

---

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Coordinación de Riego y Drenaje  
Subcoordinación de Ingeniería de Riego

---

Proyecto interno RD1701.1

---

## Informe Final

---

**CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA AGRICULTURA  
PROTEGIDA PARA LA SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SU  
ADAPTACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

**Jorge Flores Velázquez**

México 2017

## INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Director General

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés

Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Nahún Hamed García Villanueva

Subcoordinador de Ingeniería de Riego

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Jefe de Proyecto

Dr. Jorge Flores Velázquez

---

Participantes del IMTA

Dr. Jorge Flores Velázquez

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

MC Juan Manuel Hernández

Dr. Rene Lobato Sánchez

MC. Luis Gómez Lugo

Dr. Mauro Iñiguez Covarrubias

---

Apoyo Externo

M.I. Abraham Jesús Arzeta Ríos

L.I. María Fernanda Vargas Rodríguez

Ing. Anastasio Toledo Estrada

## ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO .....	1
INTRODUCCIÓN .....	3
1 COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN.....	4
1.1. Información Climatológica.....	4
1.2. Variables descriptivas .....	6
1.2.1. Precipitación .....	7
1.2.2. Temperatura.....	7
1.3. Integración de información en series de datos .....	8
1.3.1. Precipitación .....	8
1.3.2. Temperatura.....	10
1.4. Información agronómica.....	14
1.4.1. Zonas productoras en AP.....	14
1.4.2. Principales tipos de invernaderos .....	17
1.4.3. Cultivo de jitomate .....	22
1.5. Influencia de las variables climáticas en el cultivo .....	26
1.5.1. Radiación Solar .....	27
1.5.2. Humedad Relativa .....	31
1.5.2.1. Humedad ambiental.....	33
1.5.3. Contenido de CO <sub>2</sub> .....	33
1.5.4. Viento .....	34
1.5.4.1. Velocidad del viento.....	34
1.5.4.2. Déficit de presión de vapor (DPV).....	35
1.5.5. Indicadores climáticos .....	35
1.5.5.1. Riesgo de heladas.....	36
1.5.5.2. Riesgo de máxima temperatura.....	39
1.5.6. Indicadores agronómicos .....	43
1.5.6.1. Evaporación máxima.....	43
1.6. Distribución de la superficie Agricultura Protegida en México .....	46
1.6.1. Características de la AP Año 2008 .....	47
1.6.2. Características de la AP en 2012 .....	51
1.6.3. Características de la AP en 2013 .....	54
1.6.4. Características de la AP en 2014 .....	54
1.6.5. Características de la AP en 2016 .....	56
1.7. Nivel tecnológico .....	77
1.8. Principales cultivos de la agricultura protegida en México .....	81
1.8.1. Requerimientos hídricos de los Principales cultivos .....	86
1.8.2. Consumo hídrico para 4-5 ciclos .....	86
1.8.3. Tomate.....	88
1.8.4. Pimiento.....	88

1.8.5.	Importancia de la producción de Jitomate.....	89
1.8.6.	Pimiento.....	95
1.9.	Caracterización de la agricultura protegida en 5 estados de la república mexicana (Estados de México, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí y Sinaloa) .....	97
1.9.1.	Principales características productivas del Estado de México .....	100
1.9.2.	Principales características productivas de Jalisco .....	103
1.9.3.	Principales características productivas de Michoacán.....	106
1.9.4.	Principales características productivas de San Luis Potosí.....	108
1.9.5.	Principales características productivas de Sinaloa .....	111
2.	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	114
2.1.	Procesamiento de información para establecer indicadores.....	114
2.1.1.	Precipitación .....	114
2.1.1.1.	Duración del periodo de lluvias.....	114
2.1.1.2.	Días secos (precipitación menor a 1 mm diario).....	116
2.1.1.3.	Precipitaciones por arriba de los 6 mm .....	117
2.1.2.	Temperatura.....	118
2.1.2.1.	Temperatura máxima.....	119
2.1.2.2.	Temperatura mínima .....	119
2.1.2.3.	Temperatura media.....	120
2.2.	Zonas climáticas en México .....	122
2.3.	Variables de interés .....	123
2.3.1.	Temperatura.....	123
2.3.1.1.	Temperatura mínima .....	123
2.3.1.2.	Días por debajo de 10 °C.....	128
2.3.1.3.	Temperatura máxima.....	132
2.3.1.4.	Días por arriba de 30 °C.....	137
2.3.1.5.	Temperatura media.....	141
2.3.2.	Precipitación .....	149
2.3.3.	Viento .....	154
2.4.	Definición de indicadores .....	157
2.4.1.	Captación de agua de lluvia.....	157
2.4.2.	Rendimientos.....	159
2.5.	Usos potenciales .....	165
2.5.1.	Potencial climático.....	166
2.5.2.	Potencial hídrico.....	167
2.5.2.1.	Captación de agua de lluvia .....	178
2.5.3.	Potencial térmico por región (estado) .....	188
2.6.	Modelo numérico de CFD .....	199
2.6.1.	Variabilidad climática .....	199
2.6.2.	Construcción del modelo computacional.....	204
2.6.3.	Condiciones de frontera y propiedades .....	205
2.6.4.	Simulación del ambiente del invernadero .....	208
2.7.	Mapas de distribución de temperaturas, velocidad y dirección del viento .....	209

2.7.1.	Periodo Cálido .....	210
2.7.1.1.	Estado de México .....	210
2.7.1.2.	San Luis Potosí.....	220
2.7.1.3.	Jalisco, Michoacán y Sinaloa .....	228
2.7.2.	Periodo frío.....	231
2.7.2.1.	Estado de México .....	231
2.7.2.2.	San Luis Potosí.....	240
2.7.2.3.	Jalisco, Michoacán y Sinaloa .....	248
2.8.	Costos de la ventilación forzada .....	252
3.	PRESENTACIÓN Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS .....	257
3.1.	Diagnóstico de la Agricultura protegida .....	257
3.1.1.	Condiciones templadas (Estado de México) .....	257
3.1.2.	Condiciones semiáridas (San Luis Potosí).....	257
3.2.	Documentos técnicos.....	259
4.	REFERENCIAS.....	263

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Dos municipios por estado donde se desarrolla la mayor superficie de agricultura protegida. Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.....	15
Figura 1.2. Tipos de invernaderos. ....	19
Figura 1.3. Invernadero en Coatlínchán, Estado de México.....	20
Figura 1.4. Invernadero en Texcoco, Estado de México. ....	21
Figura 1.5. Invernaderos en Santa María, San Luis Potosí. ....	21
Figura 1.6. Casas sombra en Villa de Arista, San Luis Potosí.....	22
Figura 1.7. Planta de jitomate. ....	23
Figura 1.8. Hoja de jitomate. ....	24
Figura 1.9. Flor de jitomate. ....	24
Figura 1.10. Frutos de jitomate. ....	25
Figura 1.11. Etapas fenológicas del tomate (CENTA, 2003). ....	25
Figura 1.12. Radiación y balance térmico promedio anual de la atmósfera calculada para 100 unidades de radiación solar recibida (National Academy of Sciences, 1975).....	28
Figura 1.13. Índice de días con heladas en la República Mexicana.....	37
Figura 1.14. Grado de peligro por bajas temperaturas.....	38
Figura 1.15. Índice de peligro por ondas de calor a escala municipal.....	43
Figura 1.16 Evolución de la Agricultura Protegida en México (Siap-Sagarpa, 2017). ....	47
Figura 1.17. Superficie cultivada por tipo de agricultura protegida en el 2008 (SAGARPA, 2009).....	48
Figura 1.18. Distribución de cultivos en agricultura protegida del año 2008. ....	49
Figura 1.19. Porcentaje de estructuras de la agricultura bajo cubierta en el año 2012 (SIAP, 2013).....	53
Figura 1.20. Porcentaje de estructuras de la agricultura bajo cubierta en el año 2014 (SIAP, 2015).....	55
Figura 1.21. Cubiertas de malla. ....	72
Figura 1.22. Cubiertas de maya en Sinaloa. ....	73
Figura 1.23. Invernaderos en Sinaloa. ....	74
Figura 1.24. Techos de capilla cubiertos con malla.....	75
Figura 1.25. Nivel tecnológico por estado, año 2014 (De Anda y Hervey, 2017). ....	78
Figura 1.26. Invernadero con Tecnología Media.....	79
Figura 1.27. Principales cultivos de la agricultura protegida y su distribución en México (AMHPAC, 2013).....	81
Figura 1.28. Distribución de la superficie dedicada al cultivo del tomate por tipo (SIAP, 2017). ....	95

