cobre
Zn	Zinc
Mo	Molibdeno
B	Boro
Cl	Cloro
FBNA	Fijación biológica de nitrógeno atmosférico
NH ₄	Amonio
IRS	Resistencia sistémica inducida
ABA	Ácido abscísico
ACC	1- aminociclopropano 1-carboxilasa desaminasa
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
VMA	Virus del mosaico de la alfalfa
VMT	Virus del mosaico del tabaco
SAR	Resistencia sistémica adquirida
FTIR	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier
HCL	Ácido clorhídrico
NaOH	Hidróxido de sodio
FMS	Fermentación medio solido
OH	Hidroxilo

N-H	Grupo amino
C-H	Grupo carboxilo
UFC	Unidades formadoras de colonias
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
M	Molar
RPM	Revoluciones por minuto
N	Normal
DM	Desmineralización
DP	Desproteínización
L	Longitud en cm
W	Ancho en cm
A	Área en cm ² de las hojas individuales
ATT	Acidez total titularse
% P	Porcentaje de proteínas.
%H	Porcentaje de humedad
pH	Potencial de hidrógeno
%M	Porcentaje de minerales
%DM	Porcentaje de desmineralización
T	Testigo
Q	Quitosano
Bs	<i>Bacillus subtilis</i>
Q+BS	Quitosano más <i>Bacillus subtilis</i>

RESUMEN

El cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) es uno de los más importantes en los estados de Oaxaca y Veracruz, en conjunto superan una superficie sembrada de 1700 hectáreas, presentando un rendimiento promedio de 15.88 toneladas por hectárea. A pesar de su promisoría productividad, se ve amenazado por diversos factores bióticos y abióticos como plagas y enfermedades, que pueden surgir en cualquier etapa de su ciclo de crecimiento, por lo que la calidad y el rendimiento de cosecha se ven afectados, lo que a su vez provoca pérdidas económicas significativas para los agricultores locales; En un esfuerzo por combatir estos desafíos los agricultores recurren al uso de agroquímicos, sin embargo el uso indiscriminado de los mismos presentan consecuencias adversas para el ambiente y la salud humana, por lo que se ha propiciado el uso de diversos bioestimulantes e inductores de crecimiento como el quitosano y el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV), como una alternativa segura al empleo de los mismos, ya sea para el aporte de nutrientes a los cultivos o como control y manejo de plagas y enfermedades y a su vez reducir la contaminación ambiental. El objetivo de este Proyecto fue evaluar el efecto de la aplicación individual y en conjunto de *Bacillus subtilis* y quitosano sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de fruto del cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.), bajo condiciones de invernadero; consistió en cuatro tratamientos, con 20 plantas por tratamiento, los cuales incluyeron: Q (Quitosano), BS (*Bacillus subtilis*), Q+BS (Quitosano + *Bacillus subtilis*) y T (Testigo), se aplicaron a los 0, 15, 30 y 45 días después de la siembra y a los 15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 días después del trasplante en una dosis de 15 mL por planta, aplicados a drench; Los resultados mostraron que la combinación de quitosano con *Bacillus subtilis* incrementaron la altura y diámetro del tallo a los 15, 30 y 45 DDS, por su parte en la

evaluación DDT se observó una variabilidad en los parámetros evaluados (altura de planta, diámetro del tallo, área foliar y número de brotes) en cada tratamiento resaltando la combinación de quitosano con *Bacillus subtilis* que en su mayoría aumentó el crecimiento de las variables evaluadas a lo largo del crecimiento de las plantas; respecto a las variables de rendimiento el mayor número de frutos y peso acumulado por planta se presentó con la aplicación de quitosano presentando (104.4 ± 6.02 frutos) y (246.86 ± 10.66 gramos) respectivamente, a su vez la aplicación del tratamiento combinado de quitosano con *Bacillus subtilis* mostró mejoras significativas en varios aspectos de la morfología y calidad de los frutos, como la longitud, diámetro, peso y grosor del pericarpio, destacando en particular en el número de lóculos, concentración de grados brix, porcentaje de ácido cítrico y pH, lo que resalta su efectividad en la mejora de la calidad de los frutos en comparación con los tratamientos individuales y el testigo.

Palabras clave: Rendimiento, hidrólisis, calidad, quitosano.

ABSTRACT

The cultivation of Soledad chili (*Capsicum annuum* L.) is one of the most important crops in the states of Oaxaca and Veracruz, together surpassing a planted area of over 1700 hectares, with an average yield of 8.8 tons per hectare. Despite its promising productivity, Soledad chili is threatened by various biotic and abiotic factors such as pests and diseases, which can arise at any stage of its growth cycle, affecting both the quality and yield of the harvest, thus causing significant economic losses for local farmers. In an effort to combat these challenges, farmers resort to the use of agrochemicals; however, the indiscriminate use of these chemicals has adverse consequences for the environment and human health. Therefore, the use of various biostimulants and growth inducers such as chitosan and plant growth-promoting bacteria (PGPB) has been encouraged as a safe alternative, either for providing nutrients to crops or for pest and disease control, thereby reducing environmental pollution. The objective of this project was to evaluate the effect of the individual and combined application of *Bacillus subtilis* and chitosan on the growth, yield, and fruit quality of Soledad chili (*Capsicum annuum* L.) under greenhouse conditions. A randomized complete block design with four treatments, each with 20 replications, was conducted. The treatments included: Q (Chitosan), BS (*Bacillus subtilis*), Q+BS (Chitosan + *Bacillus subtilis*), and T (Control). They were applied at 0, 15, 30, and 45 days after sowing and at 15, 30, 45, 60, 75, 90, and 105 days after transplanting at a dose of 15 mL per plant applied as drench. The results showed that the combination of chitosan with *Bacillus subtilis* increased the height and stem diameter at 15, 30, and 45 days after sowing. In the assessment at days after transplanting, variability was observed in the evaluated parameters (plant height, stem diameter, leaf area, and number of shoots) in each treatment, with the combination of chitosan

and *Bacillus subtilis* mostly increasing the growth of the variables evaluated throughout plant growth. Regarding yield variables, the highest number of fruits and accumulated weight per plant were observed with chitosan application, presenting (104.4 ± 6.02 fruits) and (246.86 ± 10.66 grams) respectively. Furthermore, the combined treatment of chitosan with *Bacillus subtilis* showed significant improvements in various aspects of fruit morphology and quality, such as length, diameter, weight, and thickness of the pericarp, particularly highlighting the number of locules, brix degree concentration, percentage of citric acid, and pH, thus emphasizing its effectiveness in improving fruit quality compared to individual treatments and the control.

Keywords: Yield, hydrolysis, quality, chitosan.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo del chile verde (*Capsicum annuum* L.) desempeña un papel significativo en el sector agroalimentario, siendo una fuente importante de ingresos y alimentos a nivel mundial. De acuerdo a los datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021), la superficie sembrada de chile verde alcanza las 2,055,311 hectáreas en todo el mundo, con una producción total que roza las 37 mil toneladas. China se destaca como el principal país productor de este cultivo, con una impresionante producción de 16.75 millones de toneladas. Por otro lado, México ocupa un destacado cuarto lugar en la producción mundial, contribuyendo con 2,584,143 toneladas en una superficie de 147,808 hectáreas, de acuerdo a datos de la misma fuente (FAO, 2021). Dentro de las variedades de chile cultivadas en México, el chile soledad, también conocido como chile serrano delgado, es objeto de interés debido a su singularidad y valor comercial. Sin embargo, la información disponible sobre esta variedad en términos de parámetros morfológicos, rendimiento y calidad del fruto en condiciones de cultivo temporal es limitada. el creciente reconocimiento del alto valor comercial y gastronómico de este fruto ha motivado a agricultores de diversas zonas a incursionar en su cultivo, sin embargo, la producción de esta hortaliza, solo se lleva a cabo en dos estados de la república mexicana: Oaxaca y Veracruz, la superficie sembrada para el 2022 fue de 1,740 hectáreas, teniendo una producción de más de 15,350 toneladas, y un rendimiento promedio de 15.88 t ha⁻¹ considerando la agricultura a cielo abierto (SIAP, 2022). En la fértil región del Papaloapan, ubicada en el estado de Oaxaca, el cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) presenta una extensión de terreno sembrado que supera las 358 hectáreas y una producción anual que alcanza las 2,305 toneladas, de acuerdo a datos proporcionados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022),

este cultivo representa no solo una fuente de sustento económico para los agricultores locales, sino también un componente vital de la identidad agrícola de la región. A pesar de su promisoría productividad, el chile soledad se ve amenazado por diversos factores bióticos, como plagas y enfermedades, que pueden surgir en cualquier etapa de su ciclo de crecimiento. Estos problemas fitosanitarios no solo afectan la calidad y la cantidad de la cosecha, sino que también provocan pérdidas económicas significativas para los agricultores locales. En un esfuerzo por combatir estos desafíos, muchos agricultores recurren al uso de agroquímicos para proteger sus cultivos. Sin embargo, el uso indiscriminado y excesivo de estos productos conlleva sus propios riesgos y consecuencias. Como la contaminación del aire, mantos acuíferos, la erosión del suelo y la acumulación de lixiviados tóxicos. En conclusión, el cultivo de chile soledad en la región del Papaloapan representa un importante motor económico y cultural para la comunidad agrícola local. Es fundamental encontrar soluciones sostenibles que minimicen los impactos negativos mientras se garantiza la viabilidad a largo plazo de esta actividad agrícola (Moreno, 2011). El uso indiscriminado de agroquímicos ha desencadenado preocupaciones sustanciales en la agricultura moderna, al permitir que los fitopatógenos, como virus, bacterias, hongos e insectos de diversos órdenes, desarrollen resistencia a estos productos (Carmo *et al.*, 2021). Esta resistencia compromete la efectividad de los agroquímicos, exacerbando los desafíos en el control de plagas y enfermedades en los cultivos. Además, la toxicidad elevada de estos productos plantea riesgos significativos para la salud humana, como evidencian diversos estudios que han vinculado su uso con enfermedades graves, incluyendo cáncer, leucemia, párkinson, asma y trastornos neuropsicológicos y cognitivos (Soares *et al.*, 2020). Ante este escenario, se han explorado alternativas más sostenibles con el medio ambiente para el manejo de cultivos. Una de estas alternativas es el uso de quitosano, que ha demostrado la capacidad de estimular

el crecimiento y el rendimiento de hortalizas al actuar como inductor en la síntesis de fitohormonas clave, como el Ácido indolacético, Ácido indol-3-butírico y Giberelinas (Silva-Garza *et al.*, 2001). El quitosano ha mostrado beneficios en la germinación, los rendimientos y la absorción de micronutrientes en cultivos como trigo, maíz, fresa, tabaco y arroz (Jiménez *et al.*, 2024). Además, las Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (BPCV) han emergido como otra alternativa efectiva, mostrando capacidades como la solubilización de fósforo y la producción de sideróforos, así como la síntesis de fitohormonas como auxinas, giberelinas, ácido abscísico y etileno (Prakash y Arora 2019). Estos avances en el conocimiento y la tecnología propician la búsqueda de estrategias de manejo agrícola que reduzcan los costos económicos y los daños ambientales, al tiempo que aumentan la productividad. Por tanto, en vista de la necesidad de implementar técnicas de producción más sustentables, esta investigación se centra en evaluar el efecto de la aplicación de biofertilizantes en el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto del cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones controladas de invernadero. Este enfoque busca generar información valiosa que pueda contribuir a la adopción de prácticas agrícolas más amigables con el medio ambiente y promotoras de la sostenibilidad en la agricultura.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PRODUCCIÓN NACIONAL DE CHILE VERDE (*Capsicum annuum* L.)

El cultivo de *Capsicum annuum* L., conocido comúnmente como chile verde, se destaca como una de las hortalizas más importantes a nivel global, gracias a su alta demanda impulsada por sus cualidades organolépticas. Esta popularidad posiciona al chile entre las siete hortalizas más cultivadas en el mundo, abarcando una extensa área cosechada que supera los 2 millones de hectáreas y generando una producción que sobrepasa los 36 mil millones de toneladas. China se destaca como el principal país productor de este cultivo, con una impresionante producción de 16.75 millones de toneladas. Por otro lado, México ocupa un destacado cuarto lugar en la producción mundial, contribuyendo con 2,584,143 toneladas en una superficie de 147,808 hectáreas, de acuerdo a datos de la misma fuente (FAO, 2021). La importancia del chile en México se refleja también en el consumo interno. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022) el consumo per cápita de chile en el país alcanzó los 17.48 kg. Los principales estados productores de chile verde en México son Chihuahua, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí, Jalisco, Sonora, Michoacán y Guanajuato, que en conjunto aportan el 85.33 % de la producción nacional, como se ilustra en la Figura 1 (SIAP, 2022). Este contexto evidencia la relevancia del chile como un cultivo fundamental tanto a nivel económico como alimentario en México, así como la necesidad de continuar impulsando prácticas agrícolas sostenibles y eficientes para satisfacer la creciente demanda nacional e internacional de este producto. Además, es relevante destacar que la producción a cielo abierto para el cultivo de chile abarcó un extenso territorio de 152,230.49 hectáreas, lo que representó el 96.2 % de la producción total en México. El restante 6,007.05 hectáreas se obtuvieron mediante el empleo de técnicas de

agricultura protegida, como la casa sombra, el macro túnel y el invernadero, según datos del SIAP para el año 2022. (Da Silva *et al*, 2021).

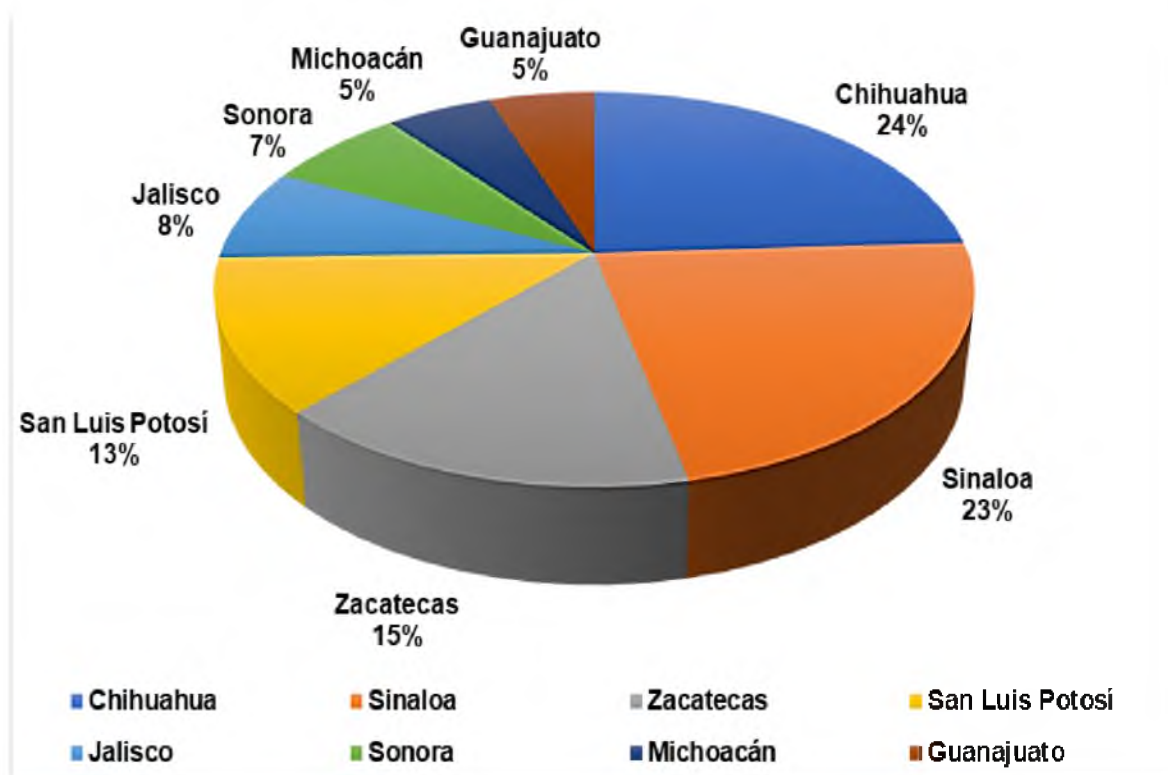


Figura 1. Principales estados productores de chile verde en México (SIAP, 2022).

Se estima que el género *Capsicum* comprende 33 especies y 10 variedades, siendo la especie *annuum* la más ampliamente distribuida en México y aquella que presenta una mayor diversidad en cuanto a semillas mejoradas, como indican (Pérez-Castañeda *et al.*, 2015). En consecuencia, todas las especies del género *Capsicum* se consideran de gran impacto para el desarrollo económico y social a nivel nacional, según la misma investigación. México se distingue por albergar una notable diversidad de *Capsicum annuum* L, entre las cuales destaca el chile soledad, también conocido como chile verde o serrano delgado. Se presume que esta variedad es originaria de la Sierra Norte de Puebla e Hidalgo, según señala un estudio realizado por (Rincón, 2010). La presencia de esta variedad emblemática no solo enriquece el patrimonio cultural y culinario de México, sino que también resalta la importancia de

conservar y valorar la diversidad genética de los cultivos autóctonos para garantizar la seguridad alimentaria y promover el desarrollo sostenible.

2.2. PRODUCCIÓN ESTATAL DE CHILE SOLEDAD

Según los datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) del año 2022, la superficie total sembrada de chile soledad en el ciclo agrícola (Otoño-Invierno + Primavera-Verano) fue de 1,852.70 hectáreas, con una producción total de 15,943.78 toneladas. Esta producción se concentra únicamente en dos estados: Oaxaca y Veracruz, con áreas sembradas de 481.70 hectáreas y 1,371.00 hectáreas, respectivamente. El rendimiento promedio obtenido en ambos estados fue de 8.82 toneladas por hectárea (Tabla 1).

Tabla 1. Producción de chile soledad a nivel nacional modalidad de temporal. (SIAP, 2022).

ESTADO	SUPERFICIE SEMBRADA (ha)	PRODUCCIÓN TONELADAS (t)	RENDIMIENTO (t ha ⁻¹)
Oaxaca	358.05	2,305.77	6.44
Veracruz	1,382.35	13,046.22	9.44
Total	1,740.40	15,351.99	8.82

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SIAP (2022).

De acuerdo con el Consejo Nacional de Productores de Chile (CONAPROCH) en el año 2019. El cultivo de chile por hectárea crea aproximadamente 220 puestos de trabajo, lo que beneficia a las familias rurales. Este cultivo es uno de los más importantes dentro de las solanáceas cultivadas en el estado de Oaxaca. Los municipios con mayor producción son San Juan Bautista Tuxtepec, Valle Nacional, Loma Bonita, Oaxaca y sus alrededores. En promedio, estos lugares alcanzan entre 5 y 7 toneladas por hectárea en condiciones de temporal, lo que destaca su importancia productiva.

Tabla 2. Producción de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) en el estado de Oaxaca 2022.

MUNICIPIO	SUPERFICIE SEMBRADA (ha)	PRODUCCIÓN (t)	RENDIMIENTO (t ha ⁻¹)
Asunción Ixtaltepec	5.00	19.00	3.80
Ayotzintepec	11.70	63.50	5.43
Loma Bonita	53.00	425.60	8.03
San Felipe Jalapa de Díaz	11.00	40.92	3.72
San Felipe Usila	2.50	8.88	3.55
San José Chiltepec	27.00	210.90	7.81
San Juan Bautista Tuxtepec	98.00	680.30	6.94
San Juan Cotzocón	20.50	142.20	6.94
San Juan Lalana	14.15	77.48	5.48
San Lucas Ojitlán	44.00	212.40	4.83
San Pedro Ixcatlán	1.80	6.39	3.55
Santa María Jacatepec	15.50	104.85	6.76
Santiago Jocotepec	24.90	117.50	4.72
Santiago Yaveo	23.00	152.00	6.61
San Juan Bautista Valle Nacional	6.00	43.85	7.31
Total	358.05	2,305.77	6.44

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SIAP (2022).

Hay que mencionar que la producción de chile soledad en el estado de Oaxaca es de 358.05 ha, la cuales se distribuyen en diversos municipios, como se muestra en la Tabla 2. El municipio que obtiene mayor rendimiento por hectárea es San José Chiltepec con 7.81 t ha⁻¹ (SIAP, 2022).

2.3. PRODUCCIÓN DE CHILE SOLEDAD EN EL ESTADO DE VERACRUZ

La Tabla 3 muestra la producción de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) en diferentes municipios del estado de Veracruz.

Tabla 3. Producción de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) en el estado de Veracruz.

MUNICIPIO	SUPERFICIE SEMBRADA (ha)	PRODUCCIÓN (t)	RENDIMIENTO (t ha ⁻¹)
Tierra Blanca	8.35	35.30	4.23
Catemaco	242.00	2,567.62	10.61
Isla	233.00	2,050.40	8.80
Juan Rodríguez Clara	211.00	1,844.14	8.74
Playa Vicente	269.00	2,636.20	9.80
San Andrés Tuxtla	24.00	238.08	9.92
José Azueta	207.00	1,771.92	8.56
Santiago Sochiapan	188.00	1,902.56	10.12
Total	1,382.35	13,046.22	9.44

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SIAP, (2022).

En contraste, el municipio de San Andrés Tuxtla tiene una superficie sembrada mucho menor, de solo 24.00 hectáreas, pero logra un rendimiento alto de 9.92 toneladas por hectárea. Esta tabla proporciona información detallada sobre la producción de chile soledad en diferentes municipios de Veracruz, destacando las diferencias en la superficie sembrada, la producción y el rendimiento entre los distintos lugares.

2.4. TAXONOMÍA Y MORFOLOGÍA DEL CHILE (*Capsicum annuum* L.)

La Tabla 4 presenta la clasificación taxonómica de la especie de planta *Capsicum annuum* L. Esta clasificación se organiza jerárquicamente, comenzando desde niveles generales hasta niveles más específicos. Comienza con el Reino Vegetal, seguido por el Subreino *Spermatophyta* (plantas con semillas), la División *Magnoliophyta* (plantas con flores), la Clase *Magnoliopsida*, la Subclase *Asteridae*, y el Orden *Solanales*. Luego, se detalla la Familia *Solanaceae*, la Subfamilia *Solanoideae*, y la Tribu *Capsiceae*. Finalmente, se especifica el Género *Capsicum* y la Especie *annuum*. La información proviene de una fuente llamada (GRIN, 2014) (Germplasm Resources Information Network).

Esta tabla proporciona una visión estructurada de la clasificación taxonómica de *Capsicum annuum* L.

Tabla 4. Clasificación taxonómica de (*Capsicum annuum* L.).

Reino	Vegetal
Subreino	Spermatophyta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Subfamilia	Solanoideae
Tribu	Capsiceae
Género	<i>Capsicum</i>
Especie	<i>annuum</i>

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de GRIN (2014).

Las plantas del género *Capsicum annuum* son de ciclo anual, con alturas que van desde los 50 a 100 cm, en algunas ocasiones sobrepasan estas medidas, posee numerosas ramas en forma recta, angulosas y en ocasiones glabro o pubescentes, provistas de hojas ovadas, acuminadas o elípticas, de dimensiones variables, presenta pedúnculos solitarios, corola blanca; Sin embargo, algunas variedades presentan manchas de color purpura. El fruto es muy variable en cuanto a su forma y tamaño, color y sabores. El Programa de Mejoramiento Genético del Campo Experimental Las Huastecas-CIRNE del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha desarrollado la variedad CHISER-522, que se compone de polinización libre de chile Soledad o serrano delgado. Esta variedad ofrece plantas vigorosas de 90 a 130 cm de altura. Se trata de un ciclo intermedio de 80 días a floración y 110 días a inicio de cosecha. Se presenta una composición de frutos de 4.7 g, de un tamaño óptimo, de una longitud promedio de 8.2 cm y diámetro de 1.1 cm, y una tonalidad altamente uniformizada. La variedad CHISER-522 tiene un rendimiento promedio de 20.5 ton/ha bajo fertiirrigación. El ámbito de uso de esta variedad es para las

zonas productoras de la región Huasteca, centro-sur de Veracruz y áreas colindantes de Oaxaca (región del Papaloapan) (INIFAP, 2019).

2.5. ETAPAS FENOLÓGICAS DEL CHILE (*Capsicum annuum* L.)

2.5.1. GERMINACIÓN

El período de pre emergencia puede ser de 8 a 12 días, cuando se presentan temperaturas altas este proceso suele prolongarse (Olivera, 2007). Se indica que la temperatura óptima para esta fase oscila entre 20 y 25 °C, mientras que las temperaturas mínimas y máximas oscilan entre 13 y 40 °C (Shen *et al.*, 2024).

2.5.2. PLÁNTULA

Esta fase se inicia a partir de la emergencia de la semilla y se prolonga hasta la etapa previa al trasplante, en este proceso se determina cuando la planta ha alcanzado una altura aproximada de 10 cm o bien cuando se encuentra presente una buena cantidad de raíces en el sustrato (cepellón). Este lapso tiene una duración entre los 40 y 45 días después de la siembra (dds), además puede prolongarse hasta los 60 dds si las condiciones ambientales no permiten el desarrollo favorable de las plántulas (Olivera, 2007).

2.5.3. CRECIMIENTO VEGETATIVO

Este período se comprende de 60 días, el cual comienza al ser trasplantada. Las temperaturas óptimas oscilan entre los 20 y 25 °C durante el día, y en la noche entre 16 y 18 °C. Se pueden presentar temperaturas máximas y mínimas de 15 y 32 °C respectivamente (Espadas, 2014).

2.5.4. FLORACIÓN Y FRUCTIFICACIÓN

Esta fase se caracteriza por una duración de 60 a 90 días tras el trasplante, puede extenderse hasta 120 días, y posteriormente, se produce flores y frutos (Espadas, 2014) indica que la temperatura óptima para lograr un desarrollo adecuado se encuentra entre los 26 y 28 °C, mientras que en la noche se encuentra entre 18 y 20 °C.

2.6. REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS

2.6.1. TEMPERATURA

Este cultivo es característico de regiones cálidas, por lo que no resiste heladas; la semilla necesita una temperatura de 21.1 a 23.9 °C para su correcta germinación (Edmond, 1988). Para cultivar y producir frutos, se requiere de climas cálidos con temperaturas entre 20 y 30° C, cuya variación puede estar entre 16 y 32 °C. Este cultivo puede desarrollarse a nivel del mar y hasta una altitud de 2500 msnm. Los suelos más adecuados son los de textura ligera, que retienen la humedad (Rincón, 2010). En la época de trasplante, la temperatura mínima debe estar por encima de los 15 °C, mientras que el óptimo debe estar sobre los 18 a 20 °C (Rincón, 2010).

2.6.2. REQUERIMIENTO HÍDRICO

No se requiere riego en condiciones de lluvias. En zonas áridas y semiáridas es necesario realizarla para mantener una humedad adecuada en el suelo. Así mismo, son sensibles al estrés hídrico durante su fase de floración y fructificación (Bosland y Votava 2012).

2.6.3. HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa ideal para el crecimiento óptimo del chile serrano oscila entre el 50% y el 70%, especialmente durante el proceso de floración y amarre de fruto. Este rango de humedad relativa es crucial para un desarrollo óptimo en las etapas iniciales. Sin embargo, señala que niveles más altos de humedad relativa pueden ocasionar problemas relacionados con enfermedades. Por ejemplo, una humedad relativa baja combinada con temperaturas elevadas puede resultar en una excesiva transpiración, lo que eventualmente conduce a la caída de la flor (Thuy y Kenji 2015).

2.6.4. LUMINOSIDAD

Capsicum annuum tiende a comportarse como una planta de día corto, aunque hay algunas especies que son indiferentes a la duración del día. Se reconoce que, en general, las plantas suelen preferir un fotoperiodo intermedio. Es importante destacar que *Capsicum annuum* es altamente exigente en cuanto a luminosidad, especialmente durante sus primeras etapas de desarrollo y durante la fase de floración (Thuy y Kenji 2015).

2.6.5. ÉPOCA DE SIEMBRA

En condiciones de temporal se cultiva en los meses de agosto-marzo en los estados de Puebla, Veracruz y Oaxaca y para su siembra solo se utiliza semilla criolla (Corrales-Rodríguez, 2019). Sin embargo, la siembra se puede realizar en cualquier época del año bajo un sistema de agricultura protegida. La mayor superficie se cultiva en condiciones de campo abierto; Sin embargo, cuando se tienen problemas físicos como una alta pedregosidad, suelos muy someros o mal drenaje, se recurre a la producción de sustrato y utilización de agriculturas

protegidas para ofrecer al cultivo un manejo más puntual de nutrición vegetal, y de esta manera poder controlar algunos factores del medio ambiente.

2.7. AGRICULTURA PROTEGIDA

La agricultura protegida (AP) es un sistema de producción realizado bajo diversas estructuras, para proteger cultivos, y minimizar efectos de los fenómenos climáticos (Moreno, 2011). Por tanto, permite modificar el ambiente natural en el que se desarrollan los cultivos con el propósito de alcanzar un crecimiento óptimo y con ello, un alto rendimiento. Se establece que la AP ha modificado las formas de producir alimentos y generado múltiples ventajas para los productores, principalmente el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, menos probabilidad de plagas y enfermedades, con mejores rendimientos en menor espacio y con un mejor precio en los mercados, generando un mejor ingreso para los productores (Moreno, 2011). La agricultura protegida puede ser la casa sombra o malla sombra, invernaderos, macro túneles, micro túneles, cada uno tiene diferentes características, pero con un mismo fin (López-Valenzuela *et al.*, 2011).

2.7.1. CASA SOMBRA Y MALLA SOMBRA

La casa sombra y la malla sombra son dos elementos que se emplean para disminuir la cantidad de energía radiante que llega a los cultivos. Las mallas no sólo se utilizan como elemento de sombreo, sino que se emplean en las ventanas de los invernaderos con el objetivo de impedir la entrada de insectos y reducir el uso de pesticidas (López-Valenzuela *et al.*, 2011). Por otra parte, las mallas empleadas para cubrir completamente estructuras de invernaderos o estructuras tipo cobertizos, conocidas comercialmente como casas sombra, consisten en una tela tejida de plásticos con entramados de cuadros de diferentes tamaños

que sirve como cubierta protectora que regula la cantidad de luz que llega a las plantas y proteger los efectos del granizo, insectos, aves y roedores (López-Valenzuela *et al.*, 2011).

2.7.2. MACRO TÚNEL O TÚNEL ALTO

Son estructuras que no tienen las características apropiadas en ancho y altura al canal para ser consideradas invernaderos, sus características de medición son de 4 a 5 metros de ancho y de 2 a 3 metros de alto; Ideales para semilleros o almácigos de especies hortícolas (Juárez-López *et al.*, 2011).

2.7.3. MICRO TÚNEL O TÚNEL BAJO

Son estructuras pequeñas construidas con arcos sobre los que se colocan cubiertas de plásticos, por sus reducidas dimensiones no es posible que las personas trabajen en su interior por lo que las labores se realizan desde el exterior (Juárez-López *et al.*, 2011). La función de los túneles es minimizar los efectos perjudiciales de las bajas temperaturas sin recurrir a estructuras costosas y en algunos cultivos su empleo se limita a la primera parte del ciclo (Juárez-López *et al.*, 2011).

2.7.4. INVERNADEROS

Un invernadero es una infraestructura agrícola diseñada con una cubierta traslúcida que tiene como objetivo principal reproducir o simular condiciones climáticas óptimas para el crecimiento y desarrollo de los cultivos que alberga, independientemente de las condiciones exteriores. Esto permite una modificación y control más eficaces de los principales factores ambientales que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los invernaderos suelen tener una altura mínima de dos metros, con anchos superiores a seis metros y

longitudes variables. Debido a su tamaño, proporcionan un entorno adecuado para llevar a cabo todas las labores y actividades necesarias para el cultivo. Además, el uso de estas estructuras facilita la nutrición de las plantas mediante técnicas como la fertirrigación, que implica la adición de fertilizantes al agua de riego para su absorción por las plantas (Juárez-López *et al.*, 2011).

2.8. NUTRICIÓN EN EL CULTIVO DE CHILE

Las plantas requieren de nutrientes vegetales fundamentales para su adecuado crecimiento y desarrollo, los cuales pueden clasificarse en macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes incluyen elementos como carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno (H), oxígeno (O), azufre (S), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y silicio (Si), mientras que los micronutrientes abarcan hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo), boro (B) y cloro (Cl). Las plantas requieren cantidades relativamente mayores de macronutrientes, como se observa en el caso del nitrógeno, cuyo contenido en los tejidos vegetales supera significativamente al del micronutriente zinc. Cada nutriente desempeña diversas funciones en la fisiología de la planta. Por ejemplo, el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre son componentes del material orgánico, pero también participan en procesos inorgánicos. El carbono y oxígeno se utilizan principalmente como componentes de grupos carboxílicos, mientras que el hidrógeno y oxígeno participan en procesos de óxido-reducción, y el nitrógeno y azufre se encuentran en forma de grupos NH_2 -NH y grupos SH, respectivamente. Por lo tanto, son reactivos en procesos bioquímicos fundamentales. La fertirrigación es una técnica eficiente para aplicar nutrientes, consistente en la aplicación de fertilizantes a través del agua de riego. Esto presenta varias ventajas, incluida la capacidad de ajustar continuamente la dosis de nutrientes a las necesidades del

cultivo, las características del suelo o sustrato, el agua de riego y las condiciones ambientales. Así, un manejo adecuado de la fertirrigación permite alcanzar un estado nutricional óptimo del cultivo, maximizando su productividad y calidad, mientras se minimizan las pérdidas de fertilizantes, generalmente por lixiviación. Esta tecnología permite optimizar el uso de fertilizantes, ya que, según (González, 2019), las plantas solo absorben entre el 30 % y el 50 % de los fertilizantes químicos, mientras que el resto se pierde en el suelo. Otras tácticas para mejorar la productividad de los cultivos incluyen el uso de microorganismos beneficiosos o biofertilizantes, que pueden ser una alternativa relevante para reducir el uso de fertilizantes minerales. Estos microorganismos desempeñan múltiples roles, como estimular la germinación de semillas y el enraizamiento mediante la producción de reguladores de crecimiento, vitaminas y otras sustancias. También contribuyen al suministro de nutrientes mediante acciones como la fijación de nitrógeno, la solubilización de elementos minerales y la mineralización de compuestos orgánicos. Además, mejoran la estructura del suelo al formar agregados estables y pueden actuar como antagonistas microbianos, eliminando productos químicos nocivos como pesticidas, herbicidas y fungicidas. Estos microorganismos son considerados una de las contribuciones más significativas de la biotecnología y la microbiología en la agricultura actual, y juegan un papel fundamental en la promoción de la sustentabilidad y productividad agrícola, reduciendo los costos de insumos sintéticos y la contaminación ambiental, lo que contribuye a la sustentabilidad de la agricultura (Mohammadi y Sohrabi, 2012).

2.9. BIOFERTILIZANTES EN LA AGRICULTURA

Los biofertilizantes son preparados de microorganismos aplicados al suelo y/o planta con el fin de sustituir parcial o totalmente la fertilización sintética, así como disminuir la

contaminación generada por los agroquímicos; se encuentran clasificados en dos categorías: El primer grupo incluye microorganismos que tienen la capacidad de sintetizar sustancias que promueven el crecimiento de la planta, fijando nitrógeno atmosférico, solubilizando hierro y fósforo inorgánico y mejorando la tolerancia al estrés por sequía, salinidad, metales tóxicos y exceso de pesticidas, por parte de la planta (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2010). El segundo grupo incluye microorganismos los cuales son capaces de disminuir o prevenir los efectos de deterioro de microorganismos patógenos (Lucy y Glick 2004).

2.9.1. MICROORGANISMOS UTILIZADOS COMO BIOFERTILIZANTES

Los microorganismos utilizados como biofertilizantes son aquellos que participan en la fijación biológica de nitrógeno atmosférico (FBNA), que implica la reducción enzimática del nitrógeno (N_2) a amonio (NH_4). Como menciona (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2010). Estos microorganismos se clasifican en dos grupos distintos. El primer grupo comprende microorganismos como bacterias, hongos y algas, que fijan nitrógeno en forma no simbiótica o de vida libre. Entre los géneros más estudiados se incluyen *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Beijerinckia* y *Klebsiella*. En el segundo grupo se encuentran microorganismos que fijan nitrógeno de manera simbiótica con plantas leguminosas y no leguminosas, y además proporcionan fósforo a las plantas a través de una asociación simbiótica. Estos microorganismos, al suministrar un nicho ecológico y la fuente de carbono necesaria para el desarrollo del hongo, promueven la captación de nutrientes minerales del suelo, especialmente fósforo (Alloush *et al.*, 2000). Se sabe que la disponibilidad de fósforo para las plantas está influenciada por los microorganismos presentes en la rizosfera, la mayoría de los cuales tienen la capacidad de degradar sustratos de fósforo orgánico (Alloush *et al.*, 2000). Dentro de estos microorganismos solubilizadores de nutrientes se encuentran *Bacillus*

subtilis, *Bacillus circulans* y *Bacillus polymyxa*, lo que aumenta la disponibilidad de fósforo en la rizosfera para beneficio de las plantas (Bashan y Ferrera 1996). Estos microorganismos también se consideran bacterias promotoras del crecimiento vegetal (BPCV) debido a sus múltiples funciones.

2.9.2. BACTERIAS PROMOTORAS DE CRECIMIENTO VEGETAL (BPCV)

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal se encuentran en la rizosfera de la planta, representan alrededor del 2 al 5 % de las bacterias rizosferas (Jha y Saraf 2015), poseen la capacidad de sintetizar sustancias reguladoras del crecimiento o fitohormonas como las auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido indol acético, etileno y ácido (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2010). Dentro de las diversas funciones que presentan se encuentra la habilidad de colonizar activamente el sistema radicular con el fin de propiciar u optimizar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Berendsen y Pieterse 2012). Asimismo, contribuyen al control biológico de patógenos y microorganismos nocivos, mediante la producción de antibióticos, enzimas líticas, cianuro de hidrógeno y sideróforos, o mediante la competencia por nutrientes y espacio, lo que produce un mejor crecimiento y rendimiento en los cultivos (Ahemad y Khan 2010). Dentro de los géneros bacterianos que se consideran BPCV se encuentran los siguientes *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Caulobacter*, *Chromobacterium*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Micrococcous*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Serratia* (Ahemad y Khan 2010). El género *Bacillus* comprende microorganismos bacilos Gram positivos, anaerobios facultativos, pueden vivir en diversos ambientes, como suelo, agua, aire y residuos de plantas en descomposición y presentan gran capacidad de producir sustancias antibióticas (Checinska *et al.*, 2015).

2.9.3. EL GÉNERO BACILLUS

El género *Bacillus* presentan múltiples aplicaciones, de las cuales se encuentran la colonización de raíces de plantas, con el fin de evitar diversos hongos patógenos, gracias a la producción de sustancias antibióticas como la iturina (Moreno-Velandia *et al.*, 2018). Asimismo, se pueden identificar como biopesticidas, debido a su capacidad para controlar plagas de mosquitos y larvas (Poopathi y Archana 2012). Es factible destacar que este género exhibe una actividad antagonista contra diversos microorganismos fitopatógenos de diversos cultivos, tales como maíz, arroz, frutales, entre otros (Li *et al.*, 2007). Esto se debe a que pueden realizar diversos mecanismos, como la excreción de antibióticos, la producción de sideróforos y enzimas líticas (Layton, 2011). A su vez presentan la capacidad de producir toxinas que provocan la resistencia sistémica de la planta (IRS). (Tejera-Hernández *et al.*, 2011). En el presente género se encuentra *Bacillus subtilis*, una bacteria Gram positiva que se utiliza en la agricultura como promotora del crecimiento vegetal y como alternativa de control biológico, debido a su capacidad de presentar múltiples mecanismos (Villarreal-Delgado *et al.*, 2018).

2.9.4. *Bacillus subtilis*

Presentan la capacidad de producir endosporas, las cuales resisten a altas temperaturas, por lo que viven en rangos de 55 a 70 °C, resistentes a la desecación, la radiación, los ácidos y los desinfectantes químicos, y puede soportar un pH hasta de 2 a 3 (Lisboa, 2003). A su vez producen enzimas hidrofílicas extracelulares que descomponen polisacáridos, ácidos nucleicos y lípidos, lo que permite que el organismo utilice estos productos como fuente de energía (Sierra, 2008). Presentan subtilina y otros antibióticos de la familia de las iturinas

que son utilizados industrialmente como insecticida y fungicida, ya que actúa sobre la pared celular de hongos (Lisboa, 2003). *Bacillus subtilis* puede actuar de forma directa o indirecta; en el proceso directo, la bacteria puede fijar el nitrógeno, solubilizar minerales como el fósforo y producir hormonas que regulan el crecimiento vegetal. Por otro lado, la forma indirecta de promoción del crecimiento vegetal está relacionada con la producción de sustancias que actúan como antagonistas de patógenos o induciendo resistencia en las mismas (Tejera-Hernández *et al.*, 2011). Es importante destacar que también pueden tener una conexión con la regulación de las hormonas del estrés y enzimas, tales como el etileno, el ácido abscísico (ABA), la 1-aminociclopropano 1-carboxilasa (ACC) desaminasa (Ramakrishna *et al.*, 2020). Así mismo, estudios han demostrado que interactúa en el metabolismo del 2-etilhexanol, el tetrahidrofuran-3-ol y la 2-heptanona, pertenecientes a alcoholes, cetonas, furanos, terpenos y compuestos de azufre, que provocan el crecimiento de las plantas mediante la interacción con múltiples compuestos (Jiang *et al.*, 2019). Es importante señalar que la producción de auxinas induce un desarrollo radical (Garay-Arroyo *et al.*, 2014). Asimismo, contribuye a la formación de fosfatos y la enzima ACC desaminasa, la cual degrada al precursor del etileno, con el objetivo de disminuir el estrés biótico y biótico (Esquivel-Cote *et al.*, 2013). Sin duda, la búsqueda de biofertilizantes o sustancias menos agresivas con el medio ambiente ha requerido asegurar que los diversos agroquímicos utilizados como biocidas, estimuladores de crecimiento, fertilizantes, etc. produzcan efectos perjudiciales como la inducción de resistencia en patógenos o problemas a los humanos. Se ha mencionado previamente el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal, no obstante, existen otras sustancias que se han ido descubriendo con el transcurso del tiempo, tales como los biopolímeros de origen natural, como el quitosano, que han adquirido una alternativa prometedora para la agricultura (Esquivel-Cote *et al.*, 2013).

2.10. QUITOSANO

El quitosano es un polisacárido derivado de la quitina, el segundo polisacárido más común en la naturaleza. Este compuesto se caracteriza por ser un copolímero lineal que consiste principalmente en residuos de D-glucosamina, con una menor proporción de N-acetil D-glucosamina. Estas unidades están dispuestas de manera aleatoria y unidas por enlaces β 1,4. Según la definición de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), el quitosano se compone de 2 amino 2 desoxi-D-glucopiranososa (D-glucosamina GlcN) y 2 acetamida-2 desoxi-D glucopiranososa (N-acetil glucosamina) (Shen *et al.*, 2024) Tanto la composición como el orden de estas unidades son fundamentales para determinar las propiedades físico-químicas y biológicas del quitosano. Este polímero exhibe un contenido de nitrógeno (N) superior al 7% y presenta una distribución regular de grupos amino libres. Estos grupos pueden protonarse en presencia de ciertos ácidos, adquiriendo una carga positiva, lo que confiere al quitosano un carácter policationico. Esta característica es crucial para entender su interacción con sustancias cargadas negativamente, como lípidos, proteínas y colorantes, además de su capacidad como floculante, adherente y adsorbente, además de sus propiedades típicas como aminas (Barleany *et al.*, 2016). Esto se ilustra en la Figura 2.

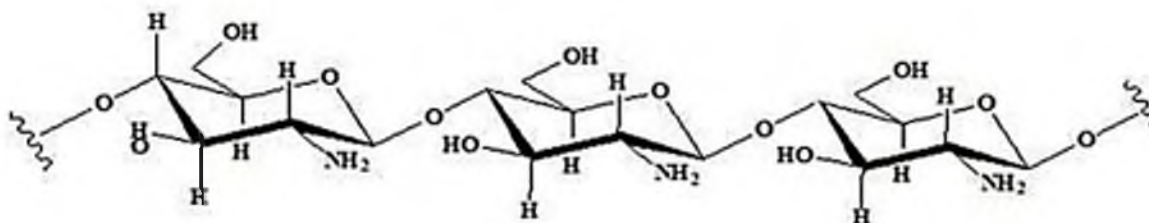


Figura 2. Estructura molecular del quitosano.

Como señala Xiong *et al.*, (2019), el quitosano exhibe propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad y baja toxicidad. La quitina con más del 50% de desacetilación debe ser considerada quitosano. De hecho, algunos investigadores lo definen como tal cuando su grado de desacetilación oscila entre el 60% y el 98%. Sin embargo, también se ha informado que, para alcanzar una mayor actividad biológica, el contenido de acetilos debe situarse alrededor del 40 %. (Hidaka *et al.*, 2024).

2.10.1. PROPIEDADES DEL QUITOSANO EN LA AGRICULTURA

El uso del quitosano en la agricultura es reciente, no obstante, existen unos mecanismos descritos que explican de manera específica algunas de sus aplicaciones en el área, tales como propiedades antimicrobianas, fungicidas, promotor de crecimiento, entre otros que se mencionarán a continuación.

2.10.2. PROPIEDADES ANTIMICROBIANAS Y BACTERICIDAS DEL QUITOSANO

El quitosano tiene una gran capacidad para combatir bacterias (Gram positivas y Gram negativas), hongos filamentosos y levaduras (Kong *et al.*, 2010). Asimismo, su nivel de desacetilación tiene un impacto en este proceso, como los factores microbianos, los factores intrínsecos del quitosano, el estado físico y los factores ambientales (Giraldo, 2015). Además, se proponen algunos métodos para explicar la acción bactericida del quitosano: La carga positiva del quitosano está relacionada con la carga negativa de la membrana celular de bacterias como *Echerichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus typhimurium*, entre otras. Esta interacción se puede llamar interacción electrostática, que se ha demostrado que afecta las propiedades de barrera de la membrana externa de las bacterias (Helander *et al.*, 2001). En consecuencia, la formación del complejo polielectrolito impide físicamente la

membrana celular externa, obstaculizando el flujo normal de nutrientes y desechos, lo que provoca la muerte bacteriana (Chung *et al.*, 2004). En bacterias Gram positivas, tales como *S. aureus* y *Bacillus cereus*, que carecen de cargas negativas en la membrana celular, el quitosano ha experimentado una actividad mayor (Helander *et al.*, 2001). En la actualidad, se ha planteado la posibilidad de que la membrana celular de estos microorganismos posea poros suficientemente grandes para permitir que el quitosano acceda al interior de las células y altere las funciones vitales (Li *et al.*, 2007).

2.10.3. ACTIVIDAD FUNGICIDA DEL QUITOSANO

Se ha demostrado que inhibe especies de hongos, exceptuando, o siendo menos efectivo con aquellos que lo poseen en sus paredes celulares, por dos razones: (a) la presencia natural de quitosano en las paredes celulares no genera efectos adversos para el microorganismo y (b) las interacciones electrostáticas del quitosano añadido (exógeno), cargado positivamente, deberían verse menos favorecidas con paredes celulares que poseen quitosano endógeno que cuando éstas poseen material con cargas negativas (Li *et al.*, 2007). De la misma manera existen evidencias de que la sensibilidad de los hongos patógenos hacia el quitosano puede cambiar en los diferentes estadios de su desarrollo y que presentan una relación directa entre la actividad fungicida y el peso molecular del quitosano (Li *et al.*, 2007). De igual modo, la actividad fungicida del quitosano se ha asociado desde hace mucho a su carácter catiónico. La interacción de los grupos amino libres, cargados positivamente en medio ácido, con los residuos negativos de las macromoléculas expuestas en la pared de los hongos, cambian la permeabilidad de la membrana plasmática, con la consecuente alteración de sus principales funciones (Benhamou, 1992). Otras posibles explicaciones de la actividad fungicida del

quitosano se relacionan con la inhibición de la síntesis de algunas enzimas presentes en los hongos (Li *et al.*, 2007).

2.10.4. ACTIVIDAD ANTIVIRAL DEL QUITOSANO

Estudios recientes han demostrado que la aplicación de quitosano en enfermedades de plantas provocadas por virus y viroides ha disminuido o combatido en algunos vegetales como el virus del mosaico de la alfalfa (VMA) en hojas de frijoles, el virus de la necrosis del tabaco, virus del mosaico del tabaco (VMT), virus del no crecimiento del maní, virus del mosaico del pepino y el virus X de la papa (Pospieszny, Chirkov y Atabekov 1991). Autores describen que esto depende de la combinación virus/hospedante, la concentración de quitosano aplicado y la forma de aplicación, también que la mayor protección ocurre en las partes tratadas con quitosano, pero el efecto protector también puede apreciarse en otras partes no tratadas de las plantas que reciben el tratamiento (efecto sistémico) (Pospieszny, Chirkov y Atabekov 1991).

2.10.5. ESTIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL QUITOSANO

Los bioestimulantes son una variedad de productos que contienen principios activos, que actúan sobre la fisiología de las plantas aumentando su desarrollo y mejoran su productividad en la calidad del fruto, contribuyendo a mejorar la resistencia de las especies vegetales, ante diversas enfermedades, lo cual está estrechamente relacionado con la inducción de resistencia sistemática al ataque de microorganismos (Zerpa, Rincón y Colina 2017). Estudios han demostrado que el quitosano produce un aumento del desarrollo del sistema radicular y fortalecimiento del vigor y grado de lignificación de las plantas mediante el mecanismo SAR (Resistencia Sistémica Adquirida) (Zerpa, Rincón y Colina 2017). En general la eficiencia

de efecto bioestimulante del quitosano se debe a su composición y característica de este polímero, una vez que la planta tiene contacto con este compuesto siente que está en presencia de algún hongo patógeno, e inmediatamente empieza a desarrollar mecanismos de defensas, esto colateralmente produce un aumento significativo en la raíz, permitiéndole absorber más nutrientes, produciendo un fortalecimiento y mayor vigor en ellas (Zerpa, Rincón y Colina 2017).

2.10.6. INDUCCIÓN DE RESISTENCIA DEL QUITOSANO

Diferentes derivados del quitosano han sido implicados en la inducción de la resistencia al ataque de insectos y patógenos, principalmente a través de la vía del jasmonato, que está también implicado en la respuesta a estrés hídrico (Munemasa *et al.*, 2007). Las sustancias que se ven favorecidas por la presencia de quitosano son las proteínas relacionadas a la patogénesis, Inhibidores proteicos, ligninas, por lo que se ha propuesto que esta sensibilización ocurre porque su presencia estimula mecanismos de defensa como por ejemplo la producción de quitinasas y glucanasas (Munemasa *et al.*, 2007). Se piensa que la actividad del quitosano como inductor reside en sus regiones acetiladas, por tanto esto depende del grado de desacetilación que esté presente; sin embargo, es importante resaltar que en algunos casos la capacidad inductora del quitosano no sólo puede ser aprovechada para proteger la planta, sino que para incrementar el rendimiento de alguna sustancia comercialmente importante, como algunos metabolitos secundarios en los casos del aceite esencial d-limoneno en algunos cítricos y el mentol en la menta (Lockwood *et al.*, 2007).

3. ANTECEDENTES

3.1. OBTENCIÓN DE QUITOSANO A PARTIR DE EXOESQUELETOS DE CAMARÓN

Investigaciones como la de González y Silva, (2023) quienes realizaron la obtención de quitosano en exoesqueletos de camarón mediante hidrólisis química (ácida y alcalina), el quitosano obtenido se caracterizó mediante espectroscopía IR con transformada de Fourier, cuyos resultados fueron en rendimiento un 61 % y un peso molecular viscosimétrico de 6.29×10^5 g/mol, para el grado de desacetilación fue del 84.20 % (González y Silva, 2023). El aislamiento de quitina en la presente investigación permitió obtener quitosano a partir del exoesqueleto de camarón café (*Farfantepenaeus californiensis*), recolectado del golfo de California; mediante el proceso de hidrólisis ácida y alcalina, purificándolo con filtros de membrana. Según la metodología seguida, obtuvieron un rendimiento del 33 % y 23 % (base seca) de quitina y quitosano, respectivamente, que se caracterizó por espectroscopía FTIR y análisis termogravimétrico. Asimismo, determinaron el grado de acetilación del 15.87 %, que fue estimado mediante H-RMN (Martínez-Robinson *et al.*, 2022). A su vez (López-Corona *et al.*, 2019). Obtuvo quitosano mediante hidrólisis química, utilizando HCl 0.6 N y NaOH al 1 y al 50 %, donde al final de la investigación obtuvieron un rendimiento del 52.5 %. De igual manera (Amador-Mendoza *et al.*, 2016). Examinaron las consecuencias de tres técnicas químicas (hidrólisis alcalina-ácida), biológico o fermentación en medio sólido (FMS) y física (ultra sonicación) en exoesqueletos de Chapulín y camarón para la recuperación de quitina. Se llevó a cabo una evaluación del porcentaje de desmineralización, desproteinización y cambio de tonalidad. Los resultados obtenidos revelaron que la hidrólisis alcalina-ácida tuvo un efecto de 98.19 y 96.75 % de desproteinización, mientras que 98.91 y 92.66 % de

desmineralización en camarón y chapulín. En una investigación similar se procedió a la obtención de quitosano de exoesqueleto de camarón mediante la hidrólisis química, empleando NaOH al 50 % a 115 °C y HCl 2 M. donde se caracterizó el quitosano mediante la utilización de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), y su peso molecular a partir de la viscosidad intrínseca. Como resultado, se pudo constatar la presencia de grupos funcionales característicos de la molécula de quitosano. OH a 3500 cm⁻¹, N-H a 3220 cm⁻¹, C-H a 2877 cm⁻¹, C-O-C a 1153 cm⁻¹, grupo piranósico a 1065 cm⁻¹ y grupo amino a 1645 y 1430 cm⁻¹ (Pérez-Cordero *et al.*, 2014).

3.2. APLICACIÓN DE *Bacillus subtilis* EN *Capsicum annuum*

Se llevó a cabo una evaluación del efecto de la aplicación de *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y un consorcio microbiano en las características agronómicas de chile (*Capsicum annuum*). El experimento se realizó en condiciones de invernadero, mediante un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Según los resultados, se determinó que la aplicación de *B. subtilis* aumentó significativamente la altura de plantas en comparación con el testigo, así como la aplicación de *B. subtilis* y *T. harzianum* aumentó el volumen de raíz; a su vez, se observaron diferencias estadísticas en los contenidos de lípidos y proteínas en el fruto de plantas biofertilizadas con *T. harzianum* (Gamboa-Angulo *et al.*, 2020).

Se llevó a cabo una evaluación agronómica del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación individual y en conjunto de *Bacillus subtilis* y lombricomposta en invernadero, donde se empleó un diseño completamente al azar con 15 repeticiones por cada tratamiento. T1 = plantas con fertilizante químico; T2 = *B. subtilis*; T3 = *B. subtilis* + fertilizante químico; T4, T5 y T6 = 280, 380 y 570 g de lombricomposta, respectivamente; T7, T8 y T9 = *B.*

subtilis + 280, 380 y 570 g de lombricomposta, respectivamente; a los 90 días después de la siembra, se evaluó la altura, el diámetro del tallo, el número de hojas, los botones, el área foliar, la producción de fruto y la población bacteriana (UFC). Dentro de esto, se encontró que las plantas de Chile dulce con la dosis más elevada de lombricomposta (570 g) más *B. subtilis* experimentaron los incrementos más significativos en todas las variables evaluadas, superando de manera significativa a las plantas que llevaban a cabo fertilizantes químicos (Lara-Capistrán *et al.*, 2020). Se extrajeron bacterias nativas de *Bacillus* en plantas de *Capsicum annuum* (Jalapeño) recolectadas en el estado de Yucatán, dentro de las cuales identificaron a *Bacillus subtilis*. Se evaluó el porcentaje de germinación y las variables de crecimiento mediante la suspensión bacteriana de 1×10^{-8} UFC/mL. En el transcurso de este análisis, se ha constatado que *Bacillus subtilis* experimentó un incremento en el diámetro del tallo y volumen de la raíz, el número de yemas florales, la longitud de la raíz y el área foliar en comparación con el tratamiento químico y testigo. Por consiguiente, se ha concluido que *Bacillus subtilis* puede ser empleado para incrementar la biomasa en *Capsicum annuum* (Peña-Yam *et al.*, 2016).

3.3. APLICACIÓN DE QUITOSANO EN CULTIVOS

En la actualidad, la información relevante acerca del empleo del quitosano en la agricultura, particularmente en cultivos de la familia solanáceas, es escasa. Se detallan a continuación algunos estudios recientes. (Reyes-Perez *et al.*, 2021). Evaluaron el comportamiento de la emergencia y características agronómicas del *Cucumis sativus* a la aplicación de quitosano (3 g L^{-1}), *Glomus cubense* (20 esporas/100 g de suelo), y ácidos húmicos (1:30 v/v) Los resultados mostraron que la variedad Racer registró el mayor porcentaje de emergencia, en la aplicación del hongo *Glomus cubense* teniendo (71.7%). Mientras el *Glomus cubense* en

la variedad Inivit mostró la mayor biomasa fresca (22.6 g). En tanto que el quitosano (285.8 g) y el *Glomus cubense* (277.9 g) influyeron en el peso del fruto. A su vez el quitosano en la variedad *Inivit* generó el mayor rendimiento (5,703 kg ha⁻¹). En general la aplicación de quitosano en ambas variedades generó mayor rendimiento, otro estudio similar en donde se llevó a cabo un análisis de la aplicación de quitosano, ácidos húmicos y hongos micorrícicos donde se examinó la influencia del crecimiento y desarrollo de pimiento en condiciones protegidas, empleando variedades Magaly y Lycal. Además, se hizo hincapié en la aplicación de bioestimulantes: ácidos húmicos (1:30 v/v), quitosano (3 g L⁻¹ de agua) y hongos micorrícicos (20 g de esporas mL⁻¹). En el transcurso de este estudio se observó que los tres bioactivos estudiados incrementaron entre 11.66 y 16.67% la germinación de las semillas, mientras que la emergencia fue potenciada por los ácidos húmicos y quitosano (Reyes-Perez *et al.*, 2021). De igual manera (Rivas-García *et al.*, 2021), llevó a cabo una evaluación agronómica de dos variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) ESEN y L-43, en la cual se valoró el efecto individual y combinado de la aplicación de quitosano mediante la imbibición de semilla y vía foliar al inicio de floración. Los resultados mostraron que, al usar quitosano en las semillas al inicio de la floración, usando dosis de 1 g L⁻¹ y 300 Mg ha⁻¹ estimuló las variables evaluadas asociadas al rendimiento, incrementando éste, hasta 60.9 Mg ha⁻¹ en la variedad ESEN y hasta 27 Mg ha⁻¹ en la variedad L-43, lo que representa un 28.5 y 25 % de incremento respectivamente, al compararlo con el tratamiento control. Con tales conclusiones se constató que el quitosano como bioestimulante empleado como tratamiento conjunto durante la imbibición de semilla y vía foliar al inicio de la floración tuvo efectos significativos; También el estudio de la aplicación de quitosano en la emergencia, el crecimiento y el rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero evaluó el efecto de la aplicación de quitosano en dosis de

1, 2 y 3 g L⁻¹. Los resultados obtenidos revelaron que la dosis de 2 g L⁻¹ fue la que evidenció los valores más elevados la emergencia y desarrollo de las plantas de tomate, así como en el aumento del peso de frutos y en el rendimiento en la variedad Floradade. (Reyes-Pérez *et al.*, 2020). Otro aspecto evaluado fue un análisis que examinó la aplicación del quitosano en plántulas de tomate, el experimento se desarrolló en condiciones de malla sombra, con control de temperatura y humedad relativa donde se emplearon ocho tratamientos que resultaron de la combinación de los cultivos de tomate; Pomodoro y Floradade con tres dosis de quitosano (1, 2 y 3 g L⁻¹, evaluó el crecimiento y desarrollo de los cultivos, monitoreo la masa fresca y seca del tallo, la masa fresca y seca de las hojas, la masa fresca de la raíz, el diámetro y longitud del tallo, así como la concentración de N, P y K, en la parte foliar de la planta. Todas las dosis de quitosano provocaron un mayor efecto estimulante que el control en la mayoría de las variables evaluadas para ambos cultivares siendo 1 y 2 g·L⁻¹ las mejores. (Reyes-Pérez, *et al.*, 2019).

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo del chile soledad (*Capsicum annuum* L.) en la región del Papaloapan es importante, sin embargo, el cultivo a lo largo de su crecimiento y desarrollo es propicio de presentar plagas y enfermedades que pueden ser provocados por diversos factores bióticos y abióticos que generan consecuencias que van desde la pérdida del fruto, hasta bajos rendimientos, impactando negativamente la producción agrícola. Una de las respuestas más comunes a estos desafíos son los agroquímicos y plaguicidas, que, si bien pueden controlar las plagas y enfermedades, también tienen consecuencias ambientales graves. La aplicación intensiva de estos productos puede contaminar los acuíferos, la atmósfera y el suelo, afectando la biodiversidad al eliminar, insectos que pueden ser polinizadores y animales que pueden ser controladores de plagas, entre otras asociaciones benéficas en la región. Además, la persistencia de estos químicos en el ambiente plantea riesgos para la salud humana a largo plazo, debido a su capacidad de acumularse en los tejidos y organismos. La resistencia que desarrollan los fitopatógenos frente a estos agroquímicos es otra preocupación importante. Con el tiempo, estos organismos pueden volverse menos sensibles a los tratamientos convencionales, lo que obliga a los agricultores a buscar soluciones más costosas y menos sostenibles. El aumento en los costos de producción es una realidad palpable para los productores de chile soledad. No solo enfrentan el gasto creciente en agroquímicos cada año, sino que también deben lidiar con la baja rentabilidad debido a la pérdida de cosechas y la necesidad de utilizar más productos para mantener la productividad. Este panorama afecta de manera desproporcionada a los pequeños productores de la región del Papaloapan. Con recursos limitados, tienen dificultades para acceder a las soluciones químicas más avanzadas y costosas, lo que pone en riesgo su sustento y la estabilidad económica de sus familias.