Figura 1.29. Evolución de la superficie de agricultura protegida.....	97
Figura 1.30. Distribución de la superficie con AP de México. ....	98
Figura 1.31. Superficie de horticultura protegida en México por municipio. ....	99
Figura 1.32. Tipos de estructura más utilizada en los municipios.....	101
Figura 1.33. Tipo de instalación por municipios más importantes .....	104
Figura 1.34. Invernadero tipo Macro túnel del estado de Jalisco .....	105
Figura 1.35. Distribución de la superficie por tipo de Instalación en Michoacán (SIAP, 2017) .....	107
Figura 1.36. Invernadero tipo cenital para la producción hortícola en Michoacán.....	108
Figura 1.37. Invernadero tipo baticenital con cosecha de lluvia para la producción hortícola en San Luis Potosí. ....	109
Figura 1.38. Distribución de la superficie dedicada la producción de cultivos por tipo de estructura en San Luis Potosí (SIAP, 2017).....	111
Figura 1.39. Invernadero de Malla en multicapilla para producir pimiento morron en el Municipio de Culiacan Sinaloa.....	112
Figura 1.40. Distribución de superficie dedicada al cultivo protegido en Sinaloa por tipo (SIAP, 2017) .....	113
Figura 2.1. Distribución de las estaciones climatológicas en la República Mexicana. ....	123
Figura 2.2. Temperatura mínima anual en la República Mexicana.....	124
Figura 2.3. Temperatura mínima anual en el Estado de México. ....	125
Figura 2.4. Temperatura mínima anual en el estado de Jalisco.....	125
Figura 2.5. Temperatura mínima anual en el estado de Michoacán. ....	126
Figura 2.6. Temperatura mínima anual en el estado de San Luis Potosí. ....	127
Figura 2.7. Temperatura mínima anual en el estado de Sinaloa.....	128
Figura 2.8. Días por debajo de 10 °C en el Estado de México. ....	129
Figura 2.9 Días por debajo de 10 °C en el estado de Jalisco. ....	130
Figura 2.10. Días por debajo de 10 °C en el estado de Michoacán.....	130
Figura 2.11. Días por debajo de 10 °C en el estado de San Luis Potosí.....	131
Figura 2.12. Días por debajo de 10 °C en el estado de Sinaloa. ....	132
Figura 2.13. Temperatura máxima anual en la República Mexicana. ....	133
Figura 2.14. Temperatura máxima anual en el Estado de México. ....	134
Figura 2.15. Temperatura máxima anual en el estado de Jalisco. ....	135
Figura 2.16. Temperatura máxima anual en el estado de Michoacán.....	135
Figura 2.17. Temperatura máxima anual en el estado de San Luis Potosí.....	136
Figura 2.18. Temperatura máxima anual en el estado de Sinaloa. ....	137
Figura 2.19. Días por arriba de 30 °C en el Estado de México. ....	138
Figura 2.20. Días por arriba de 30 °C en el estado de Jalisco. ....	138
Figura 2.21. Días por arriba de 30 °C en el estado de Michoacán. ....	139
Figura 2.22. Días por arriba de 30 °C en el estado de San Luis Potosí. ....	140

Figura 2.23. Días por arriba de 30 °C en el estado de Sinaloa.....	140
Figura 2.24. Temperatura media anual en la República Mexicana.....	141
Figura 2.25. Temperatura media anual en el Estado de México.....	142
Figura 2.26. Temperatura media anual en el estado de Jalisco.....	143
Figura 2.27. Temperatura media anual en el estado de Michoacán.....	143
Figura 2.28. Temperatura media anual en el estado de San Luis Potosí.....	144
Figura 2.29. Temperatura media anual en el estado de Sinaloa.....	145
Figura 2.30. Variación de la precipitación media anual en la República Mexicana.....	150
Figura 2.31. Precipitación media anual en el Estado de México.....	151
Figura 2.32. Precipitación media anual en el estado de Jalisco.....	151
Figura 2.33. Precipitación media anual en el estado de Michoacán.....	152
Figura 2.34. Precipitación media anual en el estado de San Luis Potosí.....	153
Figura 2.35. Precipitación media anual en el estado de Sinaloa.....	153
Figura 2.36. Velocidad del viento promedio en los estados de la República Mexicana.....	156
Figura 2.37. Rosa de los vientos para el Estado de México.....	156
Figura 2.38. Rosa de los vientos para el estado de San Luis Potosí.....	157
Figura 2.39. Densidad de planta de jitomate por metro cuadrado y rendimiento.....	161
Figura 2.40. Potencial debido a temperaturas en la República Mexicana.....	167
Figura 2.41. Variación de la FHS en función de la precipitación (mm) y el riego aplicado (L/día/p).....	170
Figura 2.42. Área de captación análisis Chapingo – cultivo de Jitomate.....	185
Figura 2.43. Dinámica de volúmenes análisis Chapingo – cultivo de Jitomate.....	185
Figura 2.44. Área de captación análisis Capulhuac – cultivo de Jitomate.....	187
Figura 2.45. Dinámica de volúmenes análisis Capulhuac – cultivo de Jitomate.....	187
Figura 2.46. Variación del peso en función de la temperatura.....	190
Figura 2.47. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el Estado de México.....	191
Figura 2.48. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de San Luis Potosí.....	192
Figura 2.49. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de Jalisco.....	192
Figura 2.50. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de Michoacán.....	193
Figura 2.51. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de Sinaloa.....	194
Figura 2.52. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15020, Chalco, Estado de México.....	195
Figura 2.53. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15022, Tecámac, Estado de México.....	195
Figura 2.55. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15266, Metepec, Estado de México.....	197
Figura 2.56. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15328, Tejupilco, Estado de México.....	197

Figura 2.57. Distribución de la eficiencia térmica del invernadero durante todo el año en las cinco estaciones analizadas del Estado de México. ....	198
Figura 2.58. Distribución de la eficiencia térmica del invernadero durante el ciclo primavera-verano en las cinco estaciones analizadas del Estado de México. ....	199
Figura 2.59. Climas del Estado de México. ....	200
Figura 2.60. Climas del estado de San Luis Potosí. ....	201
Figura 2.61. Geometría y mallado del invernadero tipo cenital. ....	204
Figura 2.62. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior y exterior del invernadero en el plano horizontal: a) ventilación natural y b) ventilación forzada. ....	211
Figura 2.63. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano vertical: a) ventilación natural y b) ventilación forzada. ....	212
Figura 2.64. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero. Ventilación natural (izquierda) y forzada (derecha) para el Estado de México. ....	213
Figura 2.65. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo en el invernadero del Estado de México ....	214
Figura 2.66. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo. ....	214
Figura 2.67. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para Estado de México en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	215
Figura 2.68. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas. ....	216
Figura 2.69. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	217
Figura 2.70. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo cálido a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	218
Figura 2.71. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en el Estado de México con ventilación forzada en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	219
Figura 2.72. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas. ....	219
Figura 2.73. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero en el plano horizontal, para a) ventilación natural y b) ventilación forzada. ....	220
Figura 2.74. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano vertical: a) ventilación natural y b) ventilación forzada. ....	221
Figura 2.75. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero. ....	222

Figura 2.76. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	223
Figura 2.77. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas. ....	223
Figura 2.78. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	224
Figura 2.79. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	225
Figura 2.80. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas. ....	226
Figura 2.81. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en San Luis Potosí con ventilación forzada en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	226
Figura 2.82. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación natural en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	228
Figura 2.83. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación natural en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	229
Figura 2.84. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación forzada en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	230
Figura 2.85. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación forzada en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	231
Figura 2.86. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano horizontal: a) ventilación natural y b) ventilación forzada. ....	232
Figura 2.87. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano vertical: a) ventilación natural y b) ventilación forzada. ....	233
Figura 2.88. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero en el periodo frío. a) Ventilación natural y b) forzada, para el Estado de México. ....	234
Figura 2.89. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para Estado de México en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	235

Figura 2.90. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas. ....	236
Figura 2.91. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.....	237
Figura 2.92. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo frío a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.....	237
Figura 2.93. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en el Estado de México con ventilación forzada en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. ....	238
Figura 2.94. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas. ....	239
Figura 2.95. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero en el plano horizontal. a) Ventilación natural y b) ventilación forzada en San Luis Potosí. ....	241
Figura 2.96. Contornos de temperatura en el interior del invernadero en el plano vertical. a) Ventilación natural, b) ventilación forzada en San Luis potosí. ....	242
Figura 2.97. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero. a) Ventilación natural y b) ventilación forzada en San Luis Potosí.....	243
Figura 2.99. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.....	244
Figura 2.100. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural en el periodo cálido (—) y periodo frío (---) para San Luis potosí (●) y Estado de México (●).....	245
Figura 2.101. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.....	245
Figura 2.102. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.....	246
Figura 2.103. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.....	247
Figura 2.104. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en San Luis Potosí con ventilación forzada en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.....	247