Frente a estos desafíos, se necesitan enfoques más sostenibles y menos dañinos para el medio ambiente. Estrategias como la agricultura orgánica, el uso de métodos biológicos de control de plagas y enfermedades y la rotación de cultivos pueden ofrecer alternativas viables y menos perjudiciales tanto para el entorno natural como para la salud humana. Además, promover la diversificación de cultivos puede ayudar a reducir la presión sobre el chile soledad y aumentar la resiliencia del sistema agrícola frente a las enfermedades y plagas. En resumen, el cultivo de chile soledad es vital para la economía local, la cultura en la región del Papaloapan y su producción enfrenta desafíos considerables que requieren soluciones más equilibradas y sostenibles para garantizar su viabilidad a largo plazo, tanto económica como ambientalmente.

5. JUSTIFICACIÓN

El estudio tuvo como objetivo principal investigar las respuestas de crecimiento y rendimiento del chile Soledad (*Capsicum annuum* L.) ante la aplicación de quitosano y *Bacillus subtilis*. Esta investigación resultó relevante en el contexto de la agricultura moderna, donde la búsqueda de prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente ha sido una prioridad constante. El chile Soledad, es una variedad ampliamente cultivada en diversas regiones debido a su popularidad y valor comercial, enfrenta desafíos significativos, tales como la presencia de enfermedades y el uso excesivo de productos químicos, los cuales afectan la calidad del suelo y la salud humana. Por otra parte, la aplicación de quitosano, un polímero natural derivado de la quitina, y *Bacillus subtilis*, una bacteria beneficiosa conocida por sus propiedades bioestimulantes y de control de patógenos, se plantea como una alternativa prometedora para mejorar el crecimiento y rendimiento del chile Soledad de manera sostenible. Los resultados de esta investigación no solo contribuyen al conocimiento científico sobre el uso de quitosano y *Bacillus subtilis* en la agricultura, sino que también tienen implicaciones prácticas significativas para los productores agrícolas de la región de la Cuenca del Papaloapan. Al comprender mejor cómo estas sustancias afectan el crecimiento y rendimiento del chile Soledad, se pudieron desarrollar estrategias de manejo más eficientes y respetuosas con el medio ambiente. Además, esta investigación proporcionó información valiosa para la comunidad científica y académica interesada en la agricultura sostenible, la biotecnología agrícola y la microbiología del suelo. Los hallazgos obtenidos servirán como base para futuros estudios relacionados con el uso de productos naturales y microorganismos beneficiosos en la producción de alimentos.

Finalmente, esta tesis contribuyó a llenar un vacío en la investigación agrícola al examinar las respuestas de crecimiento y rendimiento del chile Soledad a la aplicación de quitosano y *Bacillus subtilis*. Estos resultados contribuyen al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, beneficiando tanto a los agricultores como a la sociedad en general.

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación individual y en conjunto de *Bacillus subtilis* y quitosano sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de fruto del cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.), bajo condiciones de invernadero.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la purificación química de quitosano mediante la hidrólisis química del exoesqueleto de camarón (*Penaeus* sp.).
- Obtener bioproductos estimulantes para crecimiento vegetal a base de quitosano y *Bacillus subtilis*.
- Evaluar el efecto de la aplicación de los bioproductos a base de quitosano y *Bacillus subtilis* en plántulas y plantas de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) sobre los parámetros de morfología, rendimiento y calidad del fruto.

7. HIPÓTESIS

La combinación de *Bacillus subtilis* y quitosano ayudará a mejorar el rendimiento y calidad de los frutos en el cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.).

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1. LOCALIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

La investigación se llevó a cabo en la Universidad del Papaloapan, campus Loma Bonita, ubicado al norte de la región del Papaloapan, en el estado de Oaxaca. Esta área se caracteriza por su clima cálido, con una oscilación térmica anual corta y lluvias abundantes durante el otoño y principios del invierno, datos tomados del (INEGI, 2022). El trabajo se desarrolló en el laboratorio químico biológico, situado en las coordenadas 95°53' longitud oeste y 18°06' latitud norte. Para el manejo agronómico, se utilizó un invernadero de baja tecnología, tipo "alas de zopilote", nombrado así por su estructura característica. Este invernadero tiene una superficie total de 540 m², con capacidad para 2,000 plantas, pero se utilizaron solo 72 m². Sus dimensiones son de 6.5 m de altura y 3.5 m de altura en la base del canalón, con dos naves de 9 metros de ancho por 30 metros de largo, equipadas con ventilación lateral y frontal, que incluye 5 líneas regantes con mini válvulas y goteros separados a 50 cm, junto con 4 salidas con estaca a base del tubing. El invernadero también está provisto de dos tinacos con una capacidad de 1,100 litros cada uno.

8.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Se llevó a cabo en un arreglo por bloques con 4 tratamientos, cada uno con 20 repeticiones, equivalente a 20 plantas por tratamiento, los cuales incluyeron: Q (Quitosano), BS (*Bacillus subtilis*), Q+BS (Quitosano + *Bacillus subtilis*) y T (Testigo), como se detalla en la tabla 5. Los tratamientos fueron aplicados desde el momento de la siembra a los 15, 30 y 45 días después de la siembra y a los 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 y 120 días después del trasplante (ddt), es importante mencionar que el trasplante se realizó cuando la planta presentó 45 días

después de sembrada; los bioproductos se aplicaron en una dosis de 15 mL por planta, aplicados de forma a drench.

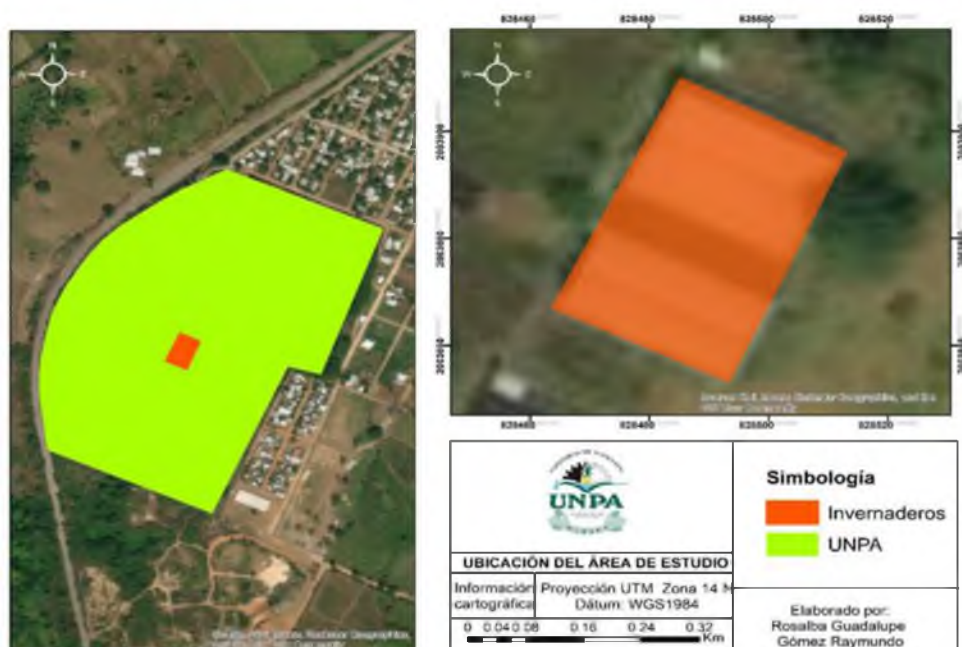


Figura 3. Ubicación del invernadero de la universidad del Papaloapan.

Tabla 5. Descripción de los tratamientos.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
Q	Quitosano + Solución nutritiva
BS	<i>Bacillus subtilis</i> + Solución nutritiva
Q+BS	Quitosano + <i>Bacillus subtilis</i> + Solución nutritiva
T	Solución nutritiva

Fuente: Elaboración propia.

8.3. OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS QUITINOSAS

Se obtuvieron residuos de exoesqueletos de camarón en el puerto de Alvarado, Veracruz, donados por el Sr. Maximino Hernández. Estos residuos fueron transportados al laboratorio químico biológico de la Universidad del Papaloapan. Inicialmente, se lavaron con agua e

hipoclorito de sodio (NaClO) en una proporción de 10:1. Luego, se secaron al sol durante 8 horas continuas. Posteriormente, se sometieron a una doble molienda utilizando una Licuadora industrial (Internacional, Modelo; LI-12A), durante 10 minutos y posteriormente con una Licuadora doméstica (Oster, modelo 006798- 013-000). durante 5 minutos, con el objetivo de obtener un tamaño de partícula de 100 μm . Por último, el polvo obtenido se sometió a un proceso de tamizado con (Tamiz No. 60 FIICSA, T60-8m, México) para uniformizar un tamaño de partícula de 250 μm (Amador-Mendoza *et al.*, 2016).

8.4. PURIFICACIÓN DE QUITOSANO

8.4.1. DESPROTEINIZACIÓN QUÍMICA (HIDRÓLISIS ALCALINA)

La reacción se llevó a cabo en un matraz Erlenmeyer de 2.0 L utilizando una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) 0.4 M, con una relación de 1/15 (p/v) y agitación constante a 1000 rpm durante 1 hora a una temperatura de 25 °C. Después de la reacción, la muestra sólida se lavó repetidamente con agua corriente hasta alcanzar la neutralidad (Amador-Mendoza *et al.*, 2016).

8.4.2. DESMINERALIZACIÓN QUÍMICA (HIDRÓLISIS ÁCIDA)

La reacción se llevó a cabo en un matraz Erlenmeyer de 2.0 L con una solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.6 N en una relación de 1/15 (p/v) y agitación constante a 1000 rpm durante 3 horas. Una vez concluida, la muestra sólida se lavó repetidamente con agua corriente hasta alcanzar la neutralidad (Amador-Mendoza *et al.*, 2016).

8.4.3. DESACETILACIÓN DE LA QUITINA (HIDRÓLISIS ALCALINA)

Por último, se llevó a cabo en un matraz Erlenmeyer de 2.0 L una reacción con una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) 0.4 M, utilizando una relación de 1/15 (p/v) y agitación constante a 1000 rpm durante 1 hora a una temperatura de 25 °C. Al finalizar, la muestra sólida se lavó repetidamente con agua corriente hasta alcanzar la neutralidad (Amador-Mendoza *et al.*, 2016).

8.4.4. DESPIGMENTACIÓN QUÍMICA

Se llevó a cabo un proceso de doble blanqueado, que consistió en resuspender los residuos desproteinizados y desmineralizados en matraces de 2.0 L, utilizando una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 38%, con agitación constante a 1000 rpm y temperatura ambiente durante 20 minutos cada uno. Después del primer blanqueado, las muestras se filtraron y se sometieron a un segundo blanqueado bajo las mismas condiciones. Posteriormente, las muestras resultantes se lavaron repetidamente hasta alcanzar la neutralidad y se secaron en una estufa a 70 °C durante 36 horas (Amador-Mendoza *et al.*, 2016).

8.4.5. SECADO DE LA MUESTRA OBTENIDA

Una vez finalizada la hidrólisis química, se procedió a secar la muestra en un horno a 60 °C durante un período de 12 horas.

8.5. ANÁLISIS DE LA MUESTRA

8.5.1. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO OBTENIDO

El rendimiento del quitosano se determinó utilizando la ecuación propuesta por (Luo, 2019).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{quitosano obtenido (g)}}{\text{exoesqueleto de camarón seco (g)}} \times 100$$

8.5.2. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL QUITOSANO

Se llevó a cabo la caracterización por triplicado del exoesqueleto de camarón, del quitosano obtenido y del quitosano comercial Sigma. Se determinó el porcentaje de humedad según la metodología (AOAC, 2005). y el contenido de cenizas (AOAC, 2005). Lo que permitió calcular el porcentaje de desmineralización (% DM) y desproteínización (% DP). El pH se determinó utilizando el equipo pH HORIBA (LAQUAtwin pH11). Además, se realizó un análisis instrumental del color utilizando un espectrofotómetro (ColorFlex HunterLab®) para obtener los valores °A, B* y L* del modelo de color HSL (Hue, Saturación y Luminosidad). Los datos obtenidos se procesaron utilizando el programa de conversiones "Easy RGB-PC" (disponible en <http://www.easyrgb.com>) para elaborar las cartillas de colores, siguiendo la metodología de (Porrás-Barrientos, 2015). Así mismo, se determinó el contenido de proteína mediante el método de Kjeldahl (AOAC, 2005).

8.5.3. CARACTERIZACIÓN CON ANÁLISIS INSTRUMENTAL

Por último, se llevó a cabo la caracterización de las muestras utilizando un espectrofotómetro de infrarrojo PerkinElmer FT-IR Spectrum 100 (IR) en una región de 400-4000 cm⁻¹, con un total de 16 barridos (Amador-Mendoza *et al.*, 2016).

8.6. ELABORACIÓN DE BIOESTIMULANTE DE CRECIMIENTO

8.6.1. REPRODUCCIÓN DE *Bacillus subtilis*

La cepa de *Bacillus subtilis* fue proporcionada por el laboratorio de bioprocesos de la Universidad del Papaloapan (UNPA) campus Loma Bonita. Se cultivó en un medio propio compuesto por una mezcla de melaza (20 g L⁻¹), harina de arroz (10 g L⁻¹), harina de soya (15 g L⁻¹) y suero de leche en polvo (150 g L⁻¹). Este medio se esterilizó a 115 °C durante 15 minutos y se ajustó a un pH de 7.2. Posteriormente, se añadió 1 mL⁻¹ de la concentración bacteriana y se incubó a una temperatura de 33 °C durante 48 horas. La suspensión bacteriana resultante se ajustó a una concentración de 1x10⁹ UFC*mL⁻¹ (Lara-Capistrán *et al.*, 2020).

8.6.2. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS

Se realizó una tinción diferencial mediante la técnica de la tinción de gram de acuerdo a la metodología usada por López-Jácome *et al.*, (2014).

8.6.3. ELABORACIÓN DEL QUITOSANO Y *Bacillus subtilis*

Se disolvieron 2 gramos de quitosano en 1 litro de agua y se dejaron en agitación constante durante 15 minutos para su completa disolución. Para el *Bacillus subtilis*, se agregaron 15 mL del concentrado preparado anteriormente en un litro de agua y se mantuvo en agitación constante durante 15 minutos. Finalmente, para el producto combinado, se añadieron 2 gramos de quitosano en 1 litro de agua junto con 15 mL del concentrado de *Bacillus subtilis*, y se realizó una agitación constante durante 15 minutos.

8.7. MANEJO AGRONÓMICO

8.7.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SUSTRATO UTILIZADO

8.7.1.1. PEAT MOSS

Para la siembra en charola, se utilizó el sustrato Peat Moss de la marca Green Forest Premier[®], compuesto principalmente por restos de musgo descompuestos de forma anaeróbica.

8.7.1.2. LOMBRICOMPOSTA

Para el trasplante se utilizó lombricomposta, material resultante del proceso de descomposición de desechos orgánicos mediante las acciones sinérgicas de las lombrices de tierra (*Eisenia fetida*) y las comunidades microbianas (Ali *et al.*, 2015). Además, contiene nutrientes de importancia para el crecimiento y la productividad de las plantas (Roychowdhury *et al.*, 2017). y mejora las propiedades químicas, biológicas y físicas del suelo (Aksakal, 2016). Se aplicaron 8 kg de lombricomposta por planta en todos los tratamientos, obtenida en Loma Bonita, Oaxaca. Las características específicas se detallan en la tabla 6 según los análisis realizados.

8.7.1.3. PRODUCCIÓN DE PLANTAS E INOCULACIÓN

Se utilizaron semillas de chile Soledad de la variedad CHISER-522, donadas por el campo experimental huastecas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2019). La siembra se realizó el 29 de noviembre de 2022, siguiendo la metodología de (Castillo-Aguilar, 2015). utilizando charolas de poliestireno de 200 cavidades, empleando Peat Moss como sustrato, el cual se humedeció hasta alcanzar la capacidad de campo. Se practicó un orificio de 1 cm en cada cavidad, donde se depositó una

semilla. Posteriormente, se cubrió la semilla con una ligera capa de sustrato Peat Moss húmedo. A los 15 días de la siembra, se aplicaron los bioproductos evaluados (*Bacillus subtilis*, quitosano y quitosano + *Bacillus subtilis*), junto con una solución nutritiva (Steiner, 1984), con una concentración del 25 % durante las primeras dos semanas. Luego, la concentración se aumentó al 50 % hasta el momento del trasplante.

Tabla 6. Resultados obtenidos del análisis de lombricomposta.

ELEMENTOS PRESENTES	CANTIDAD (%)
Materia orgánica	82.56
pH	7.1
Fósforo orgánico	1.21
Fósforo total	2.7
Nitrógeno total	0.23
Calcio total	1.74
Magnesio total	0.8
relación C/N	33.73

Datos del laboratorio phytomonitor SA DE CV Fecha de emisión 27/09/22.

8.7.1.4. TRASPLANTE

Después de 45 días las plántulas fueron trasplantadas en bolsas que contenían 8 kg de lombricomposta, colocando a la planta con el cepellón directamente al centro de la bolsa.

8.7.1.5. RIEGO Y FERTILIZACIÓN

Para realizar el riego y la fertilización del cultivo se utilizó el sistema de riego hidropónico con el que cuenta el invernadero, para la conducción del experimento se aplicó riego diario,

o conforme la planta lo requiera por un periodo de 20 minutos, en los siguientes horarios: 8:00 am y 18:00 pm. La solución nutritiva y dosis que se utilizó fue (Steiner, 1984.)

Tabla 7. Cantidad de fertilizante preparado para 1,000 L de solución nutritiva de las diferentes concentraciones utilizadas.

FERTILIZANTE	SOLUCIÓN NUTRITIVA UNIVERSAL STEINER (%)		
	25%	50%	75%
Nitrato de calcio	265 g	530 g	795 g
Sulfato de magnesio	123.75 g	247.5 g	371.25 g
Fosfato Mono potásico	123.75 g	247.5 g	371.25 g
Sulfato de potasio	62.75 g	125.5 g	188.75 g
Nitrato de potasio	70.25 g	140.50 g	210.75 g
Ultrasol MicroMix	12.5 g	25 g	25 g

La solución nutritiva y dosis que se utilizó basada en Steiner (1984).

El pH de la solución fue ajustado a 6 y la CE de 2.5 a 3.5 mS cm⁻¹. Es importante mencionar que las soluciones nutritivas fueron variando de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo, a los 4 días después de la siembra hasta los 25 días después de esta, se aplicó la solución al 25 % de concentración, posteriormente del día 26 a los 45 días después de la siembra se utilizó la solución al 50 %. La misma concentración se utilizó después del trasplante hasta los 75 días después de este, por último, a partir de los 76 días después del trasplante, hasta los 120 días después del trasplante se aplicó la solución nutritiva al 75% hasta terminar el ciclo vegetativo del cultivo.

8.7.1.6. PODA Y TUTOREO

Se realizó con unas tijeras de poda previamente desinfectadas con hipoclorito de sodio y agua, eliminando las hojas viejas y brotes axilares que pudieran causar un crecimiento

irregular en la planta. Las plantas fueron tutoradas con rafia agrícola especial, se realizó de forma vertical para evitar la ruptura de ramas.

8.7.1.7. COSECHA

Se realizaron tres cosechas, la primera se realizó a los 69 (ddt). La segunda a los 89 (ddt) y la tercera a los 105 (ddt).

8.7.1.8. EVALUACIÓN MORFOLÓGICA

La evaluación morfológica se llevó a cabo desde los 15 días después de la siembra en una cronología de cada 15 días, es decir a los 30, y 45 dds y a los 15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 (ddt), las variables evaluadas fueron las siguientes:

8.7.1.9. NÚMERO DE HOJAS

Se realizó en plántulas a los 14,30 y 45 días después de la siembra (dds) (Aleman-Pérez *et al*, 2018).

8.7.1.10. DIÁMETRO DE TALLO (mm)

El diámetro del tallo se midió utilizando un vernier calibrador digital (Truper[®]) que consistió en colocar el vernier a 5 cm de altura del tallo de la planta. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de cada 15 días abordando la etapa vegetativa, de floración y fructificación (Tucuch-Haas *et al*, 2012).

8.7.1.11. ALTURA DE LA PLANTA (cm)

Para medir la altura se empleó una cinta métrica a partir del nivel del suelo hasta el meristemo apical del tallo primario de la planta (Tucuch-Haas *et al*, 2012).

8.7.1.12. ÁREA FOLIAR

El área foliar se determinó a partir del método descrito por Swart *et al.* (2004). La medición se realizó en una hoja verdadera completamente extendida de más de 2 cm. Se determinó la longitud en cm (L), ancho en cm (W) y área en cm² (A) en hojas individuales.

Donde:

L: Distancia desde la punta de la hoja hasta el punto de ramificación de la nervadura principal y la primera nervadura lateral.

W: Región más ancha a través de la lámina perpendicular a la longitud.

$$A = [(0.61906)(L)(W)] + [(0.2060)(W)] - [(0.5142)(W)]$$

8.7.1.13. NÚMERO DE FRUTOS Y RENDIMIENTO POR PLANTA

Se contaron el total de frutos por planta a partir del amarre por cada planta; Se seleccionaron frutos que alcanzaron su tamaño comercial con coloración verde brillante, posteriormente se pesaron con una báscula electrónica (Rhino[®]) para obtener el rendimiento total de fruto por planta (Cruz-Crespo *et al.*, 2014).

8.8. DETERMINACIÓN FÍSICOQUÍMICA

8.8.1. DETERMINACIÓN DE CAROTENOIDES, CLOROFILA A Y B

El contenido de clorofila se determinó de acuerdo con la metodología de (Porra, 2002). Se colectó una hoja madura tomada de la parte media de la planta para cada tratamiento que fueron almacenadas en una hielera en el transporte del invernadero hasta su procesamiento en el laboratorio. Se lavaron con agua desionizada y se cortaron trozos de aproximadamente de 2 cm², para la extracción de pigmentos fotosintéticos se pesaron 3 g de hojas para cada

tratamiento por triplicado, que fueron depositadas en un mortero con 6 mL de acetona al 80 % y se trituraron hasta obtener una muestra homogénea. Posteriormente se tomó 4 mL del sobrenadante de la muestra pigmentada, se colocaron en tubos cónicos de 15 mL y se centrifugaron a 10,000 rpm durante 20 minutos. Evitando el contacto con la luz directa. Por último, se tomó 0.25 mL del sobrenadante de cada extracto y se aforó a 10 mL con acetona al 80 %. Se realizaron mediciones en el espectrofotómetro UV-Visible marca VELABTM modelo VE-5100UV, se depositó 1 mL de cada muestra obtenida en celdillas de cuarzo de 10 mm introduciendo al equipo, se leyeron a tres absorbancias (470, 647 y 664 nm) establecidas para cada pigmento.

Fórmulas:

$$\text{Chl a} = (12.25)(\text{Abs664} - 2.55)(\text{Abs647})$$

$$\text{Chl b} = (20.30)(\text{Abs647} - 4.91)(\text{Abs664})$$

$$\text{Chl a} + \text{b} = (17.76)(\text{Abs647} - 7.34)(\text{Abs664})$$

8.8.2. CONTENIDO DE EXTRACTO CELULAR DE PECIOLO, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y pH

Para determinar los nutrientes presentes en la planta se realizó mediante el extracto obtenido del peciolo, consistió en seleccionar una hoja madura tomada de la parte media de la planta para los cuatro tratamientos que posteriormente fueron almacenadas en bolsas Ziploc® dentro de una hielera a 5 °C, es importante mencionar que las hojas fueron colectadas a las 8 de la mañana; Se realizó su procesamiento que consistió en extraer la savia con una prensa, obteniendo 2 mL. para ser analizada en los fotómetros multiparamétricos para nitrógeno marca HORIBA (LAQUAtwin NO311), fosfatos HANNA Checker® (HI706), potasio

HORIBA (LAQUAtwin K11), conductividad eléctrica HANNA® (LAQUAtwin EC11), para pH HORIBA (LAQUAtwin pH11) y en la determinación de grados brix se empleó un refractómetro digital HANNA® (HI96801) (Álvarez Herrera, Vélez, y Jaime Guerrero, 2022). Para la determinación de fosfato se agregó 1 mL de HI717-25-fosfato (reactivo A) a cubeta y se aforó hasta 10 mL con HI717-25-fosfato (reactivo B), se mezcló y posteriormente se introdujo en espectro como blanco, se retiró la cubeta y finalmente se agregó 0.5 mL de la muestra para su lectura en fotómetro multiparamétrico marca HANNA® (HI83399) (Roacho-Cortés, 2021).

8.8.3. PARÁMETROS DE CALIDAD EN FRUTOS

Es importante mencionar que para estas variables se clasificaron en tres grupos (chico, mediano y grande) de acuerdo con la Norma Mexicana de productos alimenticios no industrializados para consumo humano—chile fresco (*Capsicum* spp.) NMX-FF-025-SCFI-2014, consistió en seleccionar 10 frutos por cada grupo y tratamiento.

8.8.4. LONGITUD Y DIÁMETRO

Para estas variables se tomaron en cuenta dos cortes en los frutos de tamaño chico, mediano y grande con 10 repeticiones por tratamiento. Para medir la longitud se utilizó una cinta métrica y para el diámetro un vernier digital (Truper®).

8.8.5. PESO INDIVIDUAL (g)

Se calculó con el promedio de 10 frutos de tres tamaños: chico, mediano y grande para cada tratamiento de dos cosechas, usando una balanza digital marca (Rhino®) modelo BAPRE-3 con precisión de 0.2 g de diseño compacto (Valadez-Sánchez, 2016).

8.8.6. GROSOR DEL PERICARPIO (mm) Y NÚMERO DE LÓCULOS

Para la determinación de estas variables, se utilizaron 10 frutos de tres diferentes tamaños: chico, mediano y grande por cada tratamiento, los frutos fueron partidos a la mitad y posteriormente se midió el grosor del pericarpio a cada fruto, utilizando un vernier digital (Truper[®]) y posteriormente se contaron el número de cavidades presentes en cada fruto.

8.8.7. GRADOS BRIX Y ACIDEZ TOTAL TITULABLE

Se seleccionaron 10 chiles de tamaño: chico, mediano y grande para cada tratamiento, se pesaron 10 gramos de cada muestra que fueron homogeneizadas en una licuadora con 20 mL de agua desionizada durante 2 minutos, para la determinación de grados brix se tomó dos gotas de la mezcla que fueron depositadas en un refractómetro digital HANNA[®] (HI96801). Para la acidez total titulable (ATT) se colocó la muestra obtenida en un matraz de Erlenmeyer de 125 mL, se agregaron 3 gotas de reactivo fenolftaleína al 1 %. La muestra se tituló con NaOH 0.1 N estandarizado hasta el punto final del color (incoloro-rosa muy pálido). La solución de referencia de color se preparó mezclando 1 g de fenolftaleína y se aforó hasta 100 mL con etanol. Se reportó el porcentaje del ácido presente en la muestra aplicando la siguiente fórmula:

$$ATT (\%) = \frac{(A * B * C)}{D} (100)$$

Donde: *A* fue el volumen de NaOH utilizado; *B* normalidad de NaOH (0.097 meq mL⁻¹); *C* masa equivalente expresada en g de ácido cítrico (0.064 g meq⁻¹); *D* masa en gramos de la muestra utilizada (10 g) (Álvarez Herrera, Vélez, y Jaime Guerrero, 2022).

8.8.8. CONDUCTIVIDAD Y PH

La conductividad eléctrica fue determinada, con el equipo HANNA® (LAQUAtwin EC11), y para el pH HORIBA (LAQUAtwin pH11), se tomaron 10 gramos de frutos de chile de tamaño chico, mediano y grande de cada uno de los tratamientos y se homogeneizaron en licuadora con 20 mL de agua desionizada durante 2 minutos, posteriormente se tomaron 2 gotas de la mezcla que fueron colocadas en los equipos.

8.8.9. CONTENIDO DE CAPSAICINA

Se llevó a cabo siguiendo la metodología de (Maurya *et al.*, 2018). Con algunas modificaciones en donde se seleccionaron diez frutos de tamaño chico, mediano y grande para cada tratamiento testigo, quitosano, *Bacillus subtilis* y Quitosano + *Bacillus subtilis*, primeramente, se cortaron en rodajas y fueron colocados en una charola de acero inoxidable para ser secados en un horno a 60 °C durante 48 horas. Al termino de este proceso se prosiguió a colocar 0.2 g de cada muestra en un tubo de ensayo y se agregó 16 mL de etanol para calentarlo a 80 °C durante 4 horas, agitando cada 30 min. Se dejó enfriar y sedimentar por aproximadamente 1 hora, el sobrenadante se filtró con papel filtro Whatman. Para la determinación de Capsaicina se llevó a cabo el método espectrofotométrico (González-Zamora, 2015). consistió en tomar lecturas de la absorbancia a 280 nm con un espectrómetro UV-Vis (Thermo Scientific). Por último, la curva de calibración se realizó con capsaicina pura (Sigma-Aldrich) disuelta en etanol en un rango de concentración de 10 - 200 mg L⁻¹. (González-Zamora *et al.*, 2015).

8.8.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos fueron procesados a través del paquete estadístico InfoStat, 2017 para Windows, se empleó un análisis de varianza de clasificación simple y se realizó una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0,05$). Las gráficas de los resultados se realizaron en el programa SigmaPlot 12.00 para Windows.

9. RESULTADOS

9.1. CARACTERIZACIÓN DE QUITOSANO OBTENIDO

Los resultados del análisis de las muestras de exoesqueleto de camarón, quitosano UNPA y quitosano Sigma se presentan en la Tabla 8, mostrando los contenidos de minerales (% M), Desmineralización (%DM), Desproteínización (%DP), proteínas (% P), humedad (% H) y Potencial de hidrógeno (pH) en cada muestra.

Tabla 8. Contenido de minerales, proteína, humedad y pH en las diferentes muestras analizadas: exoesqueleto de camarón, quitosano UNPA y quitosano Sigma.

MUESTRA	% M	% DM	% P	% DP	% H	pH
Exoesqueleto de camarón	24.6	0	44.62	0	6.5	8.8
Quitosano UNPA	2.71	97.28	7.43	83.34	11.5	3.4
Quitosano SIGMA	4.5	95.46	8.92	80.01	11.33	3.4

Promedio de tres repeticiones: % M: Minerales, % DM: Desmineralización, % P: Proteínas, % Dp: Desproteínización, H: Humedad, pH: Potencial de hidrógeno.

De los análisis realizados se encontró diferencias entre las muestras en términos de su composición química y propiedades físicas. El exoesqueleto de camarón muestra un alto contenido de minerales (24.6 %) y proteínas (44.62 %), lo que lo convierte en una fuente rica en estos componentes. Esta composición es esperada, considerando la función estructural y protectora del exoesqueleto en el camarón. Además, el bajo nivel de humedad (6.5 %) y el pH ligeramente alcalino (8.8) son consistentes con las características típicas de materiales biológicos marinos. Por otro lado, tanto el quitosano UNPA como el quitosano SIGMA muestran contenidos mucho más bajos de minerales y proteínas, indicando un proceso de desmineralización y desproteínización durante su producción. Estos resultados sugieren una

eficiente eliminación de impurezas y componentes no deseados para obtener quitosano de alta pureza. Sin embargo, se observa un aumento notable en el contenido de humedad en los quitosanos (11.5 % y 11.33 %, respectivamente), lo cual puede ser atribuido al proceso de extracción y purificación. Además, ambos quitosanos exhiben un pH ácido (3.4), probablemente debido a la naturaleza ácida de los procesos de desproteinización. Estas diferencias en la composición química y propiedades físicas entre el exoesqueleto de camarón y los quitosanos derivados tienen implicaciones importantes en su aplicabilidad industrial. Mientras que el exoesqueleto de camarón puede ser valorado como una fuente natural de minerales y proteínas en la industria alimentaria y de suplementos, los quitosanos UNPA y SIGMA son más adecuados para aplicaciones agrícola debido a su pureza y propiedades físico-químicas específicas. Por último, estos resultados resaltan la importancia de comprender la composición química y las propiedades de los materiales biológicos y sus derivados para su uso efectivo en diversas aplicaciones industriales y nutricionales.

Los resultados del análisis de colorimetría para el exoesqueleto de camarón, quitosano UNPA y quitosano Sigma se presentan en la Tabla 9. Se muestran las coordenadas de color L^* (luminancia), A^* (eje de rojo/verde) y B^* (eje de amarillo/azul), así como la descripción del color y la cartilla de color correspondiente. Estos resultados revelan diferencias significativas en los perfiles de color entre las muestras analizadas. El exoesqueleto de camarón exhibe un color "grisáceo pálido tono medio" con valores de L^* (luminancia), A^* (eje de rojo/verde) y B^* (eje de amarillo/azul) de 62.23, 1.17 y 16.3 respectivamente. Este color puede ser característico de la composición química y la estructura del exoesqueleto, con la presencia de pigmentos naturales que le confieren este tono específico. Por otro lado, tanto el quitosano UNPA como el quitosano Sigma muestran colores más claros y menos saturados en

comparación con el exoesqueleto de camarón. El quitosano UNPA presenta un color "grisáceo con tono medio blanco", con valores de L*, A* y B* de 75.63, 0.56 y 3.46 respectivamente. Mientras que el quitosano Sigma exhibe un color "marrón tono medio", con valores de L*, A* y B* de 65.56, 4.8 y 12.1. Estos colores pueden estar influenciados por el proceso de extracción y purificación del quitosano, así como por la composición química de los materiales de partida. La diferencia en los perfiles de color entre el exoesqueleto de camarón y los quitosanos derivados puede ser importantes en términos de su aplicación en diversas industrias. Por ejemplo, el color más claro y neutro de los quitosanos puede hacerlos más adecuados para su uso en aplicaciones donde el color del material es un factor importante, como en la industria alimentaria o farmacéutica. Mientras que el color característico del exoesqueleto de camarón puede ser útil en aplicaciones donde se busca aprovechar sus propiedades naturales y auténticas, como en la fabricación de productos cosméticos o suplementos dietéticos. En resumen, estos resultados destacan la importancia de considerar el perfil de color junto con otras propiedades físicas y químicas al seleccionar y utilizar materiales biológicos y sus derivados en diversas aplicaciones industriales y de investigación.

Tabla 9. Determinación de color de las diferentes muestras analizadas: exoesqueleto de camarón, quitosano UNPA y quitosano Sigma.

MUESTRA	COLORIMETRÍA			COLOR	CARTILLA DE COLOR
	L*	A*	B*		
Exoesqueleto de camarón	62.23	1.17	16.3	#A5947A	
Quitosano UNPA	75.63	0.56	3.46	#BEBAB4	
Quitosano SIGMA	65.56	4.8	12.1	#B09C8A	

Promedio de tres repeticiones. L*: luminancia, A*: eje de rojo/verde B*: eje de amarillo/azul.

9.2. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR)

Se realizó un análisis FT-IR para confirmar la estructura del quitosano UNPA, comparándolo con el quitosano SIGMA mediante la identificación de las bandas características de este polímero. En la figura 4 se muestran los espectros FT-IR obtenidos, donde se observan los grupos O-H y N-H a 3445 y 3280 cm^{-1} , respectivamente. La banda correspondiente al grupo C-N se encuentra en 1554 cm^{-1} , mientras que la banda de la amida III se sitúa en 1377 cm^{-1} .

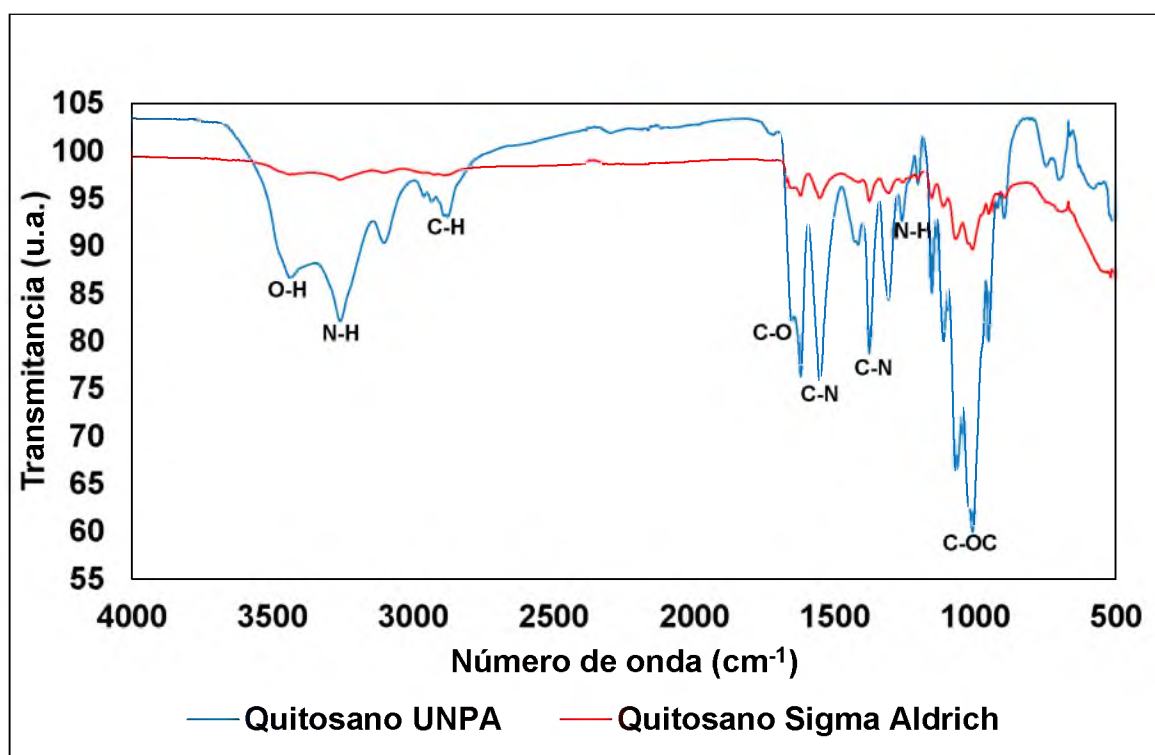


Figura 4. Espectros FTIR de quitosano (UNPA) — extraído a partir de exoesqueletos de camarón y quitosano (SIGMA) — a un rango de longitud de onda de 4000 cm^{-1} a 500 cm^{-1} .

Las bandas de los enlaces C=O de la amida I se identifican en 1630 cm^{-1} , y las bandas de estiramiento N-H para la amida I se encuentran en 3260 cm^{-1} . Para el quitosano SIGMA, las bandas más representativas del biopolímero se encuentran en 3438 cm^{-1} , correspondientes al estiramiento N-H para la amida I y a la vibración amplia de los grupos hidroxilo. Otra banda

característica del grupo carbonilo se observa en 1633 cm^{-1} . Es importante mencionar que estas bandas se presentan con menor intensidad en comparación con el quitosano UNPA.

9.3. REPRODUCCIÓN DE *Bacillus subtilis*

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos de la tinción de Gram. Se observaron bacterias de *B. subtilis* no esporuladas, gram negativas, en una resolución microscópica de 100X (5A). Este hallazgo sugiere que las células de *B. subtilis* en esta muestra estaban en un estado de esporulación activa. Por otro lado, en la Figura 5B se aprecian las esporas de *B. subtilis* vistas bajo el microscopio a 100X. La presencia de esporas indica que las células de *B. subtilis* estaban en un estado de esporulación, un mecanismo de supervivencia utilizado por algunas bacterias en condiciones de estrés ambiental. Estos resultados son consistentes con la naturaleza bifásica del ciclo de vida de *B. subtilis*, donde las células pueden alternar entre un estado vegetativo y un estado de esporulación según las condiciones del entorno. La capacidad de formar esporas permite a *B. subtilis* sobrevivir en condiciones adversas y puede tener implicaciones significativas en diversos contextos, como la microbiología Agroindustrial y la patología ambiental.

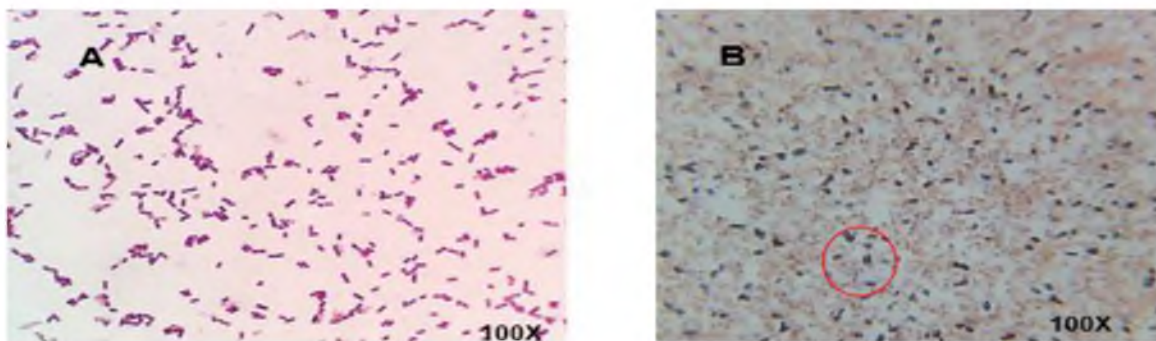


Figura 5. *Bacillus subtilis* (A) Bacilos gram positivos no esporulados, (B) esporas de *Bacillus subtilis*. Resultados de la Coloración de Gram. 100X.

9.4. RESPUESTA DE CRECIMIENTO EN PLÁNTULAS EN LAS CHAROLAS

En la Figura 6 se presentan los resultados de los parámetros morfológicos en plántulas, los cuales se evaluaron a los 15, 30 y 45 días después de la siembra (DDS), con el propósito de medir la altura de la planta (A), el diámetro del tallo (B) y el número de hojas (C). Los resultados revelaron que, a los 15, 30 y 45 días de DDS, el tratamiento combinado de Q + BS mostró una altura mayor, con medias de 6.88 ± 0.10 , 10.82 ± 0.26 y 17.54 ± 0.46 cm respectivamente. Sin embargo, a los 15 DDS no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos T, Q y BS. De manera similar, a los 30 y 45 DDS, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos Q y T, pero sí se detectaron diferencias significativas en el tratamiento con BS, siendo este el que presentó menor altura, con medias de 8.67 ± 0.21 y 14.22 ± 0.40 cm respectivamente. En cuanto al diámetro del tallo, el tratamiento más efectivo a los 15, 30 y 45 DDS fue la combinación de Q + BS, con medias de 1.49 ± 0.10 , 1.55 ± 0.10 y 2.20 ± 0.10 mm respectivamente.

No obstante, a los 15 DDS no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos Q y BS, siendo el tratamiento BS el que presentó un menor diámetro, por lo que no hubo diferencias significativas con el tratamiento T. A los 30 DDS tampoco se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos Q y T. De manera similar, a los 45 DDS no se encontraron diferencias significativas entre todos los tratamientos. En relación al número de hojas, no se observaron diferencias significativas entre los cuatro tratamientos a los 15, 30 y 45 DDS. Este fenómeno sugiere que, aunque la combinación de Q + BS mostró ventajas en la altura y el diámetro del tallo en ciertos puntos temporales, no influyó significativamente en el número de hojas. Estos resultados destacan la importancia de considerar la combinación

de diferentes tratamientos para maximizar el crecimiento y desarrollo de las plántulas en condiciones específicas.

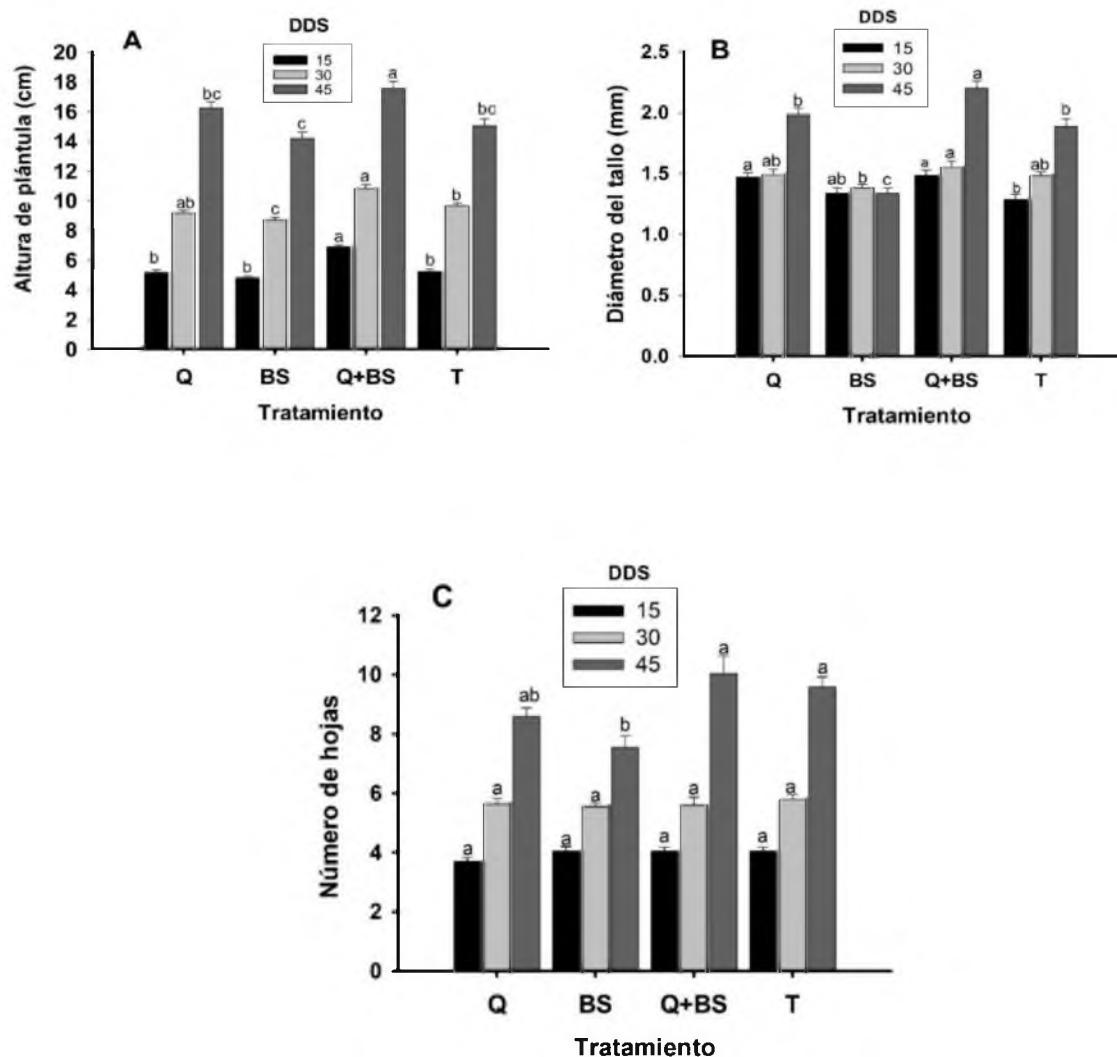


Figura 6. Altura de la planta (cm) (A), diámetro del tallo (mm) (B) y Número de hojas en chile soledad (*Capsicum annuum* L.). Evaluadas a los 15, 30 y 45 días después de la siembra (DDS), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

9.5. DESARROLLO DE LA PLANTA

9.5.1. DESARROLLO DEL CULTIVO DE CHILE SOLEDAD (*Capsicum annuum* L.)

En la Figura 7 se presentan los parámetros de crecimiento morfológico de las plantas de chile soledad, evaluados a los 15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 días después del trasplante (DDT). Estos parámetros incluyen la altura de la planta (A), el diámetro del tallo (B), el área foliar (C) y el número de brotes (D). Se observó que para la variable altura, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos a los 15, 30, 45, 90 y 105 DDT. Sin embargo, a los 60 DDT, el tratamiento con BS mostró una altura mayor (120.19 ± 2.68 cm), diferenciándose del testigo y la combinación de Q + BS, aunque no mostró diferencias significativas con la aplicación de Q, que alcanzó una altura de (114.8 ± 2.33 cm). Así mismo, a los 75 DDT, la combinación de Q + BS presentó la mayor altura (137.50 ± 3.65 cm), sin diferencias significativas con el tratamiento de BS (133.60 ± 3.19 cm), pero sí respecto a los demás tratamientos. En cuanto al diámetro del tallo, el testigo presentó diferencias significativas con respecto a los demás tratamientos (Q, BS y Q + BS), siendo la combinación Q + BS la que mostró el mayor diámetro (3.07 ± 0.06 mm). Además, a los 30, 45, 60, 75, 90 y 105 DDT no se observaron diferencias significativas entre tratamientos y el testigo. En relación con el área foliar, los mejores tratamientos a los 15 DDT fueron Q y Q + BS (33.65 ± 1.77 y 32.16 ± 2.01 cm² respectivamente), sin diferencias significativas entre ellos, pero sí en comparación con el testigo y BS. A los 30 DDT, la mayor área foliar se obtuvo con la aplicación de Q (59.57 ± 3.49 cm²), seguido por el testigo, sin diferencias significativas entre ambos tratamientos. Sin embargo, el testigo no presentó diferencias significativas respecto a los demás tratamientos (BS y Q + BS). En los siguientes intervalos de tiempo, las diferencias significativas entre tratamientos variaron, destacando la superioridad del tratamiento combinado Q + BS a los 75 DDT. En cuanto al número de brotes, a los 15 DDT, la aplicación

de Q y Q + BS mostró mejores resultados (7.05 ± 0.29 y 6.25 ± 0.29 brotes respectivamente), sin diferencias significativas entre ellos, pero sí respecto a los demás tratamientos. En resumen, se observó una variabilidad en el desempeño de los tratamientos a lo largo del tiempo de estudio, resaltando la eficacia de la combinación de Q + BS en varios aspectos del crecimiento de las plantas de chile soledad. Estos resultados pueden ser de utilidad para optimizar las prácticas de cultivo y mejorar el rendimiento de este cultivo en particular.

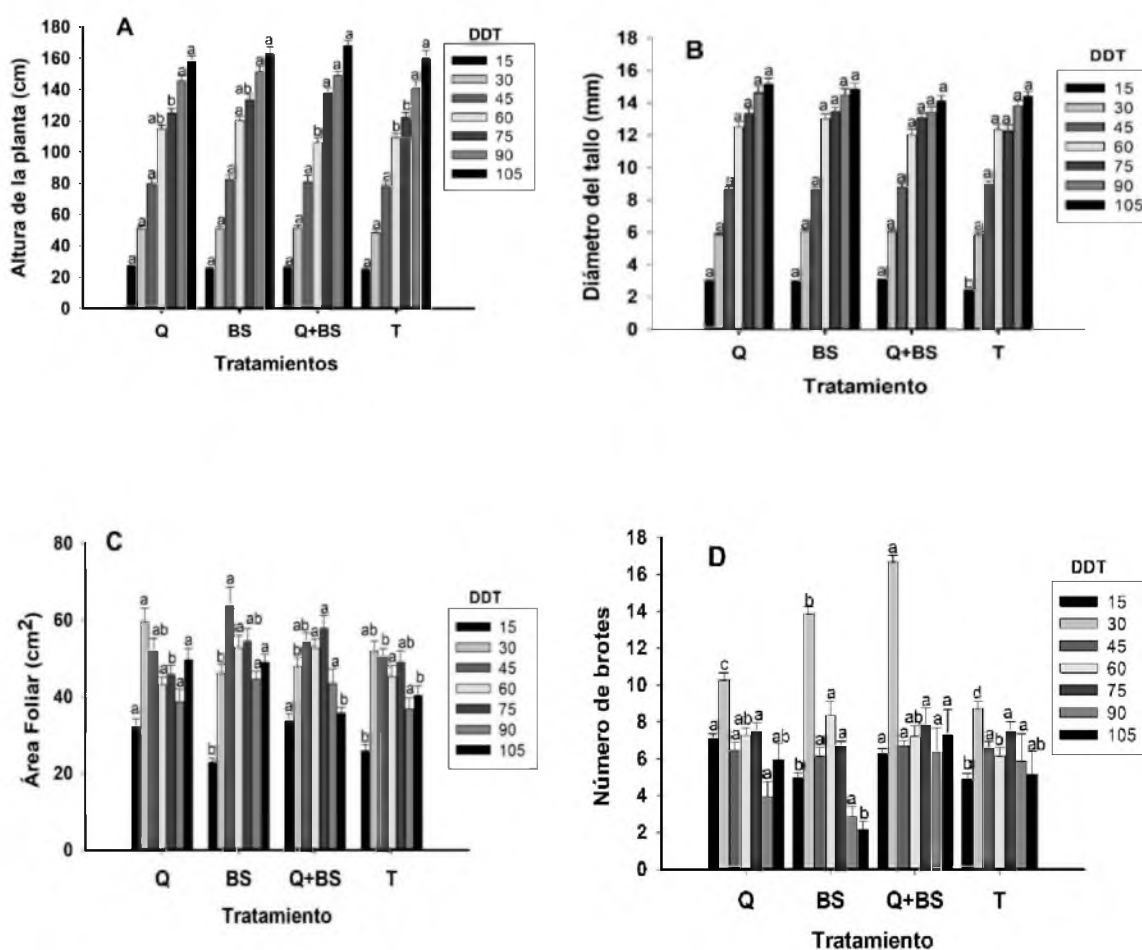


Figura 7. Altura de la planta (cm), (A), Diámetro del tallo (mm), (B), Área foliar (cm²) (C) y Número de brotes (D) en chile soledad (*Capsicum annum* L.). Evaluadas de los 15 a 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, P < 0.05).

9.6. DETERMINACIÓN DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS (CLOROFILA A Y B)

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos en pigmentos fotosintéticos a los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT) para clorofila A (A), B (B) y la suma de ambas (C). Se observó que para clorofila A los 30 DDT no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en comparación con el tratamiento testigo (T). Sin embargo, a los 60, 90 y 105 DDT se observó que el tratamiento con Q mostró concentraciones más altas de clorofila A (5.97 ± 0.35 , 2.41 ± 0.03 y $2.14 \pm 0.07 \mu\text{g mL}^{-1}$ respectivamente). En el caso de los 60 DDT, el T no mostró diferencia significativa con la aplicación de Q, ni tampoco la aplicación de BS y la combinación de Q + BS respecto al testigo, siendo la aplicación de BS la que presentó niveles más bajos de clorofila A con una concentración de $2.15 \pm 0.85 \mu\text{g mL}^{-1}$. A los 90 DDT, la aplicación con BS no mostró diferencias significativas respecto al T, siendo la combinación de Q + BS el tratamiento que presentó la menor concentración de clorofila A ($1.10 \pm 0.17 \mu\text{g mL}^{-1}$). En cuanto a los 105 DDT, no se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento con Q y el testigo, sin embargo, el Q presenta valores más altos de clorofila, pero si presentó diferencias respecto a los tratamientos BS y la combinación Q + BS.

En relación con la clorofila B, los mejores resultados a los 30 y 60 DDT se obtuvieron con la aplicación de Q, mostrando concentraciones de (4.13 ± 0.42 y $6.74 \pm 0.55 \mu\text{g mL}^{-1}$ respectivamente). Para los 90 y 105 DDT, la mayor concentración se presentó en la combinación de Q + BS (0.73 ± 0.08 y $13.87 \pm 0.82 \mu\text{g mL}^{-1}$ respectivamente), seguido por la aplicación de BS con $3.34 \pm 0.20 \mu\text{g mL}^{-1}$, lo que no presentó diferencias significativas. La aplicación de BS no mostró diferencias respecto al T a los 60 y 90 DDT, la concentración

que presentó fue de $2.69 \pm 0.03 \mu\text{g mL}^{-1}$, ni con la combinación de Q + BS, que presentó la menor concentración de clorofila B ($1.96 \pm 0.33 \mu\text{g mL}^{-1}$). En resumen, se observó que la combinación de Q + BS y la aplicación individual de Q mostraron resultados prometedores en la concentración de clorofila A y B en diferentes momentos de la evaluación. Estos hallazgos sugieren el potencial de estos tratamientos para mejorar la fotosíntesis y, por ende, el crecimiento y desarrollo de las plantas de chile soledad en condiciones específicas.

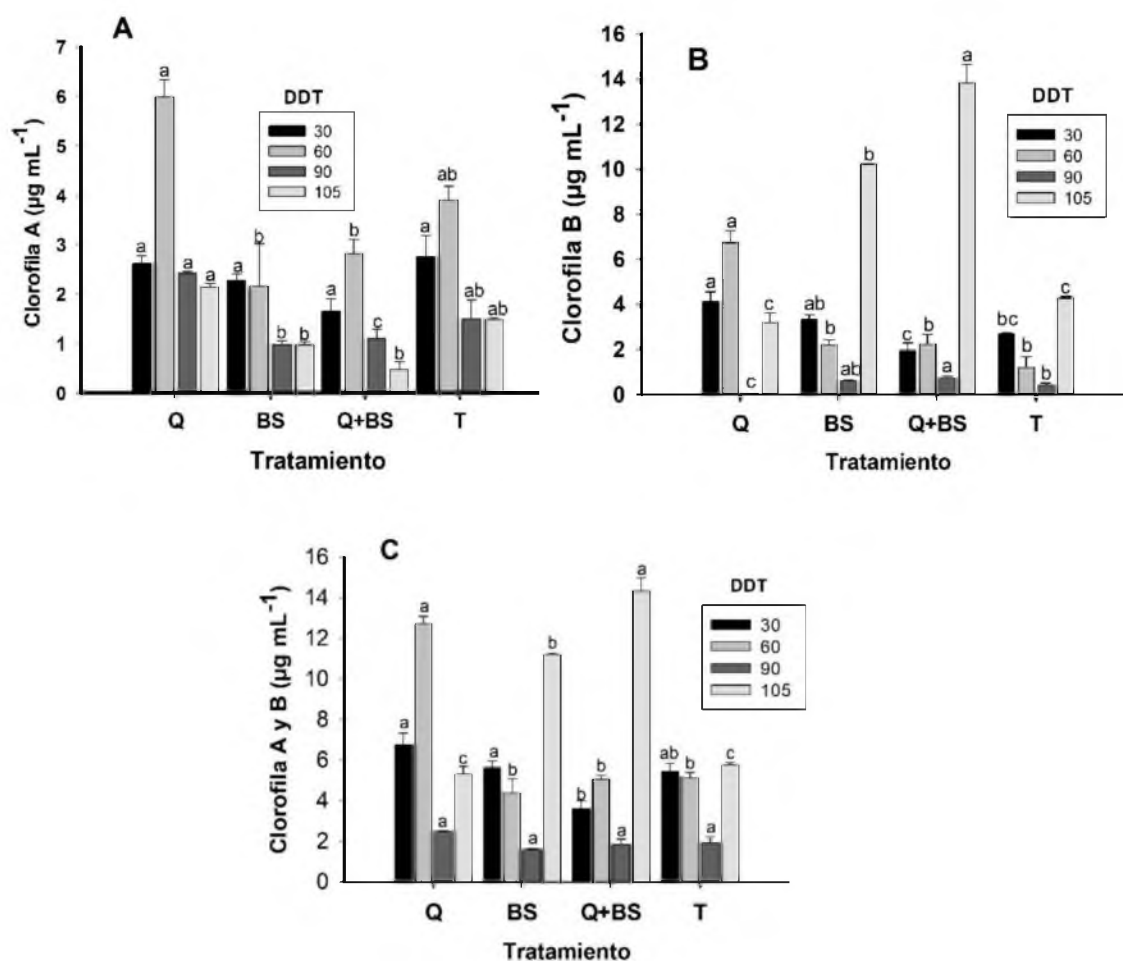


Figura 8. Clorofila A ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (A), clorofila B ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (B) y clorofila A y B ($\mu\text{g mL}^{-1}$) (C) en chile soledad (*Capsicum annuum* L.). Evaluadas de los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

9.7. CONTENIDO DE EXTRACTO CELULAR DE PECIOLO

El análisis de la savia en el peciolo permitió establecer la relación entre la aplicación de quitosano, *Bacillus subtilis* y la combinación de quitosano con *Bacillus subtilis* en las variables de conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) (A), potencial de hidrógeno (pH) (B) y grados Brix (C), a los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT), como se muestra en la Figura 9. Se determinó que en la conductividad eléctrica a los 30, 60 y 105 DDT no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos con respecto al testigo (T); sin embargo, a los 90 DDT, el tratamiento que presentó una mayor conductividad eléctrica fue el T ($600 \mu\text{S cm}^{-1}$), lo que mostró una diferencia significativa respecto a los demás tratamientos, seguido de la aplicación con Q ($453 \pm 17.55 \mu\text{S cm}^{-1}$). En cuanto al tratamiento con BS, presentó una conductividad de ($364.66 \pm 2.90 \mu\text{S cm}^{-1}$), mientras que el tratamiento combinado Q+BS presentó la menor conductividad eléctrica ($246.33 \pm 11.34 \mu\text{S cm}^{-1}$). En cuanto a los valores de pH registrados (B), a partir de los 30 DDT, el pH del cultivo no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, manteniéndose por encima de 5 ± 0.40 ; a los 60 DDT, los tratamientos con el pH más alto fueron BS (6 ± 0.40) y T (6.1 ± 0.05), sin diferencias significativas entre ellos. A los 90 DDT, los tratamientos BS y T presentaron un pH de 6.1 ± 0.03 , sin diferencias significativas entre ellos, mientras que Q presentó un pH de (4.7 ± 0.05) y Q+BS (3.06 ± 0.03). Finalmente, a los 105 DDT, los tratamientos con el pH más alto fueron Q+BS y T (5.5 ± 0.05), sin diferencias significativas entre ellos, ni entre Q y BS (4.76 ± 0.12) y (5.03 ± 0.03), respectivamente. Por último, en cuanto a la concentración de grados Brix (Figura 10 C), a los 30, 60, 90 y 105 DDT, el tratamiento con mayor concentración se observó en la aplicación con Q, con valores superiores a 3 ± 0.03 . Sin embargo, a los 30 DDT, no se presentaron diferencias significativas respecto al tratamiento

combinado Q+BS, que mostró un valor de 2.53 ± 0.06 . A los 60 DDT, se presentaron diferencias significativas entre todos los tratamientos, donde BS, T y Q+BS tuvieron valores de 3.76 ± 0.06 , 3 ± 0.05 y 2.26 ± 0.03 , respectivamente. A los 90 DDT, la aplicación combinada Q+BS presentó valores de 3.1 ± 0.01 , seguido del testigo con valores de 2.7 ± 0.0 , siendo BS el que presentó los valores más bajos de 2.1 ± 0.0 . De manera similar, a los 105 DDT, se determinó que el valor más alto, seguido de Q, fue el T con valores de 3.76 ± 0.0 , sin embargo, para la aplicación combinada Q+BS y BS, no se presentaron diferencias significativas (2.16 ± 0.12 y 1.8 ± 0.05).