Figura 2.105. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación natural en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	249
Figura 2.106. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación natural en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	250
Figura 2.107. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación forzada en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	251
Figura 2.108. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación forzada en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. ....	252
Figura 2.109. Dimensiones del ventilador modelo EX 36"-0,5.....	253
Figura 2.111. Costos de uso de ventilación forzada en municipios de San Luis Potosí. ....	255
Figura 2.112. Costos de uso de ventilación forzada en municipios del Estado de México. ....	256
Figura 3.1. Resumen artículo presentado y publicado en el 23 Congreso Internacional ICID, CDMX, México. ....	259
Figura 3.2. Presentación artículo 23 Congreso Internacional ICID, México. ....	260
Figura 3.3. Publicación artículo 23 Congreso Internacional ICID, México. - ISBN: 978-81-89610-24-1 .....	261
Figura 3.4. Publicación artículo 23 Congreso Internacional ICID, México. –pág. 232.....	262

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Fragmento de medias y extremas diarias para la estación Aculco, Estado de México. ....	5
Cuadro 1.2. Estaciones con datos de precipitación en periodos de 20 y 24 años. ....	7
Cuadro 1.3. Estaciones con datos de precipitación en periodos de 20 y 24 años. ....	8
Cuadro 1.4. Serie de datos para la precipitación diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México. ....	9
Cuadro 1.5. Precipitación mensual en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010. ....	10
Cuadro 1.6. Serie de datos para la temperatura máxima diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010. ....	11
Cuadro 1.7. Serie de datos para la temperatura mínima diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010. ....	12
Cuadro 1.8. Serie de datos para la temperatura media diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010. ....	13
Cuadro 1.9. Estados con mayor superficie en agricultura protegida. ....	14
Cuadro 1.10. Superficie cubierta de invernaderos en estado activo en los estados de la república mexicana, en el 2014. ....	16
Cuadro 1.11. Clasificación taxonómica del tomate. ....	22
Cuadro 1.12. Intervalos del número de días con heladas. ....	36
Cuadro 1.13. Distribución por municipio según el índice de heladas. ....	36
Cuadro 1.14. Desarrollo la agricultura protegida en México (Diversas fuentes) ....	47
Cuadro 1.15. Principales cultivos en horticultura protegida (SAGARPA, 2009) ....	48
Cuadro 1.16. Superficie de horticultura protegida en las unidades de producción en México (Ponce, 2011) ....	50
Cuadro 1.17. Superficies de AP por tipo de estructura año 2012 (SIAP, 2013) ....	51
Cuadro 1.18. Rendimiento de los cultivos en invernadero. ....	53
Cuadro 1.19. México y los países con mayor superficie de agricultura protegida. ....	54
Cuadro 1.20. Tipo de instalaciones en Agricultura Protegida en México, año 2014. ....	54
Cuadro 1.21. Cultivo principal de los 5 estados con mayor superficie de AP (SIAP, 2015) ..	55
Cuadro 1.22. Representatividad en las estructuras visitadas. ....	57
Cuadro 1.23. Superficie visitada por estado. ....	57
Cuadro 1.24. Tipo de invernaderos. ....	58
Cuadro 1.25. Tipos de invernadero del estado de Jalisco. ....	59
Cuadro 1.26. Tipos de Capillas del estado de Jalisco. ....	59
Cuadro 1.27. Ubicación de los invernaderos. ....	59
Cuadro 1.28. Características generales de los invernaderos. ....	60

Cuadro 1.29. Cultivos sembrados en los invernaderos .....	60
Cuadro 1.30. Tipos de invernadero del estado de Michoacán. ....	61
Cuadro 1.31. Tipos de Capillas del estado de Michoacán.....	61
Cuadro 1.32. Ubicación de los invernaderos.....	62
Cuadro 1.33. Características generales de los invernaderos. ....	63
Cuadro 1.34. Cultivos sembrados en los invernaderos. ....	64
Cuadro 1.35. Tipos de invernadero del Estado de México.....	65
Cuadro 1.36. Tipos de Capillas del Estado de México .....	65
Cuadro 1.37. Ubicación de los invernaderos.....	66
Cuadro 1.38. Características generales de los invernaderos. ....	67
Cuadro 1.39. Tipos de invernadero del estado de Jalisco .....	68
Cuadro 1.40. Tipos de Capillas del estado de Jalisco .....	69
Cuadro 1.41. Ubicación de los invernaderos.....	69
Cuadro 1.42. Características generales de los invernaderos .....	70
Cuadro 1.43. Cultivos sembrados en los invernaderos .....	71
Cuadro 1.44. Tipos de invernadero del estado de Sinaloa.....	72
Cuadro 1.45. Tipos de Capillas del estado de Sinaloa. ....	73
Cuadro 1.46. Ubicación de los invernaderos.....	74
Cuadro 1.47. Características generales de los invernaderos. ....	75
Cuadro 1.48. Cultivos sembrados en los invernaderos.....	76
Cuadro 1.49. Relación entre el número de instalaciones colocadas en México con agricultura protegida (De Anda y Hervey, 2017) .....	77
Cuadro 1.50. Principales cultivos por estado (Elaborado con datos del SIAP 2014) .....	82
Cuadro 1.51. Rendimiento de los tres principales cultivos de invernadero en México. (SIAP, 2013).....	87
Cuadro 1.52. Consumo de agua por planta de los principales cultivos en invernadero durante el ciclo vegetativo. ....	87
Cuadro 1.53. Comparación entre riego, ETc, ET0, para cada etapa de desarrollo. ....	88
Cuadro 1.54. Valores de ETc del pimiento para el esquema 120% de ETc .....	89
Cuadro 1.55. Producción mundial de tomate para consumo en fresco .....	89
Cuadro 1.56. Rendimiento por sistema productivo con jitomate o tomate rojo. ....	91
Cuadro 1.57. Avance a septiembre de 2017 (Miles de toneladas) .....	91
Cuadro 1.58. Producción agrícola de tomate bola en invernadero por estado.....	92
Cuadro 1.59. Producción agrícola de tomate bola en malla sombra por estado. ....	93
Cuadro 1.60. Producción agrícola de tomate saladette en invernadero por estado.....	93
Cuadro 1.61. Producción agrícola de tomate saladette en malla sombra por estado. ....	94
Cuadro 1.62. Producción agrícola de Morrón en México, en 2014 (SIAP, 2017).....	96
Cuadro 1.63. Evolución de la superficie de agricultura protegida .....	97
Cuadro 1.64. Estados con mayor superficie de horticultura protegida en el 2014 .....	98

Cuadro 1.65. Superficie de horticultura protegida del 2014 por Municipio (Fuente: SIAP, 2015).....	99
Cuadro 1.66. Superficie de AP para cultivo de jitomate en el Estado de México año 2014. ....	100
Cuadro 1.67. Cultivos desarrollados por tipo de instalación .....	101
Cuadro 1.68. Cultivos por tipo de instalación del estado de Jalisco .....	103
Cuadro 1.69. Tipo de instalación de Jalisco.....	104
Cuadro 1.70. Cultivos en el estado de Jalisco.....	105
Cuadro 1.71. Principales cultivos por tipo de instalación del estado de Michoacán el año 2014 (SIAP, 2017) .....	106
Cuadro 1.72. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en San Luis potosí para el año 2014. ....	108
Cuadro 1.73. Tipo de invernadero por municipio más importante de SLP .....	109
Cuadro 1.74. Superficie de agricultura protegida para el Estado de San Luis Potosí. ....	110
Cuadro 1.75. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en el Estado de Sinaloa para el año 2014. ....	112
Cuadro 1.76. Superficie de agricultura protegida en Sinaloa.....	113
Cuadro 2.1. Periodo de lluvias durante el periodo 1981-2010 en la estación Altamira, San Luis Potosí.....	114
Cuadro 2.2. Temporada de lluvias en 24 años para la estación Acambay, Estado de México. ....	115
Cuadro 2.3. Días secos para la estación Altamira, San Luis Potosí.....	116
Cuadro 2.4. Precipitación por arriba de los 6 mm en la estación Altamira, San Luis Potosí. ....	117
Cuadro 2.5. Resumen de las variables para el estado de Estado de México. ....	120
Cuadro 2.6. Resumen de las variables para el estado de San Luis Potosí.....	121
Cuadro 2.7. Días por debajo de 10 °C en el Estado de México, considerando la temperatura media. ....	145
Cuadro 2.8. Días por debajo de 10 °C en el estado de San Luis Potosí. ....	146
Cuadro 2.9. Días por arriba de 30 °C en el estado de San Luis Potosí.....	148
Cuadro 2.10. Velocidad y dirección del viento en el Estado de México. ....	154
Cuadro 2.11. Coeficiente de escurrimiento para diferentes superficies de captación.....	158
Cuadro 2.12. Producción de tomate rojo, años agrícolas 2016-2017. Avance a septiembre de 2017 (Miles de toneladas) .....	160
Cuadro 2.13. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en San Luis potosí para el año 2014. ....	161
Cuadro 2.14. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en el Estado de México para el año 2014. ....	162
Cuadro 2.15. Producción agrícola de tomate bola en invernadero por estado.....	162