A continuación se presentan los resultados de la concentración de nitratos, fosfatos y potasio en savia (mg L^{-1}) evaluados a los 30, 60, 90 y 105 DDT para cada tratamiento se muestran en la figura 10 (D), al final de la evaluación se determinó que la mayor concentración de nitratos a los 30, 60, 90 y 105 DDT se presentó en el tratamiento con Q mostrando valores superiores a ($1000 \pm 33.33 \text{ mg L}^{-1}$), sin embargo a los 30, 60, y 90 DDT no se presentó diferencias significativas con el tratamiento con BS que mostró valores superiores a ($900 \pm 33.33 \text{ mg L}^{-1}$), sin embargo a los 60 y 90 DDT no se mostraron diferencias significativas entre tratamientos respecto al testigo, pero si a los 105 DDT.

En cuanto a la concentración de fosfatos presentes en la savia se determinó que la mayor concentración a los 30, 60, 90 y 105 DDT se presentó con la aplicación de BS mostrando valores de (820 ± 20.81 , 430 ± 51.96 , 992.66 ± 3.17 y $490 \pm 40.41 \text{ mg L}^{-1}$) respectivamente, sin embargo, a los 60 DDT no presentó diferencia significativa respecto a la aplicación con Q y la combinación de Q + BS.

A lo que respecta la concentración de potasio, se determinó que a los 30, 60 y 90 DDT no se presentaron diferencias significativas respecto a los tratamientos, pero si a los 90 DDT la

combinación de Q + BS mostró una mayor concentración ($1566.66 \pm 33.33 \text{ mg L}^{-1}$), sin embargo, no presentó diferencias respecto a los tratamientos Q y BS.

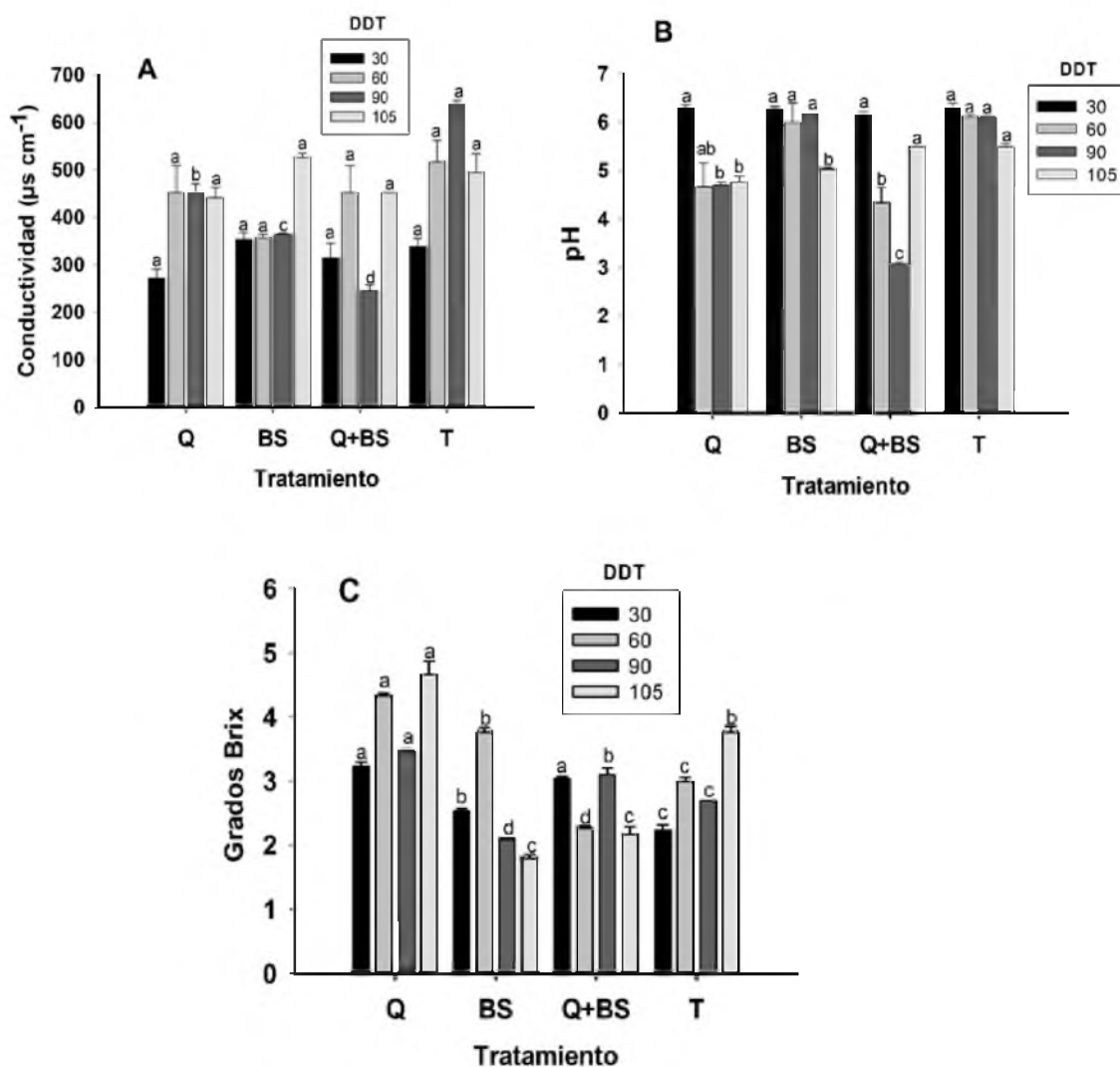


Figura 9. Efecto de la conductividad eléctrica (A), el pH (B) Y grados brix (C) en chile soledad (*Capsicum annum* L.). Evaluadas de los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo. Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

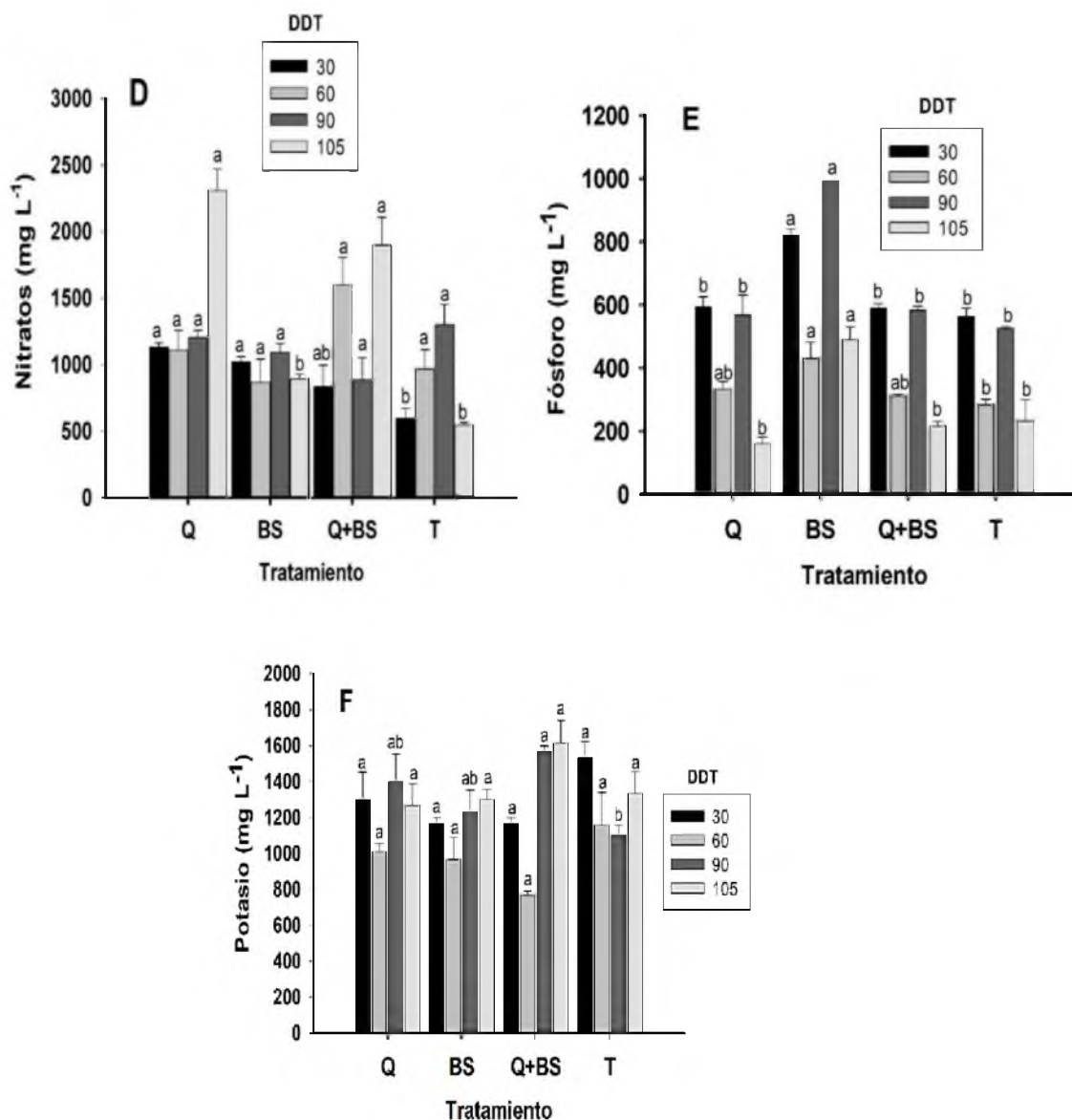


Figura 10. Variables nutritivas: Nitratos en savia (D), fósforo en savia (E) y potasio en savia (F) en chile soledad (*Capsicum annuum* L.). Evaluado a los 30, 60, 90 y 105 días después del trasplante (DDT), con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

9.8. Número de frutos y rendimiento por planta

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del número de frutos por tratamiento para cada corte realizado en el experimento. El primer corte se realizó a los 69 días después del trasplante (DDT), el segundo a los 85 DDT, y el tercer y último corte a los 106 DDT. Los resultados se encuentran detallados en la tabla 10. En el primer corte, se observa que la combinación de Q + BS mostró el mayor número de frutos (22.0 ± 3.08 frutos), mientras que el tratamiento Q presentó el menor número (16.0 ± 3.47). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. En la segunda cosecha, el mayor número de frutos se registró en la aplicación con BS (49.80 ± 5.78 frutos), pero no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos Q y Q + BS, aunque sí con respecto al T, que presentó el menor número de frutos. Para la última cosecha, se observó el mayor número de frutos en la aplicación con Q (41.55 ± 4.11 frutos). De manera similar, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos Q + BS y BS, pero sí en comparación con el testigo, que mostró el menor número de frutos por planta.

Tabla 10. Efecto de los tratamientos en el número de frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.)¹

TRATAMIENTOS	CORTE 1 69 DDT	CORTE 2 85 DDT	CORTE 3 106 DDT
Q	16.0±3.47 ^a	46.85±4.94 ^a	41.55±4.11 ^a
BS	17.4±1.81 ^a	49.80±5.78 ^a	34.55±3.36 ^a
Q+BS	22.0±3.08 ^a	35.15±2.39 ^a	35.75±2.19 ^a
T	19.35±3.09 ^a	18.45±2.34 ^b	19.95±1.43 ^b

¹**Promedio de 20 repeticiones.** DDT= Días después del trasplante, Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Medias ($\pm$ EE) con una letra común en una columna no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

La aplicación de los biofertilizantes no mostró diferencias significativas en el peso total del fruto en el corte 1 y 3, de lo contrario en el corte 2 si hubo diferencias significativas entre los tratamientos respecto al T, siendo la aplicación de Q el que presentó mayor peso en frutos con 110.74 ± 11.07 estos resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Rendimiento en gramos (g) de frutos de chile soledad (*Capsicum annum* L.)¹.

TRATAMIENTOS	CORTE 1	CORTE 2	CORTE 3
	69 DDT	85 DDT	106 DDT
Q	31.85 ± 8.02^a	110.74 ± 11.07^a	104.25 ± 8.36^a
BS	34.05 ± 3.96^a	106.43 ± 11.40^a	60.90 ± 6.38^a
Q+BS	21.99 ± 3.08^a	79.67 ± 7.06^a	103.81 ± 42.67^a
T	46.85 ± 7.04^a	34.54 ± 4.31^b	36.68 ± 2.63^a

¹Promedio de 20 repeticiones. DDT= Días después del trasplante, Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Medias ($\pm$ EE) con una letra común en una columna no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

9.9. RENDIMIENTO GLOBAL

El análisis del efecto de los biofertilizantes en el rendimiento acumulado por planta de los tres cortes realizados se presenta en la figura 11. En la representación del número de frutos por tratamiento (A), se destaca que la mayor cantidad de frutos se obtuvo con la aplicación de Q (104.4 ± 6.02 frutos). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas respecto a los tratamientos con BS y Q + BS, que presentaron una media de (101.75 ± 7.56 y 91.89 ± 5.19 frutos) respectivamente. Se observaron diferencias significativas con respecto al tratamiento T, que mostró el menor número de frutos (57.75 ± 4.65). En cuanto al peso acumulado por planta en gramos (B), se evidenció la mayor cantidad con la aplicación de Q (246.86 ± 10.66 gramos). No obstante, no se hallaron diferencias significativas respecto a la

aplicación con Q + BS (228.04 ± 41.76 gramos). En contraste, la aplicación con BS presentó un rendimiento de (201.37 ± 15.39 gramos) por planta, sin diferencias significativas respecto al testigo, que mostró el menor peso de frutos. En resumen, los resultados muestran que la aplicación de Q condujo a un mayor número y peso de frutos por planta en comparación con el tratamiento con BS y Q + BS. Además, se observó una diferencia significativa en el rendimiento en frutos entre los tratamientos y el testigo, lo que resalta el impacto positivo de la aplicación de biofertilizantes, particularmente de Q, en el rendimiento de chile soledad.

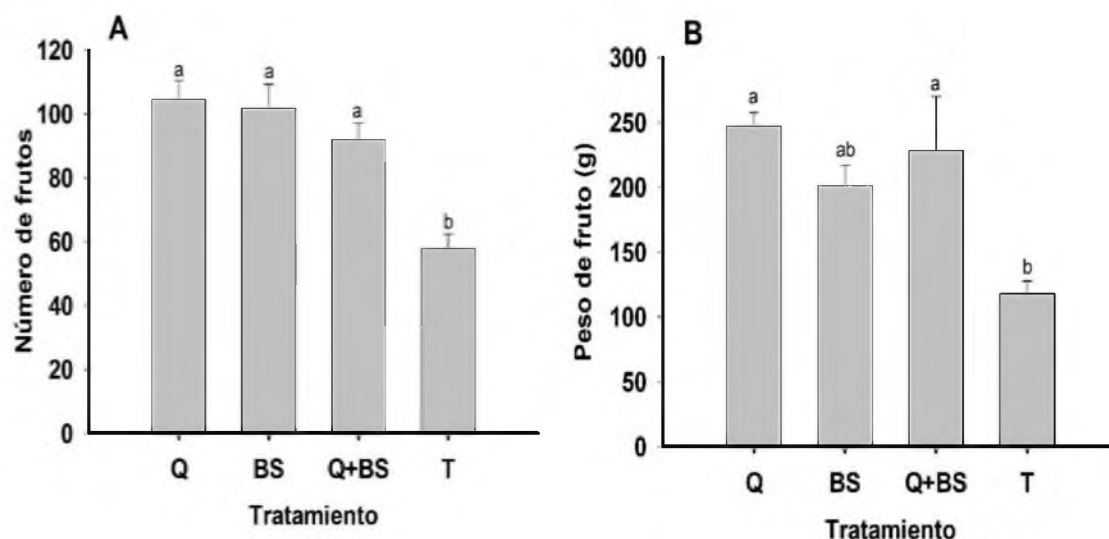


Figura 11. Efecto de la aplicación de biofertilizantes en el número de frutos y peso en gramos en chile soledad (*Capsicum annuum* L.) evaluadas con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo. Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

9.10. CALIDAD DE FRUTO

A continuación, en la figura 12 se presentan los datos obtenidos en morfología para la calidad de fruto del corte 1. Se analizaron variables como la longitud del fruto (cm) (A), el diámetro de fruto (mm) (B), el peso de fruto (g) (C), el grosor del pericarpio (mm) (D), y el número

de lóculos (E) en tres diferentes tamaños (chico, mediano y grande). Se determinó que la longitud del fruto en los tres tamaños fue mayor cuando se aplicó el tratamiento combinado Q + BS, con medias de (5.32 ± 0.1 , 6.29 ± 0.2 y 7.72 ± 0.2 cm) para el tamaño chico, mediano y grande respectivamente. Sin embargo, en el tamaño chico no se observaron diferencias respecto al tratamiento con BS, y en el tamaño mediano no se presentaron diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. Respecto al diámetro del fruto, se demostró el mayor diámetro en la aplicación con Q + BS, con valores de (8.17 ± 0.3 , 8.36 ± 0.3 y 9.56 ± 0.3) respectivamente para los tamaños chico, mediano y grande. En cuanto al peso del fruto, en la clasificación de tamaño chico se observó que los frutos más pesados se presentaron en la aplicación con Q, seguido de BS (2.15 ± 0.1 y 1.87 ± 0.1 g) respectivamente, sin diferencias significativas entre ambos tratamientos. En la clasificación de tamaño grande, la combinación de Q + BS mostró el mayor peso en frutos, seguido de la aplicación con Q. En cuanto al grosor del pericarpio, en la clasificación chico, mediano y grande se observó un mayor grosor con el tratamiento combinado Q + BS, sin embargo, en el tamaño chico no se encontraron diferencias significativas con respecto al tratamiento con Q, pero sí respecto al tratamiento BS y al testigo. En resumen, los resultados indican que la aplicación del tratamiento combinado Q + BS mostró mejoras significativas en varios aspectos de la morfología y calidad de los frutos, como la longitud, diámetro, peso y grosor del pericarpio, en comparación con los tratamientos individuales y el testigo. En la figura 13 se presentan los datos obtenidos del número de lóculos (E1) y las variables físicoquímicas de calidad en los frutos del corte 1: grados brix (F1), porcentaje de ácido cítrico (G1) y pH (H1). En cuanto al número de lóculos, no se observaron diferencias significativas en las clasificaciones de chico y mediano, pero sí para la categoría grande.

El tratamiento con Q mostró el mayor número de lóculos, superior a 5, sin embargo, no difirió significativamente de los tratamientos con BS y Q+BS, pero sí respecto al tratamiento T, que presentó un promedio de 4 lóculos. En las determinaciones fisicoquímicas del fruto, se observó que, para la clasificación en chico, la mayor concentración de grados brix se encontró en el testigo (3.15), mientras que Q y el tratamiento combinado Q + BS presentaron menor concentración (1.2 y 1.3 respectivamente), sin diferencias significativas entre ambos tratamientos. En cuanto al tamaño mediano, la mayor concentración de grados brix se presentó en el tratamiento con Q (3.8), mostrando diferencias significativas respecto a los demás tratamientos, mientras que BS y Q + BS presentaron la menor concentración (1.9 y 2 respectivamente), sin diferencias significativas entre ellos. En la clasificación de grandes, la mayor concentración de grados brix se observó en Q y el testigo (2 y 2.3 ± 0.1 respectivamente), sin diferencias significativas entre ambos, pero sí respecto a BS y el combinado Q + BS. En cuanto al porcentaje de ácido cítrico, se determinó que la clasificación en chico, el tratamiento T mostró la mayor concentración (0.05 %), con diferencias significativas respecto a los demás tratamientos, mientras que Q y Q + BS presentaron la menor concentración (0.01 %), sin diferencias entre ellos. Para el tamaño mediano, la mayor concentración se presentó en la combinación Q + BS (0.04 %), mostrando diferencias significativas respecto a los demás tratamientos, pero no entre Q y BS (0.01 y 0.02 % respectivamente). En la clasificación de grandes, la mayor concentración de ácido cítrico se observó con Q (0.049 %), con diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. Al determinar el pH, se observó en la clasificación de tamaño chico, el tratamiento con Q presentó un pH mayor (5.9), con diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. Sin embargo, entre BS, Q +BS y T, no se presentaron diferencias. Para el tamaño mediano, el mayor pH se encontró en los tratamientos BS y Q (5.9), sin diferencias significativas entre

ellos, pero sí respecto a los demás tratamientos, donde Q + BS y T presentaron un menor pH (5.7). En la clasificación de tamaño grande, el mayor pH se presentó en el tratamiento combinado Q + BS (5.9), sin embargo, no difirió significativamente de los tratamientos con Q y BS (5.8), respectivamente, pero sí respecto al T, que presentó un pH de 5.6. En resumen, los resultados indican que el tratamiento combinado Q + BS muestra mejoras significativas en varios aspectos físicoquímicos de calidad en comparación con los tratamientos individuales y el testigo, destacando en particular en el número de lóculos, concentración de grados brix, porcentaje de ácido cítrico y pH, lo que resalta su efectividad en la mejora de la calidad de los frutos.

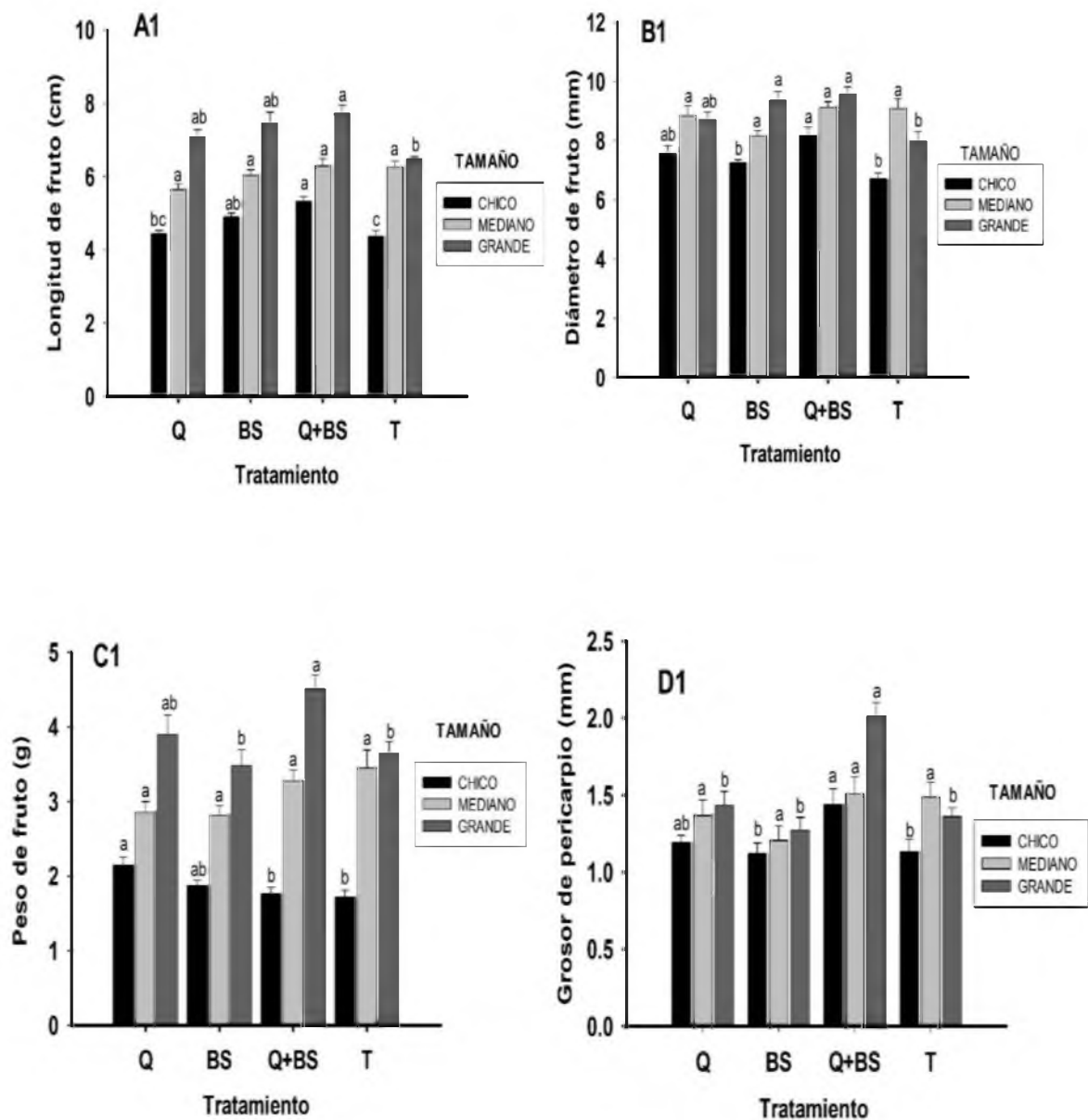


Figura 12. Variables morfológicas de calidad en frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) primer corte Longitud de fruto (A1), Diámetro de fruto (B1), peso de fruto en gramos (C1) y grosor de pericarpio (D1) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

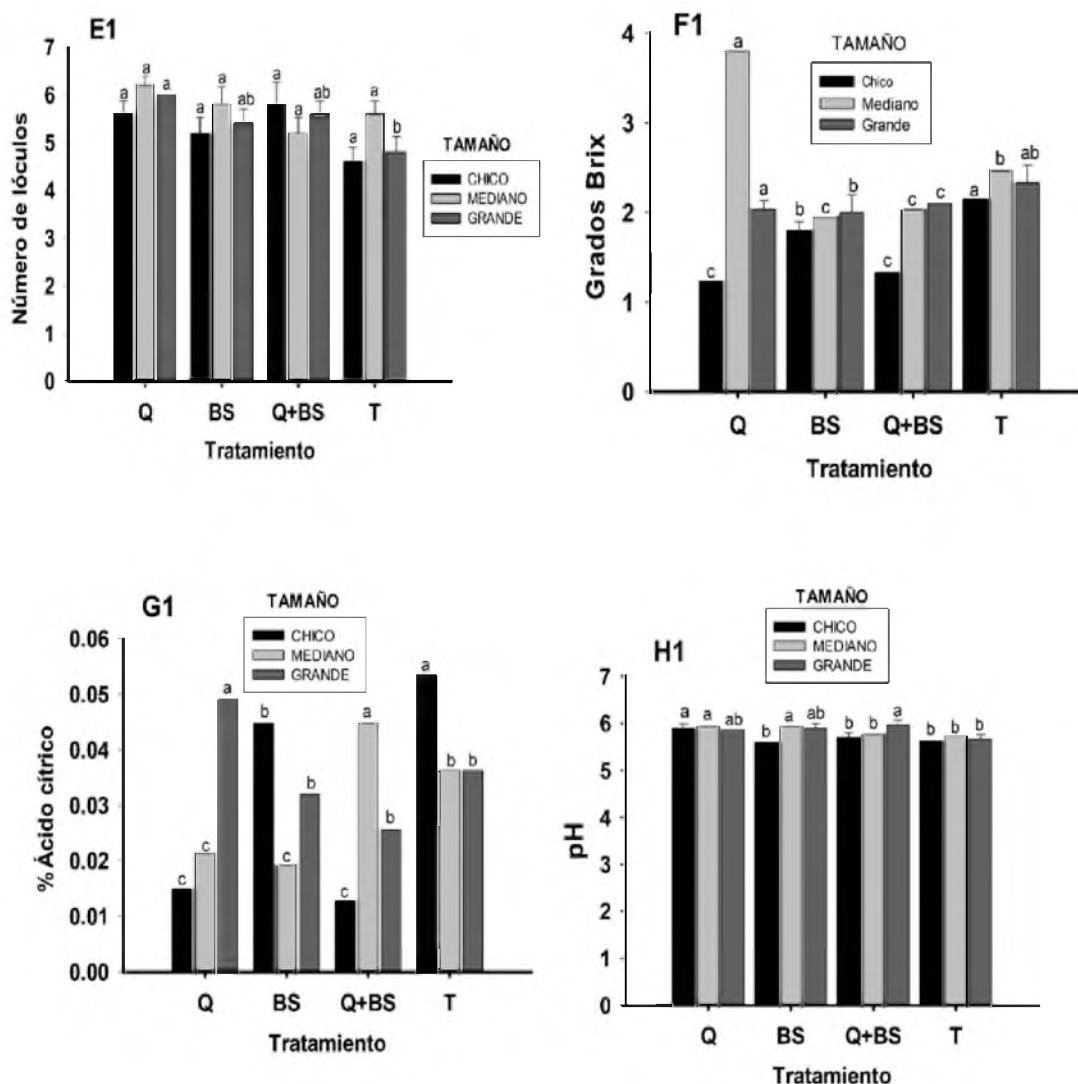


Figura 13. Variables fisicoquímicas de calidad en frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) primer corte número de lóculos (E1), grados brix (F1), porcentaje de ácido cítrico (G1) potencial de hidrogeno (H1) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

A continuación, en la figura 14 se presenta los datos de morfología para calidad de fruto del corte 2, se tomaron variables de longitud de fruto (cm) (A2), diámetro del fruto (mm) (B2), peso del fruto (g) (C2), grosor del pericarpio (mm) (D22), y número de lóculos (E) en tres diferentes clasificaciones de tamaños (chico, mediano y grande). En la variable longitud del

fruto en la clasificación de chico y mediano no se presentaron diferencias respecto a los tratamientos, para el tamaño grande se mostró la mayor longitud en el tratamiento combinado Q + BS (7.3 ± 0.2 cm), sin embargo, no se presentó diferencia respecto a los tratamientos con Q y BS que presentaron una longitud de (6.9 y 6.7 ± 0.2 cm) respectivamente, de lo contrario estos tratamientos si presentaron diferencias respecto al tratamiento T siendo este el que presentó menor longitud (6.47 ± 0.2 cm). A lo que respecta el diámetro del fruto se ha constatado que en la clasificación de chico el diámetro más elevado se presentó en el tratamiento con Q (8.02 ± 0.2 mm), no obstante no se observaron diferencias respecto con el tratamiento combinado Q + BS que presentó diámetro de (6.92 ± 0.4 mm), sin embargo si se presentó diferencias respecto a la aplicación con BS y T, pero a su vez entre T y BS no se presentó diferencias significativas; respecto a la clasificación del tamaño mediano y no se presentaron diferencias significativas en los cuatro tratamientos, por último se observó en la clasificación grande el mayor diámetro de fruto se presentó en el tratamiento combinado Q + BS (9.16 ± 0.3 mm), a pesar de ello no se mostró diferencias significativas respecto con los tratamientos Q y BS, pero si respecto al testigo.

En relación con el peso de fruto en la clasificación del tamaño chico se ha constatado un mayor peso en el tratamiento con BS (2.02 ± 0.2 g), seguido de la aplicación con Q que presentó un peso de (1.91 ± 0.1 g), por lo que no se demostraron diferencias entre ambos tratamientos, en la clasificación del tamaño mediano no se presentó diferencias significativas respecto a todos los tratamientos. Por último, se tiene que el mayor peso en fruto en la clasificación grande se observó en los tratamientos con Q + BS, Q y BS (4.11 ± 0.2 , 4.02 ± 0.2 y 3.78 ± 0.1 g) respectivamente, por lo que no presentaron diferencias entre estos tratamientos, pero si con respecto al tratamiento T. En la variable grosor del pericarpio se

tiene que en la clasificación chico y mediano no se presentaron diferencias entre tratamientos, de lo contrario para la clasificación de grande se presentó el mayor grosor de pericarpio en el tratamiento con BS, sin embargo, no presentó diferencias respecto a los tratamientos combinado Q + BS y T, pero si se presentó diferencias respecto al tratamiento con Q.

En la figura 15 se presenta las variables obtenidas de número de lóculos (E2) y variables fisicoquímicas de calidad en frutos del corte 2, grados brix (F2), porcentaje de ácido cítrico (G2), y pH (H2). Se observó que el número de lóculos en la clasificación de chico y mediano no se presentaron diferencias significativas respecto a los tratamientos, no obstante, en la agrupación de grandes el tratamiento que presentó mayor número de lóculos fue el combinado Q + BS, seguido de BS y Q por lo que no se presentaron diferencias entre estos tratamientos, pero si con el T, siendo este el tratamiento que presentó menor número de lóculos.

La concentración de grados brix en las tres clasificaciones (chico, mediano y grande) fue mayor con el tratamiento T mostrando una concentración de (3.43, 3.66 y 2.33) respectivamente por lo que en los tamaños chico y mediano se presentó diferencias significativas respecto a los demás tratamientos, no obstante, en el tamaño mediano la menor concentración se observó en el tratamiento con BS (1.3), a lo que respecta el tamaño grande no presentó diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. De acuerdo con la concentración de ácido cítrico obtenida en el tamaño chico, se constató que la concentración más elevada se presentó en el tratamiento con Q, lo que provocó diferencias en comparación con los demás tratamientos. No obstante BS y T no presentaron diferencias, pero el tratamiento combinado Q + BS el que presentó menor concentración (0.03 %), de acuerdo a la clasificación de tamaño mediano la mayor concentración de ácido cítrico se presentó en

el tratamiento con Q (0.115 %), por lo que se presentó diferencias respecto a los demás tratamientos, sin embargo en los tratamientos con BS y T no se presentaron diferencias debido que mostraron concentraciones de (0.44 %) para ambos, siendo el tratamiento combinado el que presentó menor concentración (0.023 %).

Por último, en la clasificación de tamaño grande la mayor concentración de ácido cítrico se presentó en el tratamiento T (0.05 %) por lo que mostró diferencias respecto a los demás tratamientos, no obstante, el tratamiento con Q y la combinación con Q + BS no se mostraron diferencias significativas, presentando una concentración de (0.040 %) para ambos, la menor concentración se presentó en el tratamiento BS (0.032 %). Por último, se determinó que la concentración de pH en la clasificación de chico fue mayor en los tratamientos con Q y BS (5.8 y 5.9), respectivamente por lo que no se presentó diferencias entre ambos tratamientos, de igual manera entre Q + BS y T no se presentó diferencias significativas por lo que presentaron un pH de (5.6 y 5.7) respectivamente. Respecto a la clasificación de medianos se observó el pH más elevado en el tratamiento combinado (5.9), por lo que no presentó diferencias respecto a los tratamientos T y Q con pH de (5.8), no obstante, T y Q si fueron diferentes respecto al tratamiento con BS que presentó un pH de (5.7), respecto a la clasificación de grande se observó que no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos presentando un pH entre (5.7 – 5.9).

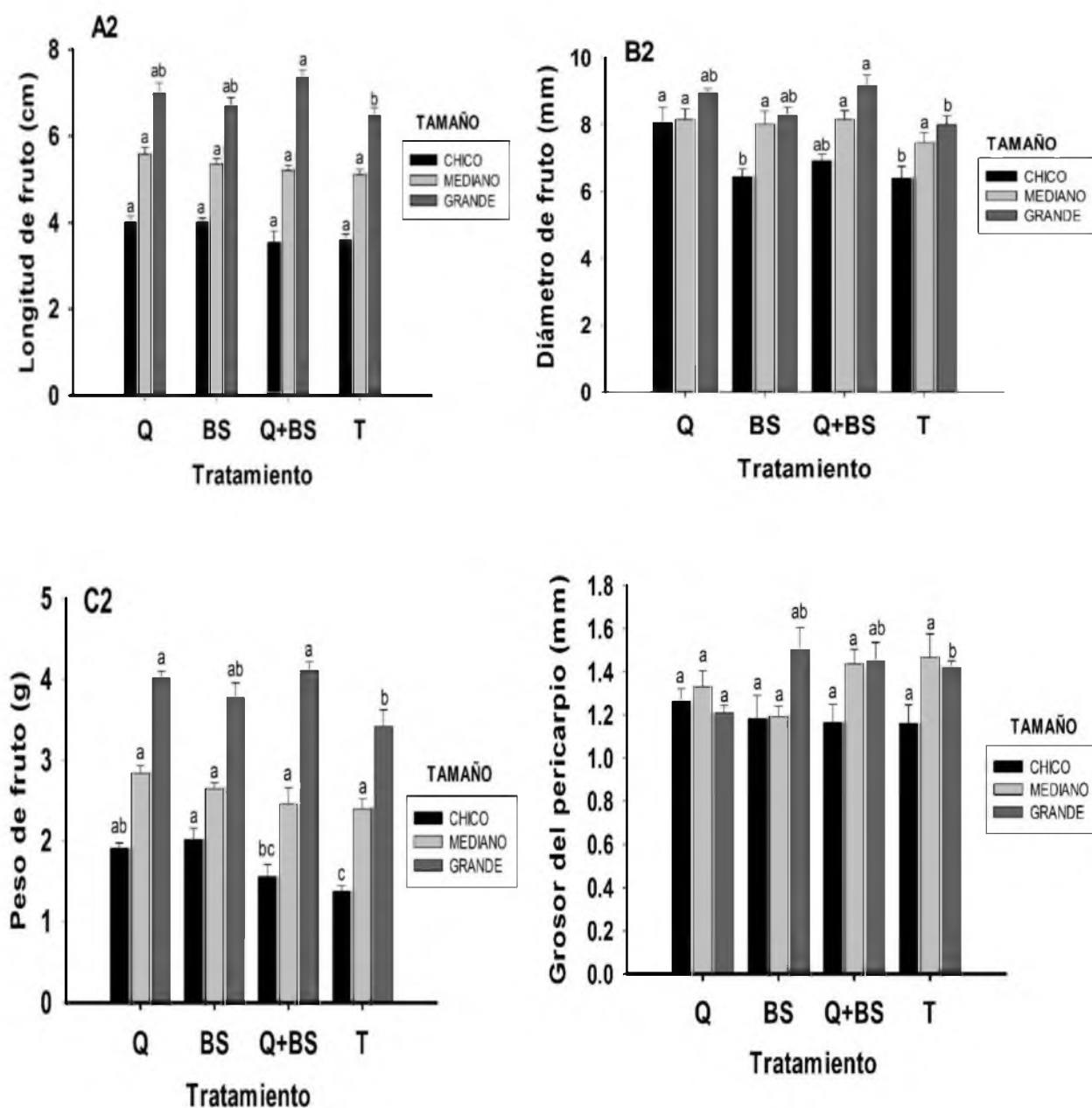


Figura 14. Variables morfológicas de calidad en frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) segundo corte Longitud de fruto (A1), Diámetro de fruto (B1), peso de fruto en gramos (C1) y grosor de pericarpio (D1) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

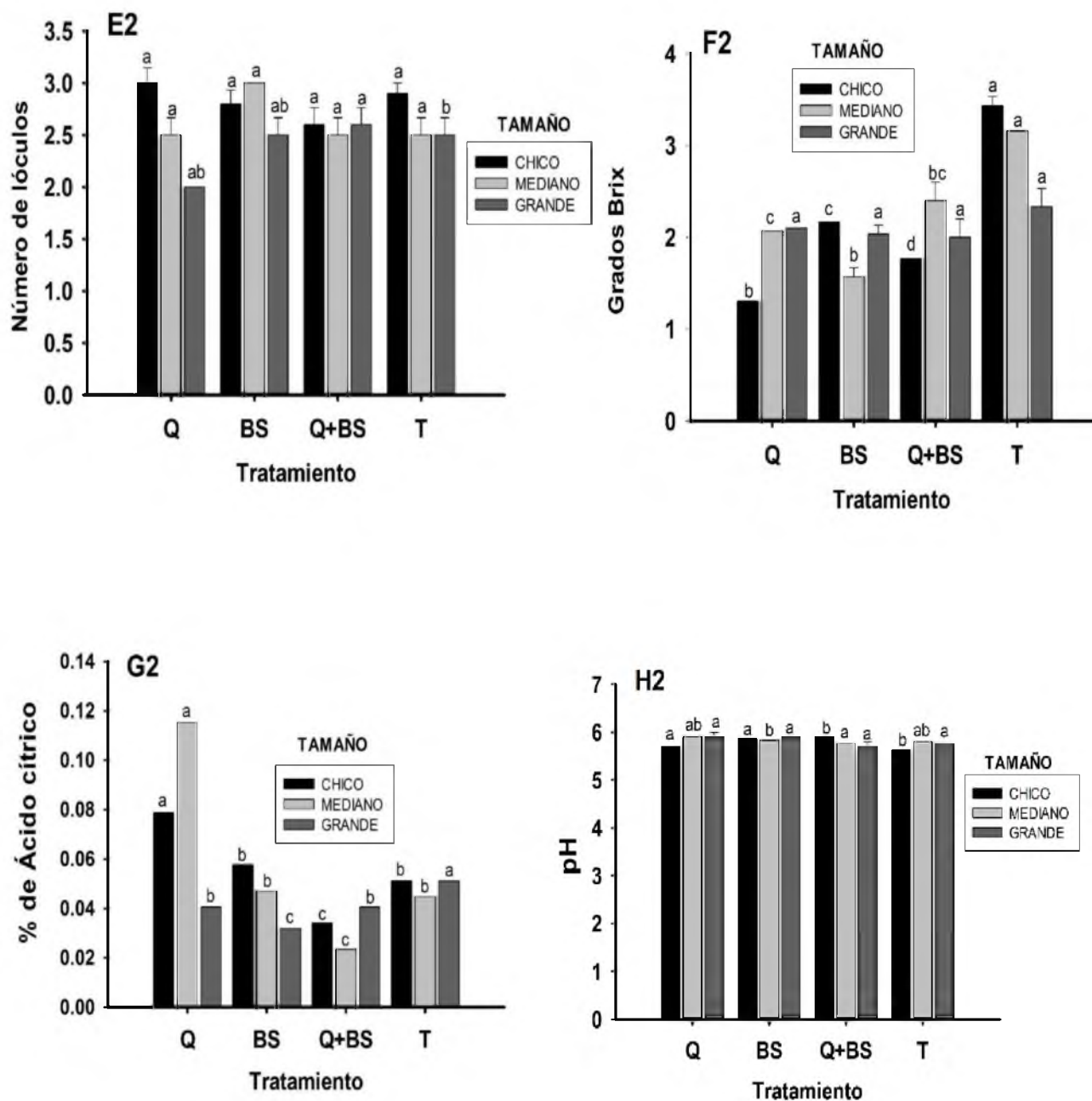


Figura 15. Variables fisicoquímicas de calidad en frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) segundo corte número de lóculos (E2), grados brix (F2), porcentaje de ácido cítrico (G2) potencial de hidrogeno (H2) clasificadas en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS = Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo. Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

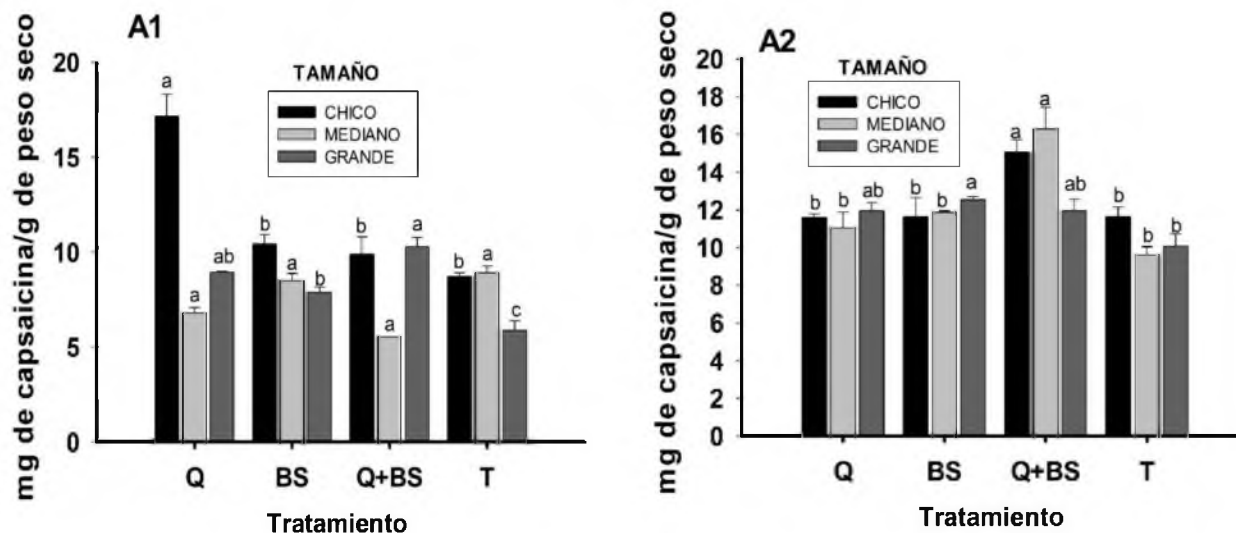


Figura 16. Efecto de la aplicación de los biofertilizantes en el contenido de capsaicina en el cultivo de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) primer corte (A1), segundo corte (A2) clasificados en tamaño chico, mediano y grande con cuatro tratamientos donde: Q= Quitosano, BS= *Bacillus subtilis*, Q+BS= Quitosano + *Bacillus subtilis*, y T= Testigo, Columnas con una letra común no son significativamente diferentes (Tukey, $P < 0.05$).

La gráfica muestra el contenido de capsaicina (mg de capsaicina/g de peso seco) en frutos de chile soledad (*Capsicum annuum* L.) bajo diferentes tratamientos: Quitosano (Q), *Bacillus subtilis* (BS), la combinación de ambos (Q+BS), y un control (T). Los frutos se clasificaron por tamaño (chico, mediano y grande) y se evaluaron en dos cortes diferentes (A1 y A2). En el primer corte (A1), se observa que el tratamiento con Quitosano (Q) presenta un mayor contenido de capsaicina en los frutos de tamaño chico en comparación con los demás tratamientos. Esta tendencia sugiere que el quitosano tiene un efecto positivo significativo en la síntesis de capsaicina en frutos más pequeños. En los frutos medianos y grandes, no se observan diferencias significativas entre los tratamientos. Para el segundo corte (A2), los frutos tratados con la combinación de Quitosano y *Bacillus subtilis* (Q+BS) muestran un incremento significativo en el contenido de capsaicina en frutos de tamaño grande, comparado con el control y otros tratamientos. Esto sugiere que la combinación de estos biofertilizantes puede potenciar la producción de capsaicina, especialmente en frutos de

mayor tamaño. Estos resultados indican que tanto el quitosano como el *Bacillus subtilis*, ya sea aplicados individualmente o en combinación, tienen un efecto positivo en la concentración de capsaicina en el chile soledad. La interacción entre estos biofertilizantes parece variar dependiendo del tamaño del fruto y del tiempo de corte, lo que podría estar relacionado con la dinámica de absorción y asimilación de estos compuestos por la planta.

10. DISCUSIÓN

10.1. CARACTERIZACIÓN DEL QUITOSANO OBTENIDO

Se realizó una comparación de rendimientos con diversos autores con lo obtenido en nuestro procedimiento. Derivado a esto, se logró un rendimiento del 25.19 % en quitosano UNPA y se comparó con lo obtenido por (González y Silva, 2023); (Martínez-Díaz y Ramírez, 2019); y (Castillo *et al.*, 2020). Quienes consiguieron un rendimiento inferior a lo obtenido en esta investigación de 74, 61 y 53.75 % respectivamente, derivado al aumento de temperatura en el proceso de desproteinización y desmineralización, así como el aumento de la concentración de los solventes utilizados. Por su parte (Luo, 2019). Presentaron un rendimiento de 14.5 % debido a que la extracción la realizó con diferentes solventes y diferentes concentraciones. Estas diferencias pueden explicarse a diversos factores de los cuales se involucra el procesamiento de la muestra, tipo de tratamiento y de la concentración de solvente utilizado, tipo de muestra y procedencia. Según lo informado por (De Castro *et al.*, 2018); las posibles causas al obtener un bajo rendimiento en el quitosano son porque la muestra tratada presenta mayor cantidad de proteínas y grasas, pues la composición de quitosano de diversas fuentes (crustáceos, insectos y hongos) no solo varía con la especie en cuestión, sino también con las características utilizadas para la obtención del quitosano, lo cual dificulta la comparación de diversos autores. De la misma manera se realizó una comparación entre el quitosano comercial SIGMA y el quitosano UNPA en función del porcentaje de minerales. Se presenció el 2.71 % para el quitosano UNPA, lo cual al compararlo con lo obtenido por (Luo, 2019 y Hernández-Cocoletzi *et al.*, 2009), quienes obtuvieron quitosano de exoesqueleto de camarón con 0.95 % y 1.40 % de minerales, nuestro resultado es superior. Por otra parte, al comparar nuestros resultados con lo expuesto por

(Martínez-Díaz y Ramírez, 2019). quienes evaluaron quitosano de exoesqueletos de camarones estero y de alta mar, utilizando la misma metodología y consiguió el 14 % y 24 % de minerales finales; por su parte (Torres *et al.*, 2023). evaluó quitosano de camarones de distintas procedencias con 29 % y 18 % de minerales, así mismo (Castro y Vidal, 2015) encontraron valores de 29.0 % de minerales en quitosano de exoesqueleto de *Emerita analoga*; los resultados obtenidos para cada autor difieren pues (Martínez-Díaz y Ramírez, 2019). afirma que las propiedades fisicoquímicas del quitosano dependen tanto de las fuentes como de las condiciones de producción de los camarones. A lo que respecta el quitosano SIGMA su porcentaje de minerales obtenidos fue de 4.5 %, de acuerdo a estos resultados se ha constatado que el quitosano UNPA presenta una calidad superior en comparación con el quitosano comercial SIGMA, conforme a los parámetros establecidos por (Kumar *et al.*, 2018). Estos mismos autores mencionan que es necesario que un quitosano de alta calidad tenga un porcentaje de minerales inferior al 1%, además de que un contenido bajo de ceniza puede ser un factor esencial para una mejor solubilidad. Por ende, el porcentaje de ceniza se ve influido por la presencia de impurezas de tipo mineral, como el calcio, el contenido en sales de CaCO_3 o incluso por contaminantes metálicos. Este resultado se encuentra en gran medida sujeto al origen, propiedades y condiciones de obtención (Hernández-Cocoletzi *et al.*, 2009). En cambio, en relación al porcentaje de desmineralización, se obtuvo un valor de 97.28 % y 95.46 % para el quitosano UNPA y SIGMA, respectivamente. Estos valores se encuentran en contraposición a 98% obtenido por (Pérez *et al.*, 2022). El porcentaje de proteína obtenida para el exoesqueleto es idéntico a lo reportado por (Suárez-Villa *et al.*, 2023), de 44.7 % e inferior a lo obtenido por (Cisneros-Pérez *et al.*, 2019), de 42.33 % y superior a lo reportado por (Luna, 2012) de 36.2 %. Se obtuvo un porcentaje de proteína final de 7.43 % para quitosano, un resultado superior a lo alcanzado por (Álvarez y Gómez 2019),

quienes obtuvieron un porcentaje de 2.83 %. Por otro lado, (Castro y Vidal, 2015), lograron un 0.83 % de proteína, aunque sobrepasa a lo alcanzado por (Martínez-Díaz y Ramírez, 2019). en quitosano de camarón de alta mar y camarón estero de 34.67 % y 37.16 % respectivamente. El 7.43 % de la proteína que presenta el quitosano UNPA es muy bajo, en comparación con el que contiene el exoesqueleto de camarón que obtuvimos, que es de 44.62 %, esto confirma que el proceso de desproteinización fue eficaz, ya que se eliminó un gran número de proteínas. De acuerdo con los resultados obtenidos para el porcentaje de desproteinización, se consiguió un porcentaje de 83.34 % y 80.01 % para el quitosano UNPA y SIGMA. En comparación con lo obtenido por (Pérez *et al.*, 2022), quienes obtuvieron el 87.5 % de desproteinización, los valores obtenidos fueron inferiores. Por otro lado, (Castro y Vidal 2015), obtuvieron un porcentaje superior a 89 %. En relación con el porcentaje de humedad, se obtuvo un valor de 11.5 % y 11.3 % para el quitosano UNPA y SIGMA, se evidenció un contraste con lo obtenido por (Martínez-Díaz y Ramírez, 2019), de 14 % presentamos resultados inferiores. En contraposición con los resultados obtenidos por (Torres *et al.*, 2023), de 0.96 %, y (Luo, 2019), de 2.7 %, se evidenciaron resultados superiores, mientras que (Velasco, 2019), analizó dos muestras de exoesqueleto, obteniendo valores inferiores al 6.6% y 6.5.%, se estima que el valor obtenido del quitosano UNPA es equivalente al que presenta el quitosano comercial de 11 %, según lo expuesto por (Barra-Romero y Beltramino 2012). Con estos resultados, se confirma lo reportado por (Martínez-Díaz y Ramírez 2019), que presenta una mayor humedad en el quitosano de camarón, evidenciando una disminución en la masa molecular del polímero, dado que la mayor cantidad de grupos hidrofílicos libres, como los hidroxilos, Aminos y Aldehído, al final de la cadena polimérica, aumenta la higroscopicidad de los polímeros tras la desacetilación. Estos resultados explican el aumento en la capacidad de absorción de agua como humedad

tras la deshidratación. Además, se señala que el contenido de humedad es uno de los factores fundamentales para evaluar el quitosano. El agua molecular se adsorbe sobre las cadenas poliméricas, ejerciendo un efecto plastificante en la estabilidad térmica y la estructura (Martínez-Díaz y Ramírez 2019). De igual modo, el porcentaje de humedad está relacionado con la eliminación de grupos acetilo como consecuencia de la desacetilación termo alcalina de la quitina, que genera grupos amino libres en la cadena polimérica. Es un sitio sensible a la formación de puentes de hidrógeno con el oxígeno de radicales libres -OH (Hernández-Cocoletzi *et al.*, 2009). Finalmente, el pH obtenido en el exoesqueleto de camarón fue de 8.8, mientras que el de quitosano UNPA y quitosano SIGMA se encuentra en 3.4, valores superiores a los 4 y 4.5 en camarón de alta mar y estero (Martínez-Díaz y Ramírez 2019). El pH del quitosano es un parámetro de calidad, ya que constituye un componente de las características químicas del mismo. Se precisa que para la evaluación del nivel de despigmentación mediante el método Hunter Lab de quitosano no se han realizado investigaciones, lo que impide la realización de comparaciones. No obstante, se sostiene que esta despigmentación se asocia al efecto oxidante del hipoclorito de sodio, y que el color obtenido del quitosano depende de su valor comercial, según lo establecido por (Romero-Serrano y Pereira 2020). El quitosano que exhibe mayor valor comercial es el de color beige, obtenido de hongos, seguido del quitosano de color blanco a grisáceo, obtenido de calamar y camarón. Esto se relaciona con nuestros resultados obtenidos para el quitosano UNPA, que presenta una coloración a blanco grisáceo con número de colores #BEBAB4. El precio del quitosano oscila entre \$700 000 y \$800 000 pesos por tonelada, dependiendo de su pureza (Dupont., 2014). Se consideran los niveles de desacetilación, desproteínización, desmineralización, porcentaje de humedad, pH y color, y se consideran los factores que influyen en su valor comercial (Romero-Serrano y Pereira 2020). Se requiere señalar que el

tamaño de la partícula tiene un efecto en los procesos de desproteínización y desmineralización (Colina, 2014).

10.2. CARACTERIZACIÓN DEL QUITOSANO UNPA Y QUITOSANO SIGMA POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR)

Para efectuar el quitosano UNPA los grupos O-H y N-H reportados en bandas de 3440 y 3280 cm^{-1} , respectivamente, se encuentran en el rango de (Gallardo *et al.*, 2019), quien ha identificado estos grupos en bandas de 3300 a 3500 cm^{-1} . De igual manera se asemeja a los obtenidos por (González y Silva, 2023), en 3430 cm^{-1} , mientras que (Martínez-Robinson *et al.*, 2022), en 3363 cm^{-1} , el grupo C-N se halló en la banda ubicada en 1380 cm^{-1} para (González y Silva 2023), se encontraron en bandas de 1581 cm^{-1} , asimismo, la banda de la amida III se halló en el rango obtenido por (González y Silva, 2023), a 1376 cm^{-1} . Los enlaces de C=O de la amida I se encuentran en bandas de 1660 cm^{-1} , valores superiores a los reportados por (González y Silva, 2023), de 1646 cm^{-1} quienes mencionaron que las bandas más representativas del quitosano son las que corresponden al estiramiento N-H para la amida I, las hallaron en bandas de 3289 cm^{-1} mientras que para quitosano UNPA se halló en bandas de 3260 cm^{-1} , en efecto, la banda ancha de vibración de tensión indicada por O-H se halló en 3440 cm^{-1} , debajo de lo señalado por (González y Silva, 2023), en una banda de 3471 cm^{-1} , por su parte Martínez- Robinson *et al.*, (2022) muestra bandas fuertes típicas a 1644 cm^{-1} (amida I, grupo C=O, vibración de estiramiento). Se pudo constatar que las bandas de estiramiento N-H pertenecientes a la amida I se hallaron en 3260 cm^{-1} , mientras que Gonzales y Silva (2023), en 3289 cm^{-1} , ratifican que son las bandas más representativas del quitosano.

10.3. CRECIMIENTO EN PLÁNTULAS

En la variable altura de la plántula se demostró que la combinación de Q + BS presentó mayor altura, lo cual difirió de los demás tratamientos evaluados, de igual manera en el diámetro del tallo en diferentes etapas el Q y la combinación con Q + BS mostró efectos positivos. Los resultados obtenidos pueden ser explicados a partir de lo expuesto por (Chávez *et al.*, 2018), quien sostiene que los diversos microorganismos biológicos utilizados como promotores del crecimiento vegetal utilizan el quitosano como fuente de carbono y de esta manera, incrementan sus poblaciones en respuesta a la aplicación de este. Por ende, combinación de quitosano con *Bacillus subtilis* provocó un aumento de su población de esta manera, mejoró sus funciones metabólicas; estos mecanismos han sido corroborados por (Dircio *et al.*, 2021), que menciona que mejoran el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Finalmente, (Luna Martínez *et al.*, 2017), en su investigación confirma que estos mecanismos efectuados por las bacterias aumentan la disponibilidad de micronutrientes como el hierro (Fe) en la zona de la rizosfera. El hierro a su vez puede ser captado por sideróforos, moléculas orgánicas secretadas por estas bacterias, con las que forman quelatos que pueden ser asimilados por las plantas para un mejor desarrollo. Así mismo (González-Peña *et al.*, 2014), demostró que el quitosano produce un aumento del desarrollo del sistema radical (raíces) y fortalecimiento del vigor y grado de lignificación de las plantas de tomate mediante una Resistencia Sistémica Adquirida (SAR). El efecto bioestimulante mostrado en esta investigación podría atribuirse a su composición química formada por polímeros lineales con unidades estructurales de 2-amino-2-desoxi-D-glucopiranososa conectados entre sí por enlaces glucosídicos 1.4 (Antony, 2019). Una vez que la planta tiene contacto con este biopolímero se desencadenan una cascada de señalizaciones estimulando los mecanismos de defensa

mediado por SAR, esto colateralmente produce un aumento significativo en la raíz, permitiéndole absorber más nutrientes, produciendo un fortalecimiento y mayor vigor en ellas (Molina, 2017). Por lo que realizando una comparación en la variable altura con lo obtenido por (Izquierdo-Oviedo *et al.*, 2023), quienes obtuvieron una altura (3.99 cm) al aplicar quitosano en las raíces y vía foliar de plántulas de *Capsicum annuum* L. (chile pimiento), en dosis de 1 mg L⁻¹ a los 15 días después del trasplante nuestros resultados fueron superiores (6.88 cm). Así mismo, se llevó a cabo una comparación con los resultados obtenidos por (Martínez-Robinson *et al.*, 2022). quienes evaluaron Lombrihumus + Kuntan + Lidavital® a los 35 días después de la siembra donde obtuvieron una altura de 8.75 cm, nuestros resultados fueron superiores con (10.82 cm). Por otra parte, al comparar nuestros resultados con lo reportado por (Alvarez-Pinedo *et al.*, 2018), a los 45 DDT quienes evaluaron la aplicación de quitosano en combinación con ecomic en *Capsicum annuum* L. (chile pimiento), se constató una mayor altura que evidenció diferencias significativas en comparación con el testigo (13.75 ± 0.24 cm), no obstante, nuestros resultados siguen siendo superiores (17.54 ± 0.46 cm). En lo que respecta al diámetro de tallo, se puede inferir que el tratamiento más adecuado a los 15 y 45 DDS fue Q + BS, realizando una comparación de acuerdo con Dircio *et al.*, (2021), quienes evaluaron *Bacillus licheniformis* M2-7, en chile poblano (*Capsicum annuum* L.) a los 15 DDS presentó un diámetro de (1.02 mm) nuestros resultados son superiores al obtener un mayor diámetro con Q +BS (1.49 ± 0.04 mm), asimismo, se comparó con lo obtenido por (Martínez-Robinson *et al.*, 2022). quienes aplicaron Lombrihumus + Lidavital® de manera foliar evaluando a los 35 DDS mostraron un diámetro de 2.85 mm, nuestro resultado es inferior (1.55 mm). De igual manera los resultados obtenidos se asemejan a lo mostrado por (Lara-Capistrán 2020), que evaluaron la aplicación de *Bacillus subtilis* en chile dulce (*Capsicum annuum* L.) determinaron que difirió

positivamente del testigo. Por último, se tiene que para el número de hojas no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, estos resultados coinciden a los reportados por (Gustavo-González *et al.*, 2021), quienes evaluaron QuitoMax[®] a una concentración de 1 g L⁻¹ sobre plántulas de tomate de dos variedades ESEN y L-43 donde no se presentaron diferencias significativas para esta variable, por otro lado, (Terry-Alfonso *et al.*, 2021). Evaluó el efecto de HMA-quitosana y HMA-bionutriente en la aplicación foliar a los 35 días después de la emergencia y mostró un resultado superior a 6 hojas en comparación a nuestros resultados. En general, se han reportado resultados que señalan el potencial del *Bacillus*, particularmente el CBRF12 y CBCC57, para el crecimiento de plántulas de chile habanero (Sosa, 2019). Otras cepas de *Bacillus spp* han reportado incrementos en el crecimiento de plántulas de pimiento *C. annuum* L. (Mejía, 2022).