Cuadro 2.16. Producción agrícola de tomate bola en malla sombra por estado. ....	163
Cuadro 2.17. Producción agrícola de tomate saladette en invernadero por estado.....	164
Cuadro 2.18. Producción agrícola de tomate saladette en malla sombra por estado. ....	165
Cuadro 2.19. FHS para diferentes cantidades de riego y precipitación. ....	169
Cuadro 2.20. FHS para las estaciones del Estado de México, considerando un $TR_i=1$ L/día/p. ....	170
Cuadro 2.21. FHS para las estaciones de Jalisco, considerando un $TR_i=1$ L/día/p.....	172
Cuadro 2.22. FHS para las estaciones de Michoacán, considerando un $TR_i=1$ L/día/p. ....	174
Cuadro 2.23. FHS para las estaciones de San Luis Potosí, considerando un $TR_i=1$ L/día/p. ....	176
Cuadro 2.24. FHS para las estaciones de Sinaloa, considerando un $TR_i=1$ L/día/p. ....	178
Cuadro 2.25. Ejemplo de estimación del coeficiente de variación de la precipitación promedio mensual para tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010).....	179
Cuadro 2.26. Estimación del coeficiente de variación de la precipitación promedio mensual muestra aleatoria de estaciones de 5 estados para tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010).....	179
Cuadro 2.27. Ejemplo de análisis de coeficiente de variación de la variable precipitación para tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010) – Muestra del Estado de Jalisco. ....	180
Cuadro 2.28. Ejemplo de análisis de coeficiente de variación de la variable precipitación para el periodo (1981-2010) – Estación 15002 (Aculco, SMN).....	180
Cuadro 2.29. Ejemplo de análisis de coeficiente de variación de la variable precipitación para el periodo (1981-2010) – Estado de México. ....	181
Cuadro 2.30. Frecuencia en número de estaciones y en porcentaje por intervalos de valores de precipitación. ....	181
Cuadro 2.31. Frecuencia en número de estaciones por intervalos de valores de precipitación – Estado de México.....	182
Cuadro 2.32. Ejemplo de cálculo de volumen potencialmente captable de agua de lluvia, $m^3$ ....	183
Cuadro 2.33. Ejemplo de base de datos del potencial de aprovechamiento del agua de lluvia en la AP. ....	183
Cuadro 2.34. Condiciones de análisis – potencial de aprovechamiento de agua de lluvia – A. P. - Cultivo de jitomate. ....	183
Cuadro 2.35. Análisis del potencial de aprovechamiento de agua de lluvia – A. P. - Cultivo de jitomate. Diferentes ciclos de cultivo. Chapingo. ....	184
Cuadro 2.36. Análisis del potencial de aprovechamiento de agua de lluvia – A. P. - Cultivo de jitomate. Diferentes ciclos de cultivo. Capulhuac. ....	186
Cuadro 2.37. Comparación entre los análisis de la estación Chapingo vs Capulhuac. ....	188
Cuadro 2.38. Materiales usados en el modelo.....	206
Cuadro 2.39. Características de la malla antiinsectos (condición de medio poroso). ....	206

Cuadro 2.40. Condiciones de frontera en los escenarios evaluados para el Estado de México. .....	207
Cuadro 2.41. Condiciones de frontera en los escenarios evaluados para San Luis Potosí.	208
Cuadro 2.42. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo para el periodo cálido. .....	227
Cuadro 2.43. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo para el periodo frío. .....	239
Cuadro 2.44. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo para el periodo frío. .....	247
Cuadro 2.45. Datos técnicos del ventilador modelo EX 36"-0,5. ....	253
Cuadro 2.46. Tarifas por kilowatt/hora para los periodos diurno y nocturno. ....	253
Cuadro 2.47. Costo de uso de tres ventiladores por número de horas de uso en un día. Tarifa agrícola. ....	254

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto fue concebido, con el fin de promover la agricultura protegida como sistema de producción cuyo uso de recursos en el proceso de producción se presume, eficiente con productividades de agua, por ejemplo, entre 10 y 20 veces mayor que una agricultura a campo abierto. La agricultura protegida, es un sistema altamente dependiente de las condiciones climáticas, por ello, entre los insumos básicos para la producción de cultivos en invernaderos, es el clima local.

El proyecto fue planteado de lo general a lo particular. Se analiza el clima en el país, se integra información sobre las principales zonas que dedican superficie a la producción de cultivos en ambientes protegidos, y los cultivos. Y con base en esta información se hacen análisis más específicos por región, por cultivo hasta llegar a plantear un modelo numérico que permita recrear la dinámica del aire en el interior de un invernadero.

La presentación del documento, se organiza básicamente en tres partes; la integración de la información, climática, agronómica, física del clima y de producción, para luego seleccionar la información con la que se puede trabajar, tratando de dar certeza a los resultados.

En un segundo apartado, se lleva a cabo la discretización de la información y se plantean métodos de análisis, y su representación espacial, tratando con ello de aportar elementos que permitan auxiliar la toma de decisiones respecto de donde es factible, o que región presenta mejores condiciones que otras en el país para el establecimiento de un cultivo.

En la última parte del documento, con la definición de zonas productivas, y cultivo preponderante en el país, se lleva a cabo la construcción de un modelo numérico del clima de un invernadero, con el fin de simular la dinámica del aire en su interior que ocurriría bajo las condiciones ambientales locales, para esto se seleccionaron dos zonas climáticamente contrastantes.

Los resultados indican que a pesar de contar con bases de datos extensas tanto espacial como temporalmente, la realidad es que ha sido complicado completar bases de datos como suficientes años para considerarlos normales (más de 30), y mucho ms complicado contar con factores climáticos involucrados en el proceso de producción. En este primer caso, se trabajó con temperatura y precipitación.

En términos agronómicos, la evolución de la producción de cultivos, indica que el estado con mayor desarrollo en invernaderos es el Estado de Sinaloa, quien además de ser el principal productor de jitomate, también existen otros cultivos que comienzas a llevar la superficie, como el pimiento, pepino, arándano, y flores.

La principal estructura en la que se cultiva es una modificación de invernadero, conocida como malasombra, que en ocasiones puede cubrirse con plástico parte de ella. A excepción de zonas con climas fríos, malla sombra, macro tunes e invernaderos rústicos de plástico, son los más comunes.

Como resultado de la modelación del invernadero, se observa que las mallas en las ventanas pueden reducir la velocidad del viento hasta en un 80% la entrada del aire, por lo que es aconsejable mantener estas protecciones limpias y libres de polvo. En un invernadero de plástico, los gradientes térmicos que se observan en 40 m mantienen un valor de entre 2 grados por lo que se estima que el invernadero con estas características proporciona un ambiente dentro de los límites que el jitomate necesita para su desarrollo.

Con las variables climáticas en el país, se seleccionaron bases de datos con el fin de establecer parámetros que permitan la creación de indicadores para “cualificar” la aptitud de la región para proveer al invernadero y al cultivo condiciones climáticas favorables. Uno de los valores importantes de este análisis, se refiere a los volúmenes de agua factibles de almacenar de la cosecha de lluvia de los techos.

Los resultados indican, que es factible establecer una serie de indicadores para favorecer la construcción de invernaderos de manera razonada. Indicador de temperatura, indicador de precipitación, indicador de temporalidad, son valores para la zonificación productiva de lo invernaderos como sistema de producción agrícola, que coadyuven en el uso eficiente de los recursos, agua, suelo, ambiente y energía.

## INTRODUCCIÓN

El efecto de las variables climáticas sobre los cultivos ha generado el uso de distintos materiales, herramientas y estructuras en la producción agrícola. Estas estructuras proporcionan los medios para generar las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo óptimo de los cultivos. De esta forma la Agricultura Protegida (AP) es un sistema de producción en el cual el uso de estructuras ayuda a minimizar los efectos de las condiciones climáticas en los cultivos.

La finalidad de la agricultura protegida es obtener altos rendimientos con productos de mejor calidad. Los invernaderos son estructuras que se construyen con la finalidad de reducir las restricciones del medio ambiente. Dado que es necesario planificar e investigar el comportamiento de los cultivos dentro de los invernaderos se ha hecho uso de diferentes tipos de modelos dentro de la agricultura.

La información climatológica se vuelve entonces una parte fundamental en la toma de decisiones relacionadas con la agricultura. Los datos climatológicos son obtenidos de estaciones meteorológicas que pueden estar automatizadas o no. Los organismos que se encargan del registro de dichos datos son la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). La distribución de las estaciones meteorológicas en el país no es uniforme, pero cubre todo el territorio nacional.

La información climatológica localizada en un territorio puede ser representada mediante mapas temáticos, los cuales son utilizados por profesionales de todas las disciplinas sociales y ambientales porque presentan distintos tipos de datos como información visual, que resulta de más rápida lectura y más sencilla interpretación. Los mapas temáticos son aquellos que muestran un determinado tema localizado en un territorio. En general, la base es un mapa político, que sirve como orientación para localizar los fenómenos que se representan en el mapa temático. Resultan elocuentes y fácilmente memorizables. No hay límite en cuanto al contenido de los mapas temáticos. Los temas pueden ser muy diversos, con mayor o menor grado de abstracción y generados por distintas disciplinas.

Los mapas temáticos tienen una base de datos asociada, que suministra información de cada elemento gráfico y permite su análisis utilizando herramientas proporcionadas por el programa elegido para implementar el Sistema de Información Geográfica (SIG). Con esto pueden generarse mapas con las zonas aptas para la producción agrícola, mediante la intersección de todos los mapas temáticos generados y definiendo parámetros de intersección.

En las últimas décadas se han implementado modelos relacionados con los procesos agrícolas y ambientales. Con estos modelos es posible evaluar los procesos de transpiración, propiedades hidráulicas del suelo, crecimiento de plantas y el contenido de nutrientes del

suelo. Además, con la introducción de modelos dinámicos, como los desarrollados mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es posible entender el movimiento del aire y el intercambio gaseoso dentro del invernadero, así como determinar las necesidades de agua de los cultivos bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad. El alcance del presente trabajo consiste en realizar un modelo de CFD de un invernadero tipo capilla con cubierta plástica para simular el efecto que tiene la temperatura anual promedio dentro del invernadero en dos zonas climáticamente contrastantes, propiamente los estados de San Luis Potosí y Estado de México.

En el siguiente informe se compiló, integró y procesó información climática para la caracterización de la agricultura protegida de la república mexicana, se generaron mapas temáticos del potencial de la agricultura protegida asociados con la precipitación y temperatura, y se simuló el ambiente al interior de un invernadero tipo, usando como variables de frontera las condiciones climáticas recopiladas de dos zonas con desarrollo de sistema de producción en agricultura protegida y condiciones climáticas contrastantes.

## 1 COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN

### 1.1. Información Climatológica

En general la información del clima es parte fundamental para la toma de decisiones en la agricultura. Con la información captada por las estaciones se pueden calcular parámetros como la probabilidad de ocurrencia de lluvias y la ocurrencia de temperaturas extremas en duración y localización, que pueden emplearse para medir el riesgo de heladas o agobio calóricos de los cultivos (INIFAP, 2008).

Dentro de los parámetros climáticos más utilizados para el monitoreo ambiental se encuentra la temperatura, ya que, debido a su facilidad de medición con respecto a otros factores como la radiación solar o la humedad, se aplica bastante incluso en invernaderos (Hanan, 1990).

Para la compilación de información climatológica se descargó la información del sitio de internet del SMN. En dicha sección se puede consultar la información climatológica nacional que va de 1900 hasta la fecha donde se dispone de información actualizada por los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la CONAGUA, la cual implica aproximadamente 55 millones de registros diarios de lluvia en 24 horas y temperatura mínima y máxima, reportados por alrededor de 5,500 estaciones climatológicas (CONAGUA, 2017).

Se seleccionaron las medias y extremas diarias de la información climatológica por estado. La información contenida viene ordenada por fecha para las variables de precipitación, evaporación, temperatura máxima y temperatura mínima. Así mismo se muestran la latitud y longitud de la estación meteorológica en cuestión. En el **Cuadro 1.1** se muestra un fragmento de la información de una estación climatológica.

Cuadro 1.1. Fragmento de medias y extremas diarias para la estación Aculco, Estado de México.

CNA-SMN-SPMLP-CLIMATOLOGÍA				
Base de datos climatológica				
Datos disponibles en la base de datos a junio de 2017				
Estación: 15002				
Nombre: Aculco				
Estado: México				
Municipio: Aculco				
Latitud: 0020.100°				
Longitud: -099.820°				
Altitud: 2,490 msnm				
FECHA	PRECIP	EVAP	TMAX	TMIN
	mm	mm	°C	°C
28/07/1981	42	Nulo	18	9
29/07/1981	0	Nulo	21	8
30/07/1981	0	Nulo	20	9
31/07/1981	0	Nulo	20	9
01/08/1981	0	4.5	22	9
02/08/1981	3	4.3	22	9.5
03/08/1981	32	3.7	22	10
04/08/1981	0	4.2	21	8
05/08/1981	0	5	20	10
06/08/1981	0	4.8	20	8
07/08/1981	0	4.6	20	8
08/08/1981	0	4.7	21	7
09/08/1981	0	4.4	21	7
10/08/1981	0	4.3	20	7
11/08/1981	0	4.7	21	12
12/08/1981	0	4.8	23	8
13/08/1981	0	4.2	22	9
14/08/1981	3	4	21	11
15/08/1981	0	4.2	24	10
16/08/1981	0	4.6	23	7.5

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2017).

Para establecer el periodo de cálculo de las normales climatológicas, la Organización Meteorológica Mundial establece en el Reglamento Técnico OMM-No. 49 (OMM, 2008) que las normales climatológicas reglamentarias son medias de los datos climatológicos

calculados para los siguientes periodos consecutivos de 30 años: 1 de enero de 1901 a 31 de diciembre de 1930, 1 de enero de 1931 a 31 de diciembre de 1960 y así sucesivamente. Las normales climatológicas calculadas por el SMN comprenden los periodos 1951-2010, 1971-2010 y 1981-2010.

Las siguientes son sugerencias e indicaciones que hace la Organización Meteorológica Mundial OMM (2011) para el cálculo de las normales climatológicas:

1. En la medida de lo posible, los datos utilizados para calcular las normales y los promedios deberían ser homogéneos. En el caso de estaciones que carecen de datos disponibles correspondientes a un periodo de 30 años, los promedios pueden calcularse en cualquier momento. A estos promedios se les conoce como normales provisionales. Las medias de un periodo son promedios correspondientes a cualquier periodo de al menos 10 años, comenzando el 1 de enero de un año que termina por la cifra 1.
2. Así mismo, este mismo organismo indica que las normales climatológicas que se calculan sobre una base de datos incompletos pueden presentar distorsión. La correlación de los datos climatológicos ocasiona que una falta consecutiva de observaciones pueda tener una mayor repercusión en las normales que la falta de un mismo número de observaciones repartidas aleatoriamente durante un periodo en cuestión.
3. Sugiere que las normales o medias de un periodo deberían calcularse cuando esté disponible al menos el 80 por ciento de los años registrados en un periodo y no falten los valores de más de tres años consecutivos. También menciona que las normales o promedios anuales deberían calcularse como la media o la suma (según proceda) de las 12 normales o promedios mensuales.
4. En cuanto a valores mensuales, lo recomendable es no calcularlos si hacen falta más de diez valores diarios o cinco o más valores diarios consecutivos. Un criterio más estricto para calcular los promedios establece los límites a más de cinco días con datos faltantes o a más de tres días consecutivos con datos faltantes.

## 1.2. Variables descriptivas

Las variables climáticas consideradas son la temperatura media, máxima y mínima, tanto diaria, como mensual, así como la precipitación diaria y mensual. Como primer paso, para la representación de estas variables climatológicas a nivel nacional, se emplearon los datos obtenidos del periodo 1981-2010 tal y como se encontraron en la base de datos. Para el análisis de los indicadores en cinco estados de la república, se realizó la depuración de cinco estados (Estado de México, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí y Sinaloa). Esta depuración se realizó para las variables de temperatura máxima, mínima diaria y precipitación diaria. Los índices en los estados restantes fueron calculados con los datos tal y como se encontraban en la base.

### 1.2.1. Precipitación

La precipitación es el agua que cae a la superficie terrestre desde la atmósfera. La lluvia, el granizo y la nieve, en este sentido, son tipos de precipitación. En muchas regiones de la República mexicana, la agricultura depende de las condiciones de lluvia. De forma indirecta, la precipitación también está relacionada con la agricultura de riego y también con la agricultura protegida.

La recopilación de información de precipitación ayuda a la planeación de siembra de cultivos de temporal, puesto que con ella es posible conocer la cantidad de lluvias disponible en un periodo del año. También pueden hacerse proyecciones de cuánta agua puede captarse para el riego de cultivos ya sea a campo abierto o en invernadero.

Conociendo la utilidad de los datos de precipitación se ha vuelto necesario recopilar la información al respecto y realizar un ordenamiento de los datos completos en un periodo de tiempo lo suficientemente largo para asegurar confiabilidad en los datos.

Para llevar a cabo la integración de las series de datos, se procedió a depurar la base de datos mensuales obtenida previamente. Se eligieron las estaciones que contaban con al menos 24 años de precipitación. Se contabilizó el número de estaciones que cumplía con el requisito de presentar más de 20 y más de 24 años de datos de las variables requeridas en el periodo 1981-2010. La información del número de estaciones para cada estado se muestra en el **Cuadro 1.2** para algunos estados seleccionados.

Cuadro 1.2. Estaciones con datos de precipitación en periodos de 20 y 24 años.

Estado	Número de estaciones con más de 20 años	Número de estaciones con más de 24 años
Estado de México	168	138
Jalisco	125	110
Michoacán	91	65
San Luis Potosí	91	65
Sinaloa	45	38

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Con la base de datos depurada se integraron series de datos para la precipitación diaria y media mensual para para las estaciones con más de 24 años de datos en el periodo de 1981-2010.