10.4. RESPUESTA DE CRECIMIENTO DESPUÉS DEL TRASPLANTE

Los resultados muestran un efecto de la aplicación de los biofertilizantes en el crecimiento vegetal que involucra altura, área foliar y número de brotes. De los cuatro tratamientos evaluados, *B. subtilis* promovió significativamente la altura de planta a los 60 DDT (120.19 cm) ($P \leq 0.05$). En relación con la variable diámetro del tallo, se constató que no se presentaron diferencias respecto a los tratamientos, Las plantas de chile soledad que fueron tratadas con Q, BS, y su combinación experimentaron un incremento significativo en el área foliar y número de brotes en diferentes etapas de crecimiento, por lo que confirman que el uso de biofertilizantes como *Bacillus subtilis* es una alternativa para el crecimiento vegetal, debido que presenta la capacidad de producir ácidos orgánicos de bajo peso molecular que permiten la liberación del fósforo soluble del suelo, este macroelemento es empleado por las plantas para su fotosíntesis, energía, síntesis y degradación de fuentes de carbono, lo que les

permite alcanzar un mayor crecimiento vegetal. Así mismo, pueden producir ácido indol-3-acético (AIA), una hormona vegetal que contribuye a la elongación y división celular, la diferenciación de tejidos y las respuestas a la luz y la gravedad (Wagi, 2019). Así como crear protección a las plantas contra fitopatógenos, por lo que muestra una influencia positiva en el crecimiento vegetal (Ndeddy y Babalola 2016). En última instancia, las bacterias del género *Bacillus* poseen una elevada habilidad de adherencia y colonización de las raíces de las plantas, lo que puede tener un efecto significativo en su crecimiento (Allard-Massicotte, 2016). Por otro lado, se encuentra la aplicación de quitosano, diversos autores han atribuido que el quitosano estimula la producción de clorofila y la fotosíntesis en las plantas, por lo que las plantas presentan un mayor desarrollo (Pichyangkura, 2015), de la misma manera el quitosano se emplea como bioestimulantes, tanto para fomentar el crecimiento de las plantas como para inducir la tolerancia al estrés abiótico o resistencia a patógenos, entre otras funciones estimula la actividad de las enzimas fundamentales para metabolizar el nitrógeno y optimizar su transferencia en las hojas, lo que fomenta la función foliar en el crecimiento y desarrollo (Chibuet, 2000); (Abdel-Mawgoud *et al.*, 2010). Por su parte (Barka, 2004), menciona que el quitosano también aumenta la fotosíntesis y que la acción de la molécula de quitosano varía de una célula a otra y está determinada por su química fisiológica específica, por lo que produce un aumento en las raíces, la floración y el posible rendimiento en los cultivos (Chandrkrachang, 2005). En relación con nuestra investigación, se han reportado que la aplicación de quitosano en Chile ha mejorado el crecimiento vegetativo, tanto en la altura como en el diámetro del tallo, de igual manera para el cultivo de tomate, se ha demostrado que incrementa el crecimiento y el número de flores (Monirul, 2018). La opinión de este estudio se ajusta a los hallazgos obtenidos de nuestra investigación, en la que se evidencia que el quitosano tiene ventajas en las características morfológicas para el cultivo

de Chile soledad (*Capsicum annuum* L.). Asimismo, otro estudio ha revelado que la aplicación de quitosano foliar ha aumentado el crecimiento vegetativo y el rendimiento de pepino. (Shehata *et al.*, 2012), Por su parte (Gamboa-Angulo *et al.*, 2020), evaluó la aplicación de *Bacillus subtilis* en chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). a una concentración de 1×10^{12} UFC mL⁻¹, sus resultados fueron superiores a los presentados en nuestra investigación, comparando los resultados expuestos por Reyes-Pérez, *et al.*, (2020), quien examinó la aplicación del quitosano en el cultivo de tomate, constató que su aplicación a dosis de 150, 200, 250 y 300 mg L⁻¹) presentó un impacto significativo en la altura, incrementando sus valores significativamente ($p \leq 0.05$) en comparación con el testigo. Algunos autores han evidenciado una estimulación del crecimiento y rendimiento mediante la utilización del quitosano en diversos cultivos, tales como tabaco, frijol y maíz (Martínez-González *et al.*, 2018); (Torres-Rodríguez *et al.*, 2018). Se ha señalado que los biofertilizantes microbianos son una opción factible de integrarse a los sistemas de producción para disminuir el uso de fertilizantes químicos, producir alimentos sin afectar el ambiente, a los humanos y a los animales, teniendo un efecto positivo para favorecer el crecimiento (Gamboa-Angulo *et al.*, 2020), En la combinación de quitosano y un consorcio bacteriano, donde se incluye el *Bacillus subtilis*, se ha señalado que éstos son una alternativa para la producción de sorgo de grano (Holguin, 2020), Igualmente se tiene referencia del uso del *Bacillus subtilis* para evaluar la respuesta agronómica del chile dulce bajo invernadero, donde se indica como alternativa para la producción (Lara *et al.*, 2021).

10.5. DETERMINACIÓN DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS

De acuerdo a los resultados obtenidos la mayor concentración de clorofila A se observó en las plantas tratadas con quitosano, de lo contrario en la concentración de clorofila B y A + B la

mayor concentración se observó con el tratamiento combinado Q + BS. Los resultados obtenidos pueden ser justificados por lo demostrado por (Limpanavech *et al.*, 2008). Explica que el quitosano aumenta el diámetro del cloroplasto de la orquídea *Dendrobium* en concentraciones de 10-50 ppm en hojas, además de tener un impacto en la expresión génica de los cloroplastos, lo que puede generar una mayor concentración de clorofila. Por otra parte (Sharp, 2013) (Katiyar, 2015), comprobaron que el quitosano aumenta la fotosíntesis (intercambio gaseoso y reacciones fotoquímicas), en el cultivo maíz, este factor puede deberse por la actuación de las moléculas del quitosano en procesos a nivel fisiológico y molecular de las hojas como un aumento de los mecanismos de defensa frente a especies oxigenadas reactivas (ROS). O bien por la actuación en genes del núcleo y cloroplasto que intervienen en el proceso fotosintético (Chamnanmanoontham *et al.*, 2015). De la misma manera otros estudios señalan que resulta complejo establecer un modelo de respuesta a los efectos del quitosano en los pigmentos fotosintéticos, ya que el impacto se encuentra en función de la especie y la concentración (Arruda *et al.*, 2015). Por otra parte, un estudio llevado a cabo por (Zhang *et al.*, 2008), ha constatado que *Bacillus subtilis* incrementa la capacidad fotosintética, incrementando la eficiencia fotosintética y el contenido de clorofila en *Arabidopsis* esto debido al aumento en el número de cloroplastos. Así mismo, (Mardani-Talaei *et al.*, 2017). Afirma que *Bacillus subtilis* retrasa la senescencia de las hojas por lo que las mantiene verdes por más tiempo, lo cual puede justificar la concentración más alta de clorofila en nuestros tratamientos. Se realizó una comparación con lo demostrado por Mardani-Talaei *et al.*, (2017), quienes evaluaron la aplicación de biofertilizantes entre ellos *Bacillus subtilis* en el cultivo de (*Capsicum annuum* L.). chile pimiento, se demostró que la mayor concentración de clorofila se presentó en la inoculación con *Bacillus subtilis*, estos resultados se asemejan a los nuestros, de la misma manera nuestros resultados son similares

a los reportados por (Cárdenas-Flores *et al.*, 2023), quienes inocularon la cepa LPM1 de *Bacillus subtilis* en las variedades VLK y SVN de pimiento morrón donde encontraron mayor cantidad de clorofila en las plantas inoculadas con *Bacillus subtilis* respecto a su testigo; por el contrario (Hahm, 2017), no halló diferencias significativas en la aplicación de *Bacillus subtilis* en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). Existen investigaciones en cultivos de trébol blanco y maíz que se han demostrado un aumento en el contenido de clorofila con la inoculación de *Bacillus subtilis* (Han *et al.*, 2014), (Ferreira *et al.*, 2018). De los estudios existentes que han demostrado el aumento del contenido de clorofila en diversos cultivos se encuentra el presentado por (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2021), quienes evaluaron nanopartículas de quitosano en germinados de triticale a dosis de 0.2 mg mL^{-1} se demostró que la mayor concentración de clorofila se presentó en la aplicación con quitosano, de igual manera nuestros resultados se asemejan con los reportados por (Dzung *et al.*, 2011), quien evaluó la aplicación de oligómeros de quitosano en plantas de café a diversas concentraciones y el resultado obtenido fue que, al incrementar la dosis, se incrementó la concentración de clorofila A y B, siendo la aplicación más efectiva la dosis de 60 mg L^{-1} . No obstante, los resultados mostrados en nuestra investigación difieren de lo presentado por (Chatelain *et al.*, 2014), que demostró que la aplicación de oligosacáridos de quitosano no alteró las concentraciones de clorofilas A, B en las plantas de frijol, al igual que lo obtenido por Martínez-González *et al.*, (2018), quienes emplearon Quitomax[®] en plantas de frijol en una dosis de 500 mg L^{-1} , sin embargo, no se hallaron diferencias significativas en relación con su testigo.

10.6. DETERMINACIÓN DE NUTRIENTES EN SAVIA

Para la variable conductividad eléctrica (CE), de la savia del peciolo se mostró diferencia únicamente en el tratamiento T a los 105 DDT, siendo este el que mayor conductividad eléctrica presentó. Sin embargo, resulta difícil realizar diversas comparaciones con otros autores debido que no existen estudios similares sin embargo los resultados presentados pueden atribuirse a que los nutrientes que se encuentran presentes en el sustrato (lombricomposta) se encontraban de forma saturada, o asimilables por lo que existió mayor absorción por las plantas, así como al contenido de ácidos húmicos presentes en la lombricomposta brindando así una mayor disponibilidad del magnesio (Mg) el cual interfiere en el transporte de proteínas, mejorando la conductividad eléctrica la que nos indica la concentración de sales disueltas (Proain., 2020). En un estudio para determinar la calidad y el rendimiento de frutos de pimiento morrón, *Capsicum annuum* L., en respuesta a la conductividad de la solución nutritiva, los resultados mostraron que una conductividad eléctrica de 2.0 dS m^{-1} o superior incrementó los compuestos bioactivos, pero disminuyó el rendimiento y la firmeza de los frutos (Preciado *et al.*, 2021); para el presente estudio se encontró que a los 90 DDT el tratamiento de mayor conductividad eléctrica fue el T con ($600 \mu\text{S cm}^{-1}$), presentando diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. Así mismo se menciona que la conductividad eléctrica es un buen indicador de la cantidad de fertilizante disponible para la planta Martínez (2010) en una investigación realizada menciona que un mayor campo de exploración para las raíces le proporciona una conductividad eléctrica adecuada y facilita la absorción de nutrientes. Cabe recalcar que, esto dependerá de las condiciones edáficas del suelo en donde se establezca el cultivo (Stivers, 2017). El pH es un factor importante que influye sobre el crecimiento de los microorganismos. Algunas bacterias

generalmente crecen a pH bajos (3.0); el rango óptimo de pH para las bacterias va de 6.0 hasta 8.5 y sólo pocas prefieren pH de 8.5 o mayor (Cervantes, 2017). Ello es congruente con los datos obtenidos en los tratamientos de esta investigación. Se observó, en general, que la concentración de N-NO_3^- en el extracto celular de pecíolo (ECP) varió. La máxima concentración se presentó en la aplicación con quitosano con 1203 mg L^{-1} . Estos resultados son superiores a los reportados por (Pérez *et al.*, 2005), quien avaluó soluciones nutritivas sin embargo son superiores en comparación con nuestro tratamiento testigo, que fue media de 500. Por otra parte, He *et al.*, (1994), menciona que la concentración de nitratos en plantas de tomate, varían de acuerdo a las cantidades de nitratos agregados en la solución nutritiva. Estas variaciones se detectaron en las etapas vegetativa y al inicio de floración. Cabe tener presente que cuando se aplica fertilizantes con distintos elementos, hay que tener en consideración las compatibilidades entre ellos. Además, hay que tener en cuenta las interacciones iónicas entre los diferentes iones en el suelo. Se ha observado que un aumento de potasio en suelos, reduce la absorción de calcio y magnesio. También que el calcio en exceso insolubiliza los fosfatos del suelo y el exceso de cloro reduce la absorción de NO_3^- . Al contrario, un aumento de nitrógeno en los suelos mejora la absorción de potasio (Alia y García, 2016).

10.7. RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTO

Al analizar el efecto del quitosano en indicadores bioquímicos de la calidad de fruto en el cultivo de tomate, la concentración de grados brix dependiendo de la dosis de quitosano, se encontró entre 5.25 y 3.35 (Reyes *et al.*, 2020). Para el presente estudio se muestra que el valor más alto fue de 105 DDT en el tratamiento con Q, presentando valores superiores a (3 ± 0.03), por lo que no existen estudios que pueda compararse respecto a frutos de chile

soledad con la aplicación de quitosano y *Bacillus subtilis* por lo que se dificulta la comparación con diversos autores. En un estudio en pimiento bajo invernadero, las plantas bioestimuladas en base de algas mostraron un mayor número de frutos comerciales, junto a un índice de área foliar más elevado con respecto al control no bioestimulado (Zapata *et al.*, 2022), esto coincide con los resultados obtenidos en la aplicación de Q, Q+BS y T. Se ha reportado un incremento significativo en el crecimiento y rendimiento del cultivo, sin diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos comparados con el testigo ($P \leq 0,000$). *B. subtilis* aplicado a la raíz y ácido salicílico aplicado al follaje de *A. solani* en plantas de tomate (Espinosa *et al.*, 2020). Por otra parte, los resultados de una investigación indican que, en rendimiento de sorgo y calidad proteica del grano, el tratamiento más eficiente ($P < 0.05$), fue con QUI 100 % + consorcio microbiano utilizando al 50 % una fertilización regional (Holguin, 2020); coincidente con los resultados obtenidos. En un estudio en el cultivo de fresa, al aplicar quitosano se observó. un incremento significativo en el rendimiento respecto al peso de la fruta, rendimiento temprano y total. Aunado al crecimiento vegetativo (longitud de la planta, número de hojas/planta, área foliar, crecimiento radicular, peso fresco y seco) (El-Miniawy, Ragab, Soliman y Metwally, 2013). Por otra parte, se realizó un análisis sobre la aplicación de quitosano y un consorcio microbiano en sorgo, que mostraron que en los tratamientos con quitosano la longitud de la planta aumentó conforme aumenta la concentración en 50 % y 100 %, teniendo una longitud máxima de 22.4. cm. En relación al rendimiento grano kg ha^{-1} está sucede con quitosano al 100 % + consorcio microbiano BAC +50 % de fertilización (Holguin *et al.*, 2020). De ello, se observa que la aplicación del quitosano contribuye a la longitud y al rendimiento similar a lo obtenido en nuestra investigación. En cuanto al peso de fruto se determinó que la aplicación de Q presentó mayor peso en comparación con la aplicación de BS, fue algo

similar a lo obtenido en un estudio donde el quitosano es el segundo bioestimulantes más importante para *Capsicum annuum* L., después del ácido húmico, donde presentó mejores resultados en peso de fruto, al igual que en número de frutos por planta, longitud de fruto y diámetro de fruto (Reyes *et al.*, 2021). Por otra parte, se ha encontrado que el quitosano ejerce un efecto estimulante sobre las variables: altura de la planta, racimos con frutos, frutos por planta, diámetro ecuatorial y polar del fruto, diámetro del pericarpio y masa del fruto (Reyes *et al.*, 2020).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la concentración de capsaicina se tiene que en un estudio Lara *et al.* (2020) encontraron que la aplicación de quitosano incrementó significativamente la síntesis de compuestos fenólicos, incluyendo la capsaicina, en plantas de chile. En su estudio, los niveles de capsaicina aumentaron en un 20% en comparación con el control. Los resultados obtenidos en el primer corte (A1) son consistentes con estos hallazgos, mostrando que el tratamiento con quitosano (Q) resultó en un aumento significativo del contenido de capsaicina en frutos de tamaño chico. por su parte Rives *et al.* (2023) encontraron que los frutos de mayor tamaño tienden a acumular más compuestos bioactivos en respuesta a tratamientos con biofertilizantes. Esto es consistente con los resultados del segundo corte (A2), donde los frutos grandes tratados con Q+BS mostraron mayores niveles de capsaicina en comparación con los tratamientos individuales o el control. Por ultimo, Weigt *et al.* (2020) indicaron que las condiciones controladas de invernadero optimizan la aplicación de biofertilizantes y maximizan su impacto en la producción de compuestos de interés, como la capsaicina. Los resultados de este estudio bajo condiciones de invernadero son coherentes con esta afirmación, mostrando incrementos significativos en el contenido de capsaicina en respuesta a los tratamientos con quitosano y *Bacillus subtilis*.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se logró obtener quitosano de exoesqueletos de camarón mediante el proceso de hidrólisis química, con una pureza superior al 80%, caracterizado mediante espectroscopia FTIR.
2. La pureza del quitosano obtenido fue satisfactoria y desempeñó un papel importante en el crecimiento y rendimiento de las plantas de chile soledad.
3. La aplicación conjunta de quitosano y *Bacillus subtilis* aumentó los parámetros morfológicos de las plántulas de chile soledad, incluyendo altura, diámetro del tallo y número de hojas.
4. En términos de calidad de fruto, los mejores valores se obtuvieron con la combinación de quitosano y *Bacillus subtilis* en parámetros fisicoquímicos, aunque no se observaron diferencias en parámetros morfológicos en comparación con su aplicación individual.

12. LITERATURA CITADA

- Ahemad, M. y. Khan, M. S. (2010). Plant growth promoting activities of phosphate-solubilizing *Enterobacter asburiae* as influenced by fungicides. *EurAsian J BioSci*, 4, 88-95.
- Aksakal, E. L. (2016). Effects of vermicompost application on soil aggregation and certain physical properties. *Land Degrad. Dev.* 27: 983-995.
- Alemán-Pérez, R. D. Domínguez Brito, J, Rodríguez, Guerra, Soria Re, S, Torres Gutiérrez, R, Vargas Burgos, J. C, Bravo-Medina, C, y Alba-Rojas, J. L. (2018). Indicadores morfofisiológicos y productivos del pimiento sembrado en invernadero y a campo abierto en las condiciones de la Amazonía ecuatoriana. *Centro Agrícola*, 45(1), 14-23.
- Ali, U., Sajid, N., Khalid, A., Riaz, L., Rabbani, M.M., Syed, J.H., y Malik, R.N. (2015). A review on vermicomposting of organic wastes. *Environ. Prog. Sustain.* 34: 1050-1062.
- Alia, C., y García, V. (2016). Liberación de fertilizantes a través de biomembranas de quitosano. Obtenido de CONAMA: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998973494.pdf>
- Allard-Massicotte, R. L. (2016). *Bacillus subtilis* early colonization of *Arabidopsis thaliana* roots involves multiple chemotaxis receptors. *MBio* 7: 1-10.
- Alloush, G. A., Zeto, S. K., y Clark, R. B. (2000). Phosphorus source, organic matter, and arbuscular mycorrhizal effects on growth and mineral acquisition of chickpea grown in acidic soil. *Journal of Plant Nutrition*. 23(9):1351-1369.
- Álvarez Herrera, J. G., Vélez, J. E., y Jaime Guerrero, M. (2022). Characterization of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits from plants irrigated with different regimens and calcium doses. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*.
- Álvarez, J., Castro, O. N., y Gómez, O. T. (2019). Adsorción de azul de metileno con biopolímeros (quitosano calcáreo y quitosano) obtenidos de las cabezas de langostinos a nivel piloto. *Revista Iberoamericana de Polímeros*.
- Alvarez-Pinedo, A., Calderón Puig, A. A., Fundora Sánchez, L. R., y Rodríguez Fajardo, A (2018). Manejo de bioproductos en el cultivo del pimiento (*Capsicum annuum* L.) en condiciones de organopónico Management of bioproducts in the pepper cultivation (*Capsicum annuum* L.) under organoponic conditions. *Agroecosistemas*, 6(2), 121-127.
- Amador-Mendoza, A., Huerta-Ochoa, S., Herman-Lara, E., Membrillo-Venegas, I., Aguirre-Cruz, A., Vivar-Vera, M.A., y Romero-Coutiño, L. (2016). Efecto de la purificación

química, biológica y física en la recuperación de quitina de exoesqueletos de camarón (*Penaeus sp*) y chapulín (*Sphenarium purpurascens*). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 15(3), 711-725.

Antony, R. T. (2019). A review on applications of chitosan-based Schiff bases. *Int. J. Biol.*

AOAC. Association of Official Analytical Chemist (2005). *Methods of Analysis* (15th ed.). Washington, D.C. AOAC 33, 749, 2005. Moisture in Flour, AOAC 7,132, 2005. Ash of Flour, AOAC, 37,924 Acidity (Titrable) of Fruit Product, AOAC 43, 689, 2005. Microchemical Determination of Nitrogen.

Armenta-Bojórquez, A. D., García-Gutiérrez, C., Camacho-Báez, J.R., Apodaca-Sánchez, M.Á., Gerardo-Montoya, L., y Nava-Pérez, E. (2010). Biofertilizantes en el desarrollo agrícola de México. *Ra Ximhai*, 6(1), 51-56.

Arruda, S. C. C., Silva, A. L. D., Galazzi, R. M., Azevedo, R. A., y Arruda, M. A. Z. (2015). Nanoparticles applied to plant science: a review. *Talanta*, 131, 693-705.

Barka Abdel-Mawgoud, A. M. R., Tantawy, A. S., El-Nemr, M. A., y Sassine, Y. N. (2010). Growth and yield responses of strawberry plants to chitosan application. *European Journal of Scientific Research*, 39(1), 170-177.

Barka, A. P. (2004). Chitosan improves development, and protects *Vitis vinifera* L. against *Botrytis cinerea*. *Plant Cell Reports*, 22: 608–614.

Barleany, Dhena Ria, Alim, Intan, Rizkiyah, Nida, Lusi, Utami, Heriyanto, Heri & Erizal, Erizal. (2016). Chitosan-Graft-Poly (Acrylic Acid) Superabsorbent Hydrogel with *Antimicrobial Activity*. 654-661. 10.21063/ICTIS.2016.1099.

Barra, A., Romero, A., y Beltramino, J. (2012). Obtención de quitosano. Sitio Argentino de Producción Animal. Obtenido de https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/173-Quitosano.pdf

Bashan, Y. Holguin, G., y Ferrera-Cerrato, R. (1996). Interacciones entre plantas y microorganismos benéficos. *Terra*, 14(2), 159-192.

Benhamou, N. (1992). Ultrastructural and cytochemical aspects of chitosan on *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*, agent of tomato crown and root rot. *Phytopathology* (USA).

Berendsen, R. L., y Pieterse, C. M. J, Bakker Pahm (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends Plant Sci*, 17, 478-48610.

Cárdenas-Flores, A., Ruíz-Salas, C. E., Vázquez-Lee, J., Baylón-Palomino, A., Mounzer, O., Flores-Olivas, A., y Valenzuela-Soto, J. H. (2023). *Bacillus subtilis* LPM1 differentially promotes the growth of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) varieties under shade house. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2232165.

- Carmo, B. de A. do, Rocha, P. C., Flores, E. F., & Santos, A. A. dos. (2021). Vulnerabilidade à contaminação por agrotóxicos da rede de drenagem na unidade de gerenciamento de recursos hídricos pontal do paranapanema – Sao Paulo. *Caderno Prudentino De Geografia*, 3(43), 201–223. Recuperado de <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/771>
- Castillo, I. E. P., Narváez, G. E. C., Morillo, M. D. J. L., Márquez, A. C. L., Cantillo, L. C. M., Bonilla, A. L. V., y Salas, N. M. (2020). Influencia de tratamientos químicos sobre el rendimiento y calidad del quitosano de exoesqueletos de cangrejos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 37, 100-106.
- Castillo-Aguilar, C. D. (2015). Producción de planta de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agro Productividad*, 8(4). *Obtenido de Agro Productividad*.
- Castro, M. N., y Vidal, C. C. (2015). Obtención y caracterización de quitina y quitosano del *Emerita analoga* a escala piloto. *Tzhoeoen*, 7(2), 182-197.
- Cervantes, J. O. (2017). Acerca del desarrollo y control de microorganismos en la fabricación de papel. *ConCiencia Tecnológica*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/944/94454631001/html/#:~:text=El%20pH%20es%20un%20factor,pH%20de%208.5%20o%20mayor>
- Chamnanmanoontham, N., Pongprayoon, W., Pichayangkura, R., Roytrakul, S., y Chadchawan, S. (2015). Chitosan enhances rice seedling growth via gene expression network between nucleus and chloroplast. *Plant Growth Regulation*, 75, 101-114.
- Chandrkrachang, S., Sompongchaiyakul, P., y Sangtain, S. (2005). Profitable spin-off from using chitosan in orchid farming in Thailand. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 15(1), 45-48.
- Chatelain, P. G., Pintado, M. E., y Vasconcelos, M. W. (2014). Evaluation of chitoooligosaccharide application on mineral accumulation and plant growth in *Phaseolus vulgaris*. *Plant Science*, 215, 134-140.
- Chávez, E. S., Monreal, L. R., Rangel, P. P., Parra, J. M. S., Álvarez, S. P., Córdova, M. A. F., y Figueroa, K. I. H. (Eds.). (2018). *de la obra. Soil Sci*, 3(6), 192-199.
- Checinska, A., Paszczynski, A., y Burbank, M. (2015). *Bacillus* and Other Spore-Forming Genera: Variations in Responses and Mechanisms for Survival. *Annual review of food science and technology*. 6:351– 369. 2015.
- Chibuet, H. S. (2000). Effects of chitosan application on growth and chitinase activity in several crops. . *Marine & Highland Bioscience Center Report*, 12: 27-35.
- Chung, Y. C., Su Y.P., Chen, C.C., Jia, G., Wang, H. I., Wu, J. G., y Lin, J. G. (2004). Relationship between antibacterial activity of chitosan and surface characteristics of

- cell wall. *Acta pharmacologica sinica*, 25(7), 932-936. Obtenido de *Acta pharmacologica sinica*.
- Cisneros-Pérez, I., Curbelo-Hernández, C., Andrade-Díaz, C., y Giler-Molina, J. M. (2019). Evaluación de la extracción enzimática de quitina a partir del exoesqueleto de camarón. *Centro azúcar*, 46(1), 51-63.
- Colina, M. A. (2014). Evaluación de los procesos para la obtención química de quitina y quitosano a partir de desechos de cangrejos. Escala piloto e industrial. *Revista Iberoamericana de polímeros*.
- Corrales-Rodríguez, M. A. (2019). Mejoramiento de chile de árbol y soledad a través de cruza intervarietales (*Master's thesis*).
- Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, A., Bugarín-Montoya, R., Pineda-Pineda, J., Flores-Canales, R., Juárez-López, P., y Alejo-Santiago, G. (2014). Concentración nutrimental foliar y crecimiento de chile serrano en función de la solución nutritiva y el sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 289-295.
- Da Silva, Lucas, A. J., Oreste, E. Q., Costa, H.L.G., López, H.M., Saad, C.D.M., y Prentice, C. (2021). Extraction, physicochemical characterization, and morphological properties of chitin and chitosan from cuticles of edible insects. *Food Chemistry*, 343, 128550.
- De Castro, R. J., Ohara, A., Aguilar, J. G., y Domingues, M. A. (2018). Nutritional, functional and biological properties of insect proteins: Processes for obtaining, consumption and future challenges. Obtenido de *Trends in Food Science y Technology*: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.006>
- Dircio, A. B., Jiménez, J. T., Barrera, M. Á. R., Flores, G. H., Hernández, E. T., Alberto, F. P., y Ramírez, Y. R. (2021). *Bacillus licheniformis* M2-7 improves growth, development and yield of *Capsicum annuum* L. *Agrociencia*, 55(3), 227-242.
- Dupont. (2014). *Plásticos, polímeros y resinas*. <http://www.dupont.mx/>. Página consultada: 5 de Junio de 2023.
- Dzung, N. A., Khanh, V. T. P., y Dzung, T. T. (2011). Research on impact of chitosan oligomers on biophysical characteristics, growth, development and drought resistance of coffee. *Carbohydrate polymers*, 84(2), 751-755.
- Edmond, J. B. (1988). Principios de horticultura. *CECSA*. (No. 635 Ed56p Ej. 3 012834).
- El-Miniawy, S. M., Ragab, M. E., Youssef, S. M., & Metwally, A. A. (2013). Response of strawberry plants to foliar spraying of chitosan. *Res. J. Agric. Biol. Sci*, 9(6), 366-372.
- Espadas, R. L. (2014). Comportamiento del chile X' cat ik bajo condiciones de invernadero.