### 1.2.2. Temperatura

La temperatura es uno de los elementos constitutivos del clima que se refiere al grado de calor específico del aire en un lugar y momento determinados, así como la evolución temporal y espacial de dicho elemento en las distintas zonas climáticas. Además, la

temperatura es uno de los factores limitantes en el desarrollo de los organismos, incluidos los cultivos. Es bien sabido que la temperatura influye en la velocidad de las reacciones químicas y por ende en los procesos biológicos. Todos los seres vivos tienen rangos de temperatura óptimos en los que su desarrollo se ve favorecido y fuera de los cuales comienzan a producirse afectaciones. El conocimiento de las variaciones de temperatura en el tiempo y espacio suele emplearse para determinar la aptitud de un cultivo en una zona determinada. Para esto es necesario recopilar e integrar la información disponible en bases de datos climatológicos o bien, tener un sistema de monitoreo.

Para llevar a cabo la integración de las series de datos, se procedió a depurar la base de datos obtenida previamente. Se eligieron las estaciones que contaban con al menos 24 años de las variables temperatura máxima, mínima y media. Se contabilizó el número de estaciones que cumplía con el requisito de presentar más de 24 años de datos de las variables requeridas. La información correspondiente se muestra en el **Cuadro 1.3**.

Cuadro 1.3. Estaciones con datos de precipitación en periodos de 20 y 24 años.

Estado	Variable	Número de estaciones con más de 20 años	Número de estaciones con más de 24 años
Estado de México	Temperatura máxima	158	127
	Temperatura media	158	127
	Temperatura mínima	158	127
Jalisco	Temperatura máxima	117	99
	Temperatura media	117	99
	Temperatura mínima	117	99
Michoacán	Temperatura máxima	83	61
	Temperatura media	83	61
	Temperatura mínima	83	61
San Luis Potosí	Temperatura máxima	147	133
	Temperatura media	147	133
	Temperatura mínima	147	133
Sinaloa	Temperatura máxima	44	38
	Temperatura media	44	38
	Temperatura mínima	44	38

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

### 1.3. Integración de información en series de datos

#### 1.3.1. Precipitación

La utilidad de la información climática radica en que esta pueda ser manipulable, para ello es necesario integrar la información en series climáticas que faciliten el uso de los datos. Para este informe se obtuvo la información de las medias y extremas diarias de las estaciones climatológicas distribuidas en toda la República Mexicana.

La precipitación fue ordenada para cada día en los 24 años correspondientes. En el **Cuadro 1.4** se muestran los valores de precipitación (mm) para una de las estaciones del Estado de México. Se presentan datos de los primeros 12 días de cada mes de los años de 1981 y 1982. El número de día uno con la columna 1981-01, representa al 1 de enero de 1981, mientras que el número de día 1 con la columna 1981-02, representa el 1 de febrero de 1981 y así sucesivamente. El mismo procedimiento fue empleado para cada una de las estaciones con datos completos en un periodo de 24 años. El ordenamiento de los datos de esta forma permitió realizar los cálculos de los índices que se mencionan más adelante.

Cuadro 1.4. Serie de datos para la precipitación diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México.

Año-mes	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1981-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
1981-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1981-03	4	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	3
1981-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1981-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1981-06	0	0	14.5	0	0	7.5	0	0	0	2	0	0
1981-07	8	2	8	0	16	0	6	2.5	0	0	0	0
1981-08	0	3	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1981-09	13	0	0	0	0	0	8.5	1	0	0	0	0
1981-10	0	0	0	0	5.5	1	0	5	1	2	7	7.5
1981-11	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1981-12	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
1982-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982-02	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1982-03	4	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982-05	0	0	12	0	0	0	0	0	0	9	0	0
1982-06	0	0	0	0	4.1	0	0	0	0	0	0	0
1982-07	26	6.5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
1982-08	0	7	15	0	0	0	0	0	9	10	0	1
1982-09	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	30.5	0
1982-10	0	0	0	0	0	14	11.1	15	6.5	8.2	14.9	1
1982-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Además de los datos diarios de precipitación, se obtuvieron los datos de precipitación mensual. En el **Cuadro 1.5** se muestra cómo se realizó el ordenamiento de los datos mensuales para cada estación en el periodo 1981-2010.

Cuadro 1.5. Precipitación mensual en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Promedio
1981	50	28	12	23	45.5	201	175.5	95.5	37.5	68.6	2	5	62.0
1982	0	4.5	16	16	61	22.2	86.4	57.8	49.5	70.7	0	0	32.0
1983	32.5	0	4.5	0	25.9	40.5	343.4	142.5	93.8	50.5	12.5	2	62.3
1984	6.5	11	0	0	22	152.5	173.2	151	169.5	75.5	0	2	63.6
1985	3					199	181.5	45	0				85.7
1986		0	0	7	24	3	134						28.0
1987	0	0	0	0						1	25.5	0	3.8
1988			12	8.6	42.4	61.4	181.1	161.8	65.7	0	12.9	0	54.6
1989	0	26.6		23.1	45.9	90	136.1	160.2	37.6	26.4	8.3	18.3	52.0
1990	5.6	35.6	4	20.4	79.3	56.7		154	109.9	98.6	0.3	9	52.1
1991	9.9	4.2	0	2.7	38.3	306.5	280.3	58.2	79.6	40.6	27	24	72.6
1992	79.8	30.1	2.6	8	133.9	26.2	134.2	127.3	69.1	84	72.7	4.7	64.4
1993	6.4	4.3	8.2	22.8	14.2	134.7	166.8	49.6	129.8	11.5	54	0	50.2
1994	0	0	1.9	50.4	33.9			234.4	77.6	89	9.7	0	49.7
1995	15.4	14.4	13.1	28.3	54.2	102.5	112.5	185.3	155	21.1	55.7	22.9	65.0
1996	0	0	0	19.9	27.3	71.8	74.8	93.1	174.9	84.1	0.7	0	45.6
1997	0.6	0	44.7	78.6	84.3	124.3	119.6	38.9	42.7	83.5	11.3	0.7	52.4
1998	3.8	1.5	0	0	15.4	139.3	60.7	95.5	234.4	101.9	13.8	0	55.5
1999	0	0	1.2	0	14	72.8	196.3	80	85.6	98.7	4	9.4	46.8
2000	0	0.9	18.5	0	88.8	141.1	69	173.3	126.7	22.4	16.4	5.5	55.2
2001	5	19.3	6.5	27.9	63.8	154.8	102.2	125.2	135.4	57	4.2	0.2	58.5
2002	32.1	10.6	1.1	32.5	17.6	89.1	234.4	77	175.9	62.8	63.6	0	66.4
2003	6.4	0	0	4.4	12.6	87.1						0	15.8
2004	13.6	0	14.8	6.1	93.6	256.9	142.8	139.4	76.8	43	10.3	4.1	66.8
2005	12.1	1.5	9.5	6.8	18.8	77.6	190.3	96.6	98.8		0	2.2	46.7
2006	17.4	0	5.4	0	93.8	49.3	93.8	178	198.5	114.5	106.5	1	71.5
2007					31.5	95	180.8	134.9	225.4	54.4	9.7	8.4	92.5
2009	11.1	0	1.1	0.5	102.9	79.7	146.2	115.9	140.7	115.2	0	0	59.4
2010	38.5	79.2	0	11.9	42.3	49.7	174.1	79.2	144.9	2.6	0	0	51.9

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

### 1.3.2. Temperatura

Los datos de temperatura máxima y mínima tienen diversas utilidades en la agricultura, ya sea de riego temporal e incluso protegida. Identificar cuáles son los valores de temperatura mínima o máxima que se ocurren en cierta época del año puede ayudar a identificar que zonas son más aptas para el cultivo de ciertas especies, o que oportunidades puede tener una especie determinada y que estrategias se deben seguir para su correcto manejo. Con

el ordenamiento de los datos de temperaturas extremas pueden realizarse gran cantidad de análisis e indicadores, para tal propósito la temperatura máxima y mínima fue ordenada para cada día en los 24 años correspondientes. En la **Cuadro 1.6** se muestran los valores de temperatura máxima para una de las estaciones del Estado de México. Se observan variaciones de hasta 10 grados en la temperatura máxima dependiendo de los años. Sin embargo, se puede notar que en la mayoría de los años la temperatura máxima tiene variaciones menores a 3 grados entre los años mostrados.

Cuadro 1.6. Serie de datos para la temperatura máxima diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010.

Año-mes	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1981-01	17	15	18	17	18	23	20	20	19	18	18	21
1981-02	20	19	18	20	20	21	19	20	20	17	16	18
1981-03	19	20	21	20	19	18	18	18	22	19	20	21
1981-04	24	24	25	24	24	23	23	24	25	24	23	22
1981-05	20	22	21	23	24	24	22	20	21	24	25	26
1981-06	22	22	23	25	24	24	23	24	25	25	26	25
1981-07	22	22	22	22	22	23	19	18	17	20	21	21
1981-08	22	22	22	21	20	20	20	21	21	20	21	23
1981-09	20	20	20.5	22	20	20	19	20	20	20.5	20	20
1981-10	21	23	22	22	21	23	19	20	20	21	22	21
1981-11	20	21	20	20	21	21.5	20	20	21	19	19	18.5
1981-12	22	18	18	19	21	20	19	20	20	21	19	18.5
1982-01	18	20	19	20	20	14	19	20	21	19	20	19
1982-02	18	19	19	20	19	20	20	21	20	19	18.5	20
1982-03	19	20	20	20.5	20	19	19.5	19	21	20	20	19.5
1982-04	22	25	27	25	25	24	23	25	24	25	24	20
1982-05	24	24	25	22	23	22	22.5	23	21	25	24	23
1982-06	20	20	19	20	20.5	19	21	22	23	22	22	22.5
1982-07	18	20	20	20.5	21	20	19	21	22	21	20.5	19
1982-08	21	19	20	22	20	21	20	21	22	20	21	19.5
1982-09	18	19	20	20	19	20	20	20.5	21.5	20	22	21
1982-10	21.5	20	20	21	20.5	22	22	23	21.5	20	21	21.5
1982-11	18	17	19	18	19	18	15	19	17	16	17	17.5
1982-12	21	21	22	30	20	19	21	18	21	30	20	19

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

También es notable que en algunos años los valores de temperatura máxima son parecidos a los de otros años en las mismas fechas, sin embargo, algunos años tienen patrones

distintos, lo cual refleja la importancia de trabajar con datos de más de 24 años y que de esta forma puedan contemplarse más variaciones.

En el **Cuadro 1.7** se muestran los valores de temperatura mínima para una de las estaciones del Estado de México. Se observa que en algunos años se han alcanzado temperaturas bajo cero en esta parte de la república. Las temperaturas mínimas más bajas ocurren normalmente en los meses de enero y diciembre, justamente durante el invierno.

Cuadro 1.7. Serie de datos para la temperatura mínima diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010.

Año-mes	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1981-01	3	2	1	3	3	5	2	6	4	4	2	4
1981-02	6	3	4	3	4	5	5	3	4	5	2	2
1981-03	5	4	8	8	8	10	8	8	4	5	7	8
1981-04	6	7	8	7	8	4	5	6	5	5	5	6
1981-05	8	6	7	7	5	8	7	8	7	8	8	8
1981-06	9	8	8	10	11	10	10	8	8	10	10	10
1981-07	9	9	8	8	8	10	11	10	10	9	9	10
1981-08	9	9.5	10	8	10	8	8	7	7	7	12	8
1981-09	10	9.5	9	9	10	8	9	8	8.5	9	8	8
1981-10	10	9	10	9	9	10	6	9	10	11	10	9
1981-11	8	7	8	10	9.5	11	12	9	5	7	5	5
1981-12	7	8	4	3	4	3	4	3	3	4	3.5	3
1982-01	6	7	5.5	6	4	3	2	4	3	4	3	4
1982-02	4	3	3	2	3	3	3	2	4	4	3	4.5
1982-03	3	3	4	4	3.5	4	3	3	3	4	3	3
1982-04	8	7	10	11	10	9	10	9.5	10	10	9	9
1982-05	8	7.5	7	6	4	5.5	5	5	5.5	4	6.5	9
1982-06	8	8	6	5	8	6.5	5	6	6.5	7	7	6
1982-07	9.5	8	9	8	9.5	7	8	6	8	8	7.5	7
1982-08	7	7	6	9	9	7	8	7.5	8	6	8.5	9
1982-09	5	5	6	7	6	5.5	7	6	8.5	9.5	8	6
1982-10	9	6.5	8	8	7	8	7	8	9	8	7	8
1982-11	5	5	4	2	2	2	3	1	1	1	0	2
1982-12	6	7	8	7	8	6	6	8	4	7	7	6.5

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Considerar la temperatura mínima durante todo el año proporciona elementos para encontrar las condiciones del año en que dichas temperaturas no sean tan bajas y afecten

al cultivo. Aunque gran parte de los efectos causados por temperaturas bajas pueden ser controlados con el empleo de agricultura protegida, esto puede causar que los costos de mantenimiento del cultivo en condiciones óptimas se eleven, por lo que identificar las fechas más propicias es económicamente más rentable.

Respecto a la temperatura media, ésta no se encuentra reportada en la base de datos que se obtuvo del SMN (solo se tienen la media y extremas diarias de temperatura máxima, mínima, precipitación y evaporación), la temperatura media se calculó mediante la suma de los valores de temperatura máxima y mínima divididos entre dos para cada día y año. El resumen de los resultados del ordenamiento se muestra en el **Cuadro 1.8** para una estación del estado de México. En esta zona se observan temperaturas medias relativamente bajas que se encuentran cerca del límite inferior de varios cultivos.

Cuadro 1.8. Serie de datos para la temperatura media diaria en la estación 15002, Aculco, Estado de México, para el periodo 1981-2010.

Año-mes	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12
1981-01	10	8.5	9.5	10	10.5	14	11	13	11.5	11	10	12.5
1981-02	13	11	11	11.5	12	13	12	11.5	12	11	9	10
1981-03	12	12	14.5	14	13.5	14	13	13	13	12	13.5	14.5
1981-04	15	15.5	16.5	15.5	16	13.5	14	15	15	14.5	14	14
1981-05	14	14	14	15	14.5	16	14.5	14	14	16	16.5	17
1981-06	15.5	15	15.5	17.5	17.5	17	16.5	16	16.5	17.5	18	17.5
1981-07	15.5	15.5	15	15	15	16.5	15	14	13.5	14.5	15	15.5
1981-08	15.5	15.7	16	14.5	15	14	14	14	14	13.5	16.5	15.5
1981-09	15	14.7	14.7	15.5	15	14	14	14	14.2	14.7	14	14
1981-10	15.5	16	16	15.5	15	16.5	12.5	14.5	15	16	16	15
1981-11	14	14	14	15	15.2	16.2	16	14.5	13	13	12	11.7
1981-12	14.5	13	11	11	12.5	11.5	11.5	11.5	11.5	12.5	11.2	10.7
1982-01	12	13.5	12.2	13	12	8.5	10.5	12	12	11.5	11.5	11.5
1982-02	11	11	11	11	11	11.5	11.5	11.5	12	11.5	10.7	12.2
1982-03	11	11.5	12	12.2	11.7	11.5	11.2	11	12	12	11.5	11.2
1982-04	15	16	18.5	18	17.5	16.5	16.5	17.2	17	17.5	16.5	14.5
1982-05	16	15.7	16	14	13.5	13.7	13.7	14	13.2	14.5	15.2	16
1982-06	14	14	12.5	12.5	14.2	12.7	13	14	14.7	14.5	14.5	14.2
1982-07	13.7	14	14.5	14.2	15.2	13.5	13.5	13.5	15	14.5	14	13
1982-08	14	13	13	15.5	14.5	14	14	14.2	15	13	14.7	14.2
1982-09	11.5	12	13	13.5	12.5	12.7	13.5	13.2	15	14.7	15	13.5
1982-10	15.2	13.2	14	14.5	13.7	15	14.5	15.5	15.2	14	14	14.7
1982-11	11.5	11	11.5	10	10.5	10	9	10	9	8.5	8.5	9.7
1982-12	13.5	14	15	18.5	14	12.5	13.5	13	12.5	18.5	13.5	12.7

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

## 1.4. Información agronómica

### 1.4.1. Zonas productoras en AP

Se descargó la información del sitio del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017c), de la cual se escogió la Superficie Agrícola Protegida. En esta base de datos se muestra la superficie cubierta y número de instalaciones de agricultura protegida al año 2014. Los tipos de infraestructuras para agricultura protegida incluyen: casa sombra, invernadero, macrotúnel, microtúnel, pabellón, techo sombra y vivero, en estado funcional activo e inactivo.

En el **Cuadro 1.9** se observa que el estado con mayor superficie cubierta por agricultura protegida es Sinaloa, sin embargo, no es el estado con mayor número de instalaciones, lo que indica que gran parte de las instalaciones en este estado son a gran escala.

Cuadro 1.9. Estados con mayor superficie en agricultura protegida.

Entidad Federativa	Número de instalaciones	Superficie cubierta (Ha)
Sinaloa	1074	4744.221
Jalisco	3004	3310.091
Baja California	1339	2689.914
México	5564	1517.391
Chihuahua	275	1497.742
Sonora	724	1196.434
Puebla	3021	1071.249
Michoacán	870	1004.059
San Luis Potosí	1129	901.413
Baja California Sur	364	803.199
Guanajuato	811	655.338
Oaxaca	4671	482.91
Colima	439	425.379
Zacatecas	729	410.538
Coahuila	327	353.99
Tamaulipas	286	295.189
Chiapas	3651	273.74
Hidalgo	2556	272.469
Querétaro	573	244.77
Morelos	1038	237.532
Distrito Federal	2856	152.449
Guerrero	907	151.28
Nayarit	555	121.078
Veracruz	367	112.377

Entidad Federativa	Número de instalaciones	Superficie cubierta (Ha)
Nuevo León	282	106.642
Aguascalientes	238	87.957
Tlaxcala	1163	81.053
Durango	365	75.024
Campeche	199	69.513
Yucatán	360	67.889
Quintana Roo	151	56.483
Tabasco	89	13.608

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.