- Espinoza-Ahumada, César Alejandro, Gallegos-Morales, Gabriel, Ochoa-Fuentes, Yisa María, Hernández-Castillo, Francisco Daniel, Méndez-Aguilar, Reinaldo, & Rodríguez-Guerra, Raúl. (2019). Microbial antagonists for the biocontrol of wilting and its promoter effect on the performance of serrano chili. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(spe23), 187-197.
- Esquivel-Cote, R., Gavilanes-Ruiz, M., Cruz-Ortega, R y Huante, P. (2013). Importancia agrobiotecnológica de la enzima ACC desaminasa en rizobacterias, una revisión. *Revista fitotecnica mexicana*, 36(3), 251-258.
- FAO, F. a. (2021). Food and Agriculture Organization (FAO). Obtenido de <http://www.fao.org>
- Ferreira, N. C., Mazzuchelli, R. D. C. L., Pacheco, A. C., Araujo, F. F. D., Antunes, J. E. L., y Araujo, A. S. F. D. (2018). *Bacillus subtilis* melhora a tolerância do milho a salinidade. *Ciência Rural*, 48, e20170910.
- Gallardo, M. G., Barbosa, R. C., Fook, M. V., y Sabino, M. A. (2019). Síntesis y caracterización de un novedoso biomaterial a base de quitosano modificado con aminoácidos. Obtenido de <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190003.0710>
- Gamboa-Angulo, J., Ruíz-Sanchez, E., Alvarado-López, C., Guitiérrez-Miceli, F., Ruíz-Valviviezo, V.M., y Medina- Dzúl, K. (2020). Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat' ik (*Capsicum annuum* L.). Obtenido de *Terra Latinoamericana*. 38(4), 817-826.
- Garay-Arroyo, A., de la Paz Sánchez, M., Gracia-Ponce, B., Álvarez-Buylla, E. R., y Gutiérrez, C. (2014). La homeostasis de las auxinas y su importancia en el desarrollo de *Arabidopsis thaliana*. *Revista de educación bioquímica*, 33(1), 13-22.
- Giraldo, J. (2015). Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano. *Appl. Chitosan*.
- González, P. (2019). Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes. Asesoría *Técnica Parlamentaria*. 1(1), 1-5.
- González, M., y Silva, J. (2023). Síntesis de nanopartículas de magnetita recubiertas de quitosano para la adsorción de cromo hexavalente. *Perfiles*. 1(29), 78-89.
- González-Peña, D. D. Costales y A.B Falcón. (2014). Influencia de un polímero de quitosana en el crecimiento y la actividad de enzimas defensivas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cult. Trop*. 35: 35-42.
- González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Pérez-Morales, R., Vázquez-Vázquez, C., Gallegos-Robles, M. A., López-Martínez, J. D., y García-Hernández, J. L. (2015). Measurement of capsaicinoids in chiltepin hot pepper: a comparison study between

spectrophotometric method and high performance liquid chromatography analysis. *Journal of Chemistry*.

- GRIN. (2014). National Plant Germplasm System: Peppers. Germplasm Resources Information Network. Obtenido de <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxonomydetail.aspx?id=8904>.
- Gustavo-González, L., Paz-Martínez, I., Boicet-Fabré, T., Jiménez-Arteaga, M. C., Falcón-Rodríguez, A., y Rivas-García, T. (2021). Efecto del tratamiento de semillas con QuitoMax® en el rendimiento y calidad de plántulas de tomate variedades ESEN y L-43. *Terra Latinoamericana*, 39.
- Hahm, M. S. (2017). Alleviation of salt stress in pepper (*Capsicum annum* L.) plants by plant growth-promoting rhizobacteria. *Journal of microbiology and biotechnology*, 27(10), 1790-1797.
- Han, Q. Q., Lü, X. P., Bai, J. P., Qiao, Y., Paré, P. W., Wang, S. M., Wang, Z. L. (2014). Beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GB03) augments salt tolerance of white clover. *Frontiers in plant science*, 5, 525.
- He, Y., K. Terabayashi y T.H. Namiki. 1994. Fundamental study for diagnosis on nutrient status of tomatoes cultured in hidropónics. Science report Kyoto. *Prefectural University Agric.* 46: 7-14.
- Helander, I. M., Nurmiaho-Lassila, E. L., Ahvenainen, R., Rhoades, J., y Roller, S. (2001). Chitosan disrupts the barrier properties of the outer membrane of Gram-negative bacteria. *International journal of food microbiology*, 71(2-3), 235-244.
- Hernández-Cocoletzi, H., Águila Almanza, E., Flores Agustín, O., Viveros Nava, E. L., y Ramos Cassellis, E. (2009). Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón. *Superficies y vacío*, 22(3), 57-60.
- Hidaka M, Kojima M, Sakai S, y Delattre C. (2024). Characterization of Chitosan Hydrogels Obtained through Phenol and Tripolyphosphate Anionic Crosslinking. *Polymers*. 1274.
- Holguin, R. V. (2020). Efecto de quitosano y consorcio simbiótico benéfico en el rendimiento de sorgo en la zona indígena “Mayos” en Sonora. *Terra Latinoamericana*.
- INEGI. (2022). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/>
- INIFAP. (2019). Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pesqueras. Obtenido de <https://www.gob.mx/inifap>
- Izquierdo-Oviedo, H., Calaña-Janeiro, V. M., Lluvia de Abril, A., Rodríguez-Hernández, M., Rodríguez-Llanes, Y., Guillama-Alonso, R. y Urra-Zayas, I. (2022). Utilización de

- bioestimulador del crecimiento QuitoMax® en la aclimatización de plántulas de pimiento. *Cultivos Tropicales*, 43(2), e05-e05.
- Jha, C. K., y Saraf, M. (2015). Plant growth promoting rhizobacteria (PFPR). *Agric. Res. Dev*, 5, 108-119.
- Jiang, CH, Xie YS, Zhu K, Wang N, Li ZJ, Yu GJ, Guo, JH. (2019). Volatile organic compounds emitted by *Bacillus* sp. JC03 promote plant growth through the action of auxin and strigolactone. *Plant Growth Regulation* 872: 317-328.
- Jiménez, N. I., Guevara González, R. G., & Rico García, E. (2024). El ADN extracelular: un elicitador novedoso en la agricultura. *Perspectivas De La Ciencia Y La Tecnología*, 7(12), 26-39.
- Juárez-López, P., Bugarín Montoya, R., Castro Brindis, R., Sanchez Monteon, A. L., Cruz Crespo, E.L.I.A., Juarez Rosete, C. R., Y Balois Morales, R.O.S.E.N.D.O. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *CONACYT*.
- Katiyar, D. H. (2015). Chitosan as a promising natural compound to enhance potential physiological responses in plant: a review. *Indian J Plant Physi* 20(1):1–9.
- Kong, M., Chen, X. G., Xing, K., y Park, H. J. (2010). Antimicrobial properties of chitosan and mode of action: a state of the art review. *International journal of food microbiology*. 144(1), 51-63.
- Kumar, R., Xavier, K. M., Lekshmi, M., Balange, A., y Gudipati, V. (2018). Fortification of extruded snacks with chitosan: Effects on techno functional and sensory quality. *Carbohydrate polymers*, 194., 273.
- Lara, L., Zulueta, R., Murillo, B., Romero, M., y Rivas, T. y. (2021). Respuesta agronómica del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación de *Bacillus subtilis* y lombricomposta en invernadero. *Terra Latinoamericana* 38(3). 693-704.
- Lara-Capistrán, L., R. Zulueta-Rodríguez, B. Murillo-Amador, M. Romero-Bastidas, T. Rivas-García y L.G. Hernández-Montiel. (2020). Respuesta agronómica del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación de *Bacillus subtilis* y lombricomposta en invernadero. *Terra Latinoamericana Número Especial* 38-3: 693-704.
- Layton, C. M. (2011). *Bacillus spp.*; perspectiva de su efecto biocontrolador mediante antibiosis en cultivos afectados por fitopatógenos. *Nova*, 9(16), 177-187.
- Li, Y. X G., Chen, N., Liu, C. S., Liu, C. G., Liu, X. H., Meng, L. J., Kenendy. (2007). Physicochemical characterization and antibacterial property of chitosan acetates. *Carbohydrate Polymer* 67: 227–232.
- Limpanavech, P., Chaiyasuta, S., Vongpromek, R., Pichyangkura, R., Khunwasi, C., Chadchawan, S.,y Bangyeekhun, T. (2008). Chitosan effects on floral production,

- gene expression, and anatomical changes in the *Dendrobium* orchid. *Scientia horticulturae*, 116(1), 65-72.
- Lisboa, M. (2003). Efectividad de *Bacillus subtilis* y de una cepa nativa de *Trichoderma harzianum* sobre la incidencia y severidad de pudrición gris (*Botrytis cinerea*) en vid vinera. Universidad de Talca Facultad de Ciencias Agrarias Escuela de Agronomía. Chile.
- Lockwood, G. B. Bunrathap, S., Songsak, T., y Ruangrunsi N. (2007). Production of d-Limonene in chitosan elicited *Citrus japonica* suspension cultures. *Journal of Essential Oil Research*, 19(2), 113-116.
- López-Corona, B. E., I. Mondaca-Fernández, P. Gortáres-Moroyoqui, M.M. Meza-Montenegro, J.J. Balderas-Cortés y E.O. Rueda-Puente. (2019). Enraizamiento de esquejes de *Salicornia bigelovii* (Torr.) por quitosano como un bioproducto de origen marino. *Terra Latinoamericana* 37: 361-369.
- López-Jácome, L. E., Hernández-Durán, M., Colín-Castro, C.A., Ortega-Peña, S., Cerón-González G., y Franco-Cendejas, R. (2014). Las tinciones básicas en el laboratorio de microbiología. *Investigación en discapacidad*, 3(1), 10-18.
- López-Valenzuela, J. Á., Valverde Juárez, F. J., Mejía Torres, S. L., López Angulo, G., y Vega García, M. O. (2011). Efecto del almacenamiento en atmosfera controlada sobre la calidad postcosecha nutricional del tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17 (2): 115-128.
- Lucy, M. Reed, E., Y Glick, B. R. (2004). Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van leeuwenhoek*, 86(1), 1-25.
- Luna Martínez, L., Martínez Peniche, R. A., Hernández Iturriaga, M., Arvizu Medrano, S. M., Pacheco Aguilar, J. R. (2017). Caracterización de rizobacterias aisladas de tomate y su efecto en el crecimiento de tomate y pimiento. *Revista fitotecnica mexicana*. 36(1):63-69.
- Luna, M. (2012). Obtención de quitosano a partir de quitina para su empleo en conservación de frutillas y moras. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad Central del Ecuador.
- Luo, Q. W. (2019). Comparison of the physicochemical, rheological, and morphologic properties of chitosan from four insects. *Carbohydrate Polymers*, 209, 266-275.
- Mardani-Talaei, M., Razmjou, J., Nouri-Ganbalani, G., Hassanpour, M., y Naseri, B. (2017). Impact of chemical, organic and bio-fertilizers application on bell pepper, *Capsicum annuum* L. and biological parameters of *Myzus persicae* (Sulzer)(Hem.: Aphididae). *Neotropical entomology*, 46, 578-586.
- Martínez, A. G., Díaz, G. C., y y Ramírez, R. L. (2019). Estudio comparativo de obtención, caracterización y actividad antioxidante de quitosano a partir de exoesqueletos de

camarón estero y camarón de altamar. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4(1), 1002-1013.

- Martínez-González, L., Reyes-Guerrero, Y., Pérez-Domínguez, G., García, M. C. N., y Núñez-Vázquez, M. D. L. C. (2018). Influencia del Biobras-16® y el QuitoMax® en aspectos de la biología de plantas de frijol. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 108-112.
- Martínez-Robinson, K., Martínez-Inzunza, A., Rochín-Wong, S., Rodríguez-Córdova, R. J., Vásquez-García, S. R., y Fernández- Quiroz, D. (2022). Physicochemical study of chitin and chitosan obtained from California brown shrimp (*Farfantepenaeus californiensis*) exoskeleton. *Biotecnia*, 24(2), 28-35.
- Maurya, V. K., Gothandam, K. M., Ranjan, V., Shakya, A. y Pareek, S. (2018). Effect of drying methods (microwave vacuum, freeze, hot air and sun drying) on physical, chemical and nutritional attributes of five pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum*) cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(9), 3492-3500.
- Mejía, M. C. (2022). *Bacillus spp.* en el crecimiento y rendimiento de *Capsicum chinense* Jacq. *Revista Mexicana de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. 13(1).
- Mohammadi, K. y Sohrabi, Y. (2012). Bacterial biofertilizers for sustainable crop production. a review. *ARPJ Agric Biol Sci*, 7(5), 307-316.
- Molina, J. M. (2017). Efecto del uso de quitosano en el mejoramiento del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L. variedad sd20a). *Rev. Invest. Agr. Amb.* 8: 151-165.
- Monirul, I. H. (2018). Estudios sobre rendimiento y atributos de rendimiento en tomate y chile mediante aplicación foliar de oligoquitosano. . *Biological and Pharmaceutical sciences*. 3(3):20-28.
- Moreno, R. A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*. Vol. 15. Núm. 29. Torreón, México.
- Moreno-Velandia, C. A., Cotes, A. M., Beltrán- Acosta, C., Bettiol, W., y Elad Y. (2018). Control biológico de fitopatógenos del suelo. *Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaros: agentes de control biológico*, 1, 144-220.
- Munemasa, S., Oda, K., Watanabe-Sugimoto, M., Naramura, Y., Shimoishi, Y., y Murata, Y. (2007). The coronatine-insensitive 1 mutation reveals the hormonal signaling interaction between abscisic acid and methyl jasmonate in Arabidopsis guard cells. Specific impairment of ion channel activation and second messenger production. *Plant physiology*, 143(3), 1398-1407.
- Ndeddy A. R. y Babalola O, O. (2016). Effect of bacterial inoculation of strains of *Pseudomonas aeruginosa*, *Alcaligenes faecalis* and *Bacillus subtilis* on germination, growth and heavy metal (Cd, Cr, and Ni) uptake of *Brassica juncea*. *Int. PeerJ*. 7: e7258.

- NMX-FF-025-2015. (2015). Norma Oficial Mexicana NMX-FF-025-2015, Productos alimenticios no industrializados para uso humano. Fruta fresca. Chile (*Capsicum* spp.) especificaciones. (cancela a la NMX-FF-025-SCFI-2007). Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5379404&fecha=23/01/2015.
- Olivera, L. (2007). Manual de producción de chile en invernadero. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro Qro. 102 p.
- Peña-Yam, L. P., Ruiz-Sánchez, E., Barboza-Corona, J.E., y Reyes-Ramírez, A. (2016). Isolation of mexican *Bacillus* species and their effects in promoting growth of chili pepper (*Capsicum annuum* L. cv Jalapeño). *Indian journal of microbiology*, 56, 375-378.
- Pérez, B. B. A., Alcántar-González, G., Sánchez-García, P., Tijerina-Chávez, L., Castellanos-Ramos, J. Z., y Maldonado-Torres, R. (2005). Nitratos en soluciones nutritivas en el extracto celular de peciolo de chile. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 469-476.
- Pérez, W. A., Marín, J. A., López, J. N., Burgos, M. A., y Rios, L. A. (2022). Development of a pilot-ecofriendly process for chitosan production from waste shrimp shells. *Environmental Processes*, 9(3), 55.
- Pérez-Castañeda, L. M., Castañón- Najera, G., Ramírez-Meraz, M., y Mayek- Pérez, N. (2015). Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad genética de *Capsicum* spp. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(4), 117-128.
- Pérez-Cordero, A. Rojas Sierra, J., Rodríguez Ruiz, J., Arrieta Alvarez, I., y Arrieta Alvarez, Y. (2014). Actividad antibacteriana de soluciones ácidas de quitosano obtenido de exoesqueleto de camarón. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 16(1), 104-110.
- Pichyangkura, R. y. (2015). Biostimulant activity of chitosan in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 196: 49- 65.
- Poopathi, S., y Archana, B. (2012). A novel cost-effective medium for the production of *Bacillus thuringiensis* subsp. *israelensis* for mosquito control. *Trop Biomed*, 29(1), 81-91.
- Porra, R. J. (2002). La accidentada historia del desarrollo y uso de ecuaciones simultáneas para la determinación precisa de las clorofilas a y b. *Investigación de la Fotosíntesis*, 73 (1):149-156.
- Pospieszny, H., Chirkov, S., y Atabekov J. (1991). Induction of antiviral resistance in plants by chitosan. *Plant Science*, 79(1), 63-68.
- Prakash, J., y Arora, N. k. (2019). Phosphate-solubilizing *Bacillus* sp. enhances growth, phosphorus uptake and oil yield of *Mentha arvensis* L. *Biotech*, 9(4), 126.

- Preciado, P., Rueda, E., Valdez, L., Reyes, J., y Gallegos, M. y. (2021). Conductividad eléctrica de la solución nutritiva y su efecto en compuestos bioactivos y rendimiento de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(52). 1-12.
- Proain. (2020). Como detectar las deficiencias de los nutrientes en la lechuga. Mexico: [sin editorial].
- Ramakrishna, W. Rathore P, Kumari R, Yadav R. (2020). Brown gold of marginal soil: Plant growth promoting bacteria to overcome plant abiotic stress for agriculture, biofuels and carbon sequestration. *Science of The Total Environment* 711:135-162.
- Ramírez Rodríguez, S. C., Ortega Ortiz, H., Fortis Hernández, M., Nava Santos, J. M., Orozco Vidal, J. A., y Preciado Rangel, P. (2021). Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(4), 579-589.
- Reyes, J., Enriquez, E., Ramírez, M., Zúñiga, E., y Capistrán, L. y. (2020). Efecto del quitosano sobre variables de crecimiento, rendimiento y contenido nutricional del tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(3). 457-465.
- Reyes-Pérez, J. J., Enríquez-Acosta, E. A., Ramírez-Arrebató, M. Á., Rodríguez-Pedroso, A. T., y Rivero-Herrada, M. (2019). Respuesta de plántulas de cultivares de tomate a la aplicación de quitosano. *Centro Agrícola*, 46(4), 21-29.
- Reyes-Perez, J. J., Rivero-Herrada, M., Andagoya Fajardo, C.J., Beltrán-Morales, F.A., Hernández-Montiel, L. G., García Liscano, A. E., y Ruiz-Espinoza, F. H. (2021). Emergencia y características agronómicas del *Cucumis sativus* a la aplicación de quitosano, *Glomus cubense* y ácidos húmicos. *Biotechnia*, 23(3), 38-44.
- Reyes-Pérez, J. J., Rivero-Herrada, M., García-Bustamante, E. L., Beltran-Morales, F. A., y Ruiz-Espinoza, F. H. (2020). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero. *Biotechnia*, 22(3), 156-163.
- Rincón, V. H. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI.
- Rivas-García, T., González-Gómez, L. G., Boicet-fabré, T., Jiménez-Arteaga, M. C., Falcón-Rodríguez, A.B., y Terrero-Soler, J.C. (2021). Respuesta agronómica de dos variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la aplicación del bioestimulante con quitosano. *Terra Latinoamericana*, 39.
- Rives-Castillo SCH, Correa-Pacheco ZN, Corona-Rangel ML, Hernández-López M, Barrera-Necha LL, Ventura-Aguilar RI, Bautista-Baños S. The Effect of Netting Bags on the Postharvest Quality, Bioactive and Nutritional Compounds, and the Spoilage Microorganisms Content of Bell Peppers. *Foods*. 2023 May 21;12(10):2071

- Roacho-Cortés, E., Castellanos-Ramos, J. Z. y Etchevers-Barra, J. D. (2021). Field diagnostic techniques to determine nitrogen in maize. *Revista Terra Latinoamericana*. 39.
- Romero-Serrano, A. y Pereira., J. (2020). Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones. *Revista INGENIERÍA UC*, 27(2).
- Roychowdhury, D. Mondal, S. y Banerjee, S.K. (2017). The effect of biofertilizers and the effect of vermicompost on the cultivation and productivity of maize-a review. *Adv. Crop Sci. Technol.* 5: 1-4.
- Sharp, R. (2013). A review of the applications of chitin and its derivatives in agriculture to modify plant-microbial interactions and improve crop yields. *Agronomy* 3:757–793.
- Shehata, S., Fawzy, Z., y El-Ramady H. (2012). Respuesta de las plantas de pepino a la aplicación foliar de quitosano y levadura en condiciones de invernadero. *Revista australiana de ciencias básicas y aplicadas*. 4: 63-71.
- Shen, Y., Mao, L., Zhou, Y., Sun, Y., Lv, J., Deng M, Liu, Z, Yang B. Transcriptome Analysis Reveals Key Genes Involved in Trichome Formation in Pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plants*. 2024; 13(8):1090. <https://doi.org/10.3390/plants13081090>
- SIAP, S. d. (2022). Atlas agroalimentario <http://siap.gob.mx/>. Obtenido de Atlas agroalimentario <http://siap.gob.mx/>
- Sierra, E. (2008). Evaluación de dos niveles de *Bacillus subtilis* adicionados a la alimentación en la producción y calidad de la leche bovina en Finca San Julián, Patulul, Suchitepéquez.
- Silva Garza, M. H., Gámez González, H., Zavala García, F., Cuevas Hernández, B., y Rojas Garcidueñas, M. (2001). Efecto de cuatro fitorreguladores comerciales en el desarrollo y rendimiento del girasol. Departamento de Botánica F. *Ciencias Biológicas UANL*, 4(1), 69-75.
- Soares, Ricardo, Santos, María Carla Barreto, Lewis Maddock, John Edmund, Machado, Wilson, Bertolino, Luiz Carlos, Campos, David Vilas Boas de, Freire, Aline Soares, & Santelli, Ricardo Erthal. (2020). Potential mobility and toxicity risk of metal pollutants in soils from a tropical area affected by industrial wastes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(4), 857-864. Epub 13 de septiembre de 2021. <https://doi.org/10.20937/rica.53659>
- Sosa, M. R. (2019). Germinación, crecimiento y producción de glucanasas en *Capsicum chinense* Jacq. inoculadas con *Bacillus* spp. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(16). 137–143.
- Steiner, A. A. (1984). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15, 134-154.

- Stivers, L. (2017). Introducción a los Suelos: El Manejo de los Suelos. <https://extension.psu.edu/introduccion-a-los-suelos-elmanejo-de-los-suelos>. USDA.
- Suárez-Villa, A. J., Cuenca-Nevárez, G. J., Macias, R. R., y Falcones-Molina, E. L. (2023). caracterización de la harina de exoesqueleto de camarón (*Litopenaeus* sp). *MQRInvestigar*, 7(2), 1408-1432.
- Swart, E. D. (2004). Estimación no destructiva del área foliar para plantas de diferentes edades y accesiones de *Capsicum annuum* L. *The Journal of Horticultural Science and Biotechn.*
- Swart, E. D., Groenwold, R., Kanne, H. J., Stam, P., Marcelis, L. F. y Voorrips, R. E. (2004). Non-destructive estimation of leaf area for plants of different ages and accessions of *Capsicum annuum* L. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79 (5), 764-770.
- Syers, J. K. (2008). Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin*, 18(108).
- Tejera-Hernández, B., Rojas-Badía, M.M., y Heydrich-Pérez, M. (2011). Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 42(3), 131-138.
- Terry-Alfonso, E., Ruiz-Padrón, J., Rivera-Espinosa, R., Falcón-Rodríguez, A., y Carrillo Sosa, Y. (2021). Bioproductos como sustitutos parciales de la nutrición mineral del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Acta Agronómica*, 70(3), 266-273.
- Thuy, T. L., y Kenji, M. (2015). Effect of high temperature on fruit productivity and seed-set of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in the field condition. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5(12), 515-520.
- Torres, B. S. O., Torres, O. B., López, J. A. H., y Esteban, P. P. (2023). Obtención de quitosano a partir de residuos pesqueros y su valoración potenciométrica. *Brazilian Journal of Science*, 2(2), 32-38.
- Torres-Rodríguez, J. A., Reyes-Pérez, J. J., González-Gómez, L. G., Jiménez-Pizarro, M., BoicetFabre, T., Enríquez-Acosta, E. A., Rodríguez-Pedroso, A. T., Ramírez-Arrebato, M. A. y González-Rodríguez, J. C. (2018). Respuesta agronómica de dos variedades de maíz blanco (*Zeas mays* L.) a la aplicación de Quitosano, Azofert y Ecomic. *Biotecnia*. 20(1):1-7.
- Tucuch-Haas, C. J., Alcántar-González, G., Ordaz-Chaparro, V. M., Santizo-Rincón, J. A. y Larqué-Saavedra, A. (2012). Production and quality of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) with different NH₄⁺/NO₃⁻ ratios and size of substrate particles. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 9-15.

- Valadez-Sánchez, Y. M., Olivares-Sáenz, E., Vázquez-Alvarado, R. E., Esparza-Rivera, J. R., Preciado-Rangel, P., Valdez-Cepeda, R. D., y García-Hernández, J. L. (2016). Calidad y concentración de capsaicinoides en genotipos de chile Serrano (*Capsicum annuum* L.) producidos bajo fertilización orgánica. *Phyton (Buenos Aires)*, 85(1), 21-26.
- Velasco, J. D. (2019). Producción de quitosano a partir de desechos de camarón generados del procesamiento industrial. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4(1), 897-901.
- Villarreal-Delgado, M. F., Villa-Rodríguez, E.D., Cira-Chávez, L.A., Estrada-Alvarado, M.I., Parra-Cota, F.I., y Santos-Villalobos, S.D.L. (2018). El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista mexicana de fitopatología*, 36(1), 95-130.
- Wagi, S. A. (2019). *Bacillus spp.: potent microfactories of bacterial IAA*. *PeerJ*. 7: e7258.
- Wellburn, A. (1994). La determinación espectral de clorofilas a y b, así como de carotenoides totales, utilizando diversos solventes con espectrofotómetros de diferente resolución. *Revista de Fisiología Vegetal*, 144(3), 307-313.
- Weigt, D.; Siatkowski, I.; Magaj, M.; Tomkowiak, A.; Nawracała, J. Impact of Ionic Liquids on Induction of Wheat Microspore Embryogenesis and Plant Regeneration. *Agronomy* **2020**, 10, 839.
- Xiong, W., Zhao, G.D., Yin, X., Linghu, K.G., Chu, J.m., Wong, G.T., y Wang, Y. T. (2019). Brij-grafted-chitosan copolymers with function of P-glycoprotein modulation: Synthesis, characterization and in vitro investigations. *Carbohydr. Polym.* 204, 89–96.
- Zapata-García, S., Espinosa-Jiménez, P. J., Salvador-Albaladejo, P. J., & Pérez-Pastor, A. (2023). Bioestimulación en pimiento bajo invernadero para una producción sostenible Greenhouse-pepper biostimulation to achieve a sustainable production. In Libro de actas del 11° *Workshop en Investigación Agroalimentaria para jóvenes investigadores* (p. 32).
- Zerpa, J. A. M., Rincón, M. C., y Colina, J. A. V. (2017). Efecto del uso de quitosano en el mejoramiento del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L. variedad sd20a). *Revista de investigación agraria y ambiental*, 8(2), 151-165.
- Zhang, H., Xie, X., Kim, M. S., Korniyev, D. A., Holaday, S., y Paré, P. W. (2008). Soil bacteria augment *Arabidopsis photosynthesis* by decreasing glucose sensing and abscisic acid levels in planta. *The Plant Journal*, 56(2), 264-273.
- Zikakis, J. (2012). Chitin, chitosan, and related enzymes. *Elsevier*.

13. ANEXOS



Figura 17. Tamizado de la muestra para obtener un tamaño de partícula de 250 μm .



Figura 18. Triturado del exoesqueleto de camarón seco.



Figura 19. Lavado con agua de la llave de la muestra después de la desproteinización.



Figura 20. Desproteinización con HCl al 0.4 M.



Figura 21. Desmineralización con HNCI al 4 M.



Figura 22. Desacetilación de la muestra.



Figura 23. Determinación de minerales del quitosano sigma y quitosano obtenido.



Figura 24. Blanqueado de la muestra obtenida.



Figura 21. Medio de cultivo de *Bacillus subtilis*.



Figura 22. Quitosano UNPA.



Figura 27. Bioproductos de *Bacillus subtilis* y quitosano.



Figura 28. Aplicación de los tratamientos a plántulas de chile soledad.



Figura 23. Trasplante a invernadero.



Figura 24. Instalación del sistema de riego.

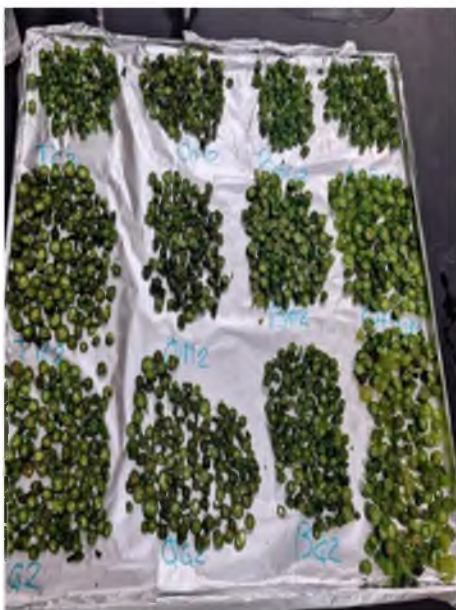


Figura 25. Determinación de capsaicina.



Figura 26. Medición de nutrientes en savia (fosfatos, nitrógeno, potasio, magnesio).

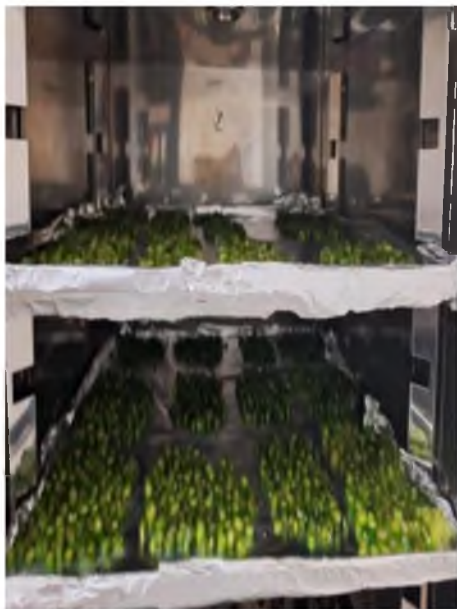


Figura 33. Determinación de capsaicina y corte de chiles.



Figura 34. Secado de las muestras.



Figura 27. Toma de datos morfológicos en plántulas.



Figura 28. Cosechas.