Además, se seleccionaron dos municipios por estado donde se tiene la mayor superficie de agricultura protegida. En la **Figura 1.1** se observa que las regiones con mayor superficie se encuentran en los estados de Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, México, Jalisco, Sinaloa y Sonora. Las regiones con menos superficie cubierta con agricultura protegida se encuentran principalmente en el sureste, con superficies mucho menores a las 50 hectáreas.

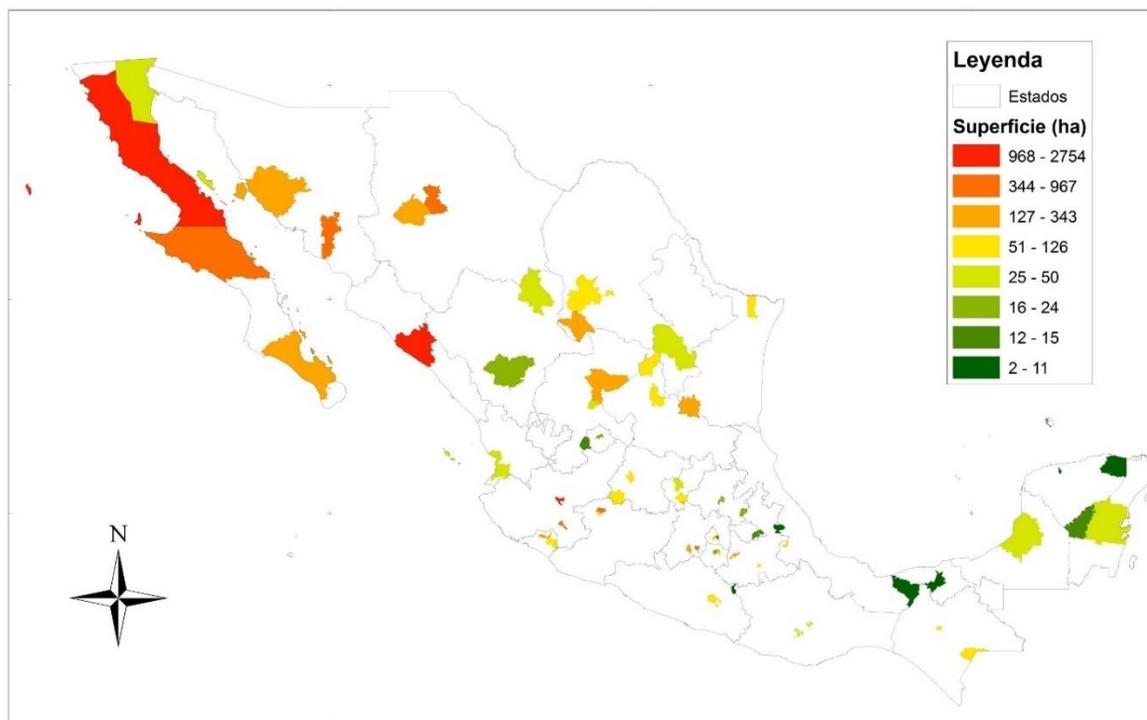


Figura 1.1. Dos municipios por estado donde se desarrolla la mayor superficie de agricultura protegida. Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.

De los tipos de estructuras para la agricultura protegida se seleccionaron únicamente los invernaderos en estado funcional activo para tener una perspectiva más enfocada a la producción en invernadero. El **Cuadro 1.10** muestra que el estado con mayor número de estructuras y de superficie cubierta por invernaderos es Jalisco, seguido por Sinaloa y el Estado de México. Con ello se infiere que la mayor parte de las estructuras de agricultura protegida en Sinaloa no son invernaderos, sino más bien casas sombra.

Cuadro 1.10. Superficie cubierta de invernaderos en estado activo en los estados de la república mexicana, en el 2014.

Entidad Federativa	Número de instalaciones	Superficie cubierta (Ha)
Jalisco	1662	948.105
Sinaloa	697	720.747
México	2572	603.98
Guanajuato	716	455.003
Baja California	683	415.26
Oaxaca	3917	397.744
San Luis Potosí	605	394.246
Zacatecas	623	304.952
Colima	303	302.925
Michoacán	550	271.822
Puebla	1892	271.69
Hidalgo	1630	220.374
Coahuila	143	199.836
Querétaro	486	197.895
Morelos	656	176.835
Sonora	228	166.232
Nuevo León	282	106.642
Tamaulipas	148	104.42
Guerrero	673	88.798
Distrito Federal	1284	82.739
Chihuahua	132	76.697
Nayarit	287	70.922
Tlaxcala	520	53.214
Durango	241	45.696
Yucatán	244	45.065
Baja California Sur	41	43.1
Chiapas	409	35.609
Aguascalientes	129	31.337
Campeche	102	19.724
Quintana Roo	90	18.634

Entidad Federativa	Número de instalaciones	Superficie cubierta (Ha)
Veracruz	94	12.097
Tabasco	58	5.294

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.

De los estados con mayor superficie de invernaderos fueron elegidos los estados de México y San Luis Potosí, ya que, de acuerdo con el análisis de los datos climáticos, pueden ser considerados como zonas climáticamente contrastantes. Es decir, que el Estado de México se caracteriza por presentar temperaturas bajas en la mayor parte de su territorio además de precipitaciones arriba de los 1000 mm, mientras que en el estado de San Luis Potosí predominan las temperaturas altas y en algunas zonas la precipitación es menor a 300 mm.

#### 1.4.2. Principales tipos de invernaderos

Un invernadero es una construcción agrícola dotada de una cubierta traslúcida, en cuyo interior se reproducen o simulan las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento y desarrollo de los cultivos establecidos, con cierta independencia del medio exterior. Los invernaderos son construidos con distintos materiales y su altura es mayor de dos metros en la parte útil, el ancho usualmente es mayor a seis metros y el largo es variable, además, al unir varias naves o módulos se obtienen grandes dimensiones de superficies cubiertas, conocidas como invernaderos en batería. Los invernaderos son las estructuras más eficientes para modificar y controlar los principales factores ambientales que intervienen en el desarrollo de las especies vegetales. Por su tamaño, permiten que todas las labores y prácticas que requieren los cultivos se realicen en el interior de las instalaciones (Juárez-López et al., 2011).

Existen varios criterios de clasificación de los invernaderos, que puede ser por el tipo de material de cobertura, por la forma de la estructura o por el grado de tecnificación. De acuerdo con la forma que pueden tener las estructuras, los tipos de invernaderos más comunes son (Buozo & Gariglio, 2009; Horticultivos, 2017):

- Invernadero tipo túnel. No hay un parámetro definido para establecer una línea divisoria entre lo que es un invernadero y un macrotúnel. Se trata de invernaderos que tienen una altura y anchura variables. Son de fácil instalación con alta resistencia a los vientos, recomendados para cultivos de bajo o mediano porte. La **Figura 1.2a** muestra un ejemplo de invernadero tipo túnel.
- Invernadero capilla (a dos aguas). Tienen el techo formando uno o dos planos inclinados (**Figura 1.2b**). La ventilación de estos invernaderos en unidades sueltas no ofrece dificultades. Son de fácil construcción y se pueden utilizar materiales de

bajo costo. Permite la unión de varias naves en batería, aunque esto genera problemas de ventilación.

- Invernaderos en dientes de sierra. Son una variación de los invernaderos capilla, se originaron de los invernaderos a una sola vertiente. Se comenzó a utilizar en zonas con muy baja precipitación y altos niveles de radiación. Son construcciones de mediana complejidad y ventilación excelente (Figura 1.2c).
- Invernadero tipo raspa y amagado. Resultan de una variación de los invernaderos planos, con la finalidad de mejorar la evacuación del agua que se acumula en el techo al llover. La parte alta, conocida como “raspa” está sostenida mediante tubos galvanizados y alambres, mientras que la parte baja, conocida como “amagado”, se une a la estructura mediante horquillas de hierro sujetas a la base del invernadero (Figura 1.2d). Es recomendable para climas templados y resistente a fuertes vientos.
- Invernadero asimétrico. La geometría asimétrica consiste en que uno de los lados de la cubierta está más inclinado que el otro. La inclinación depende de la incidencia de la luz solar al medio día. El uso de estos invernaderos está muy extendido en climas tropicales. En su interior pueden cultivarse todo tipo de cultivos en clima tropical, con temperaturas cálidas y alta humedad. También proporciona una ventilación cenital eficaz (Figura 1.2e).
- Invernadero con techumbre curva. Este tipo de invernadero se originó del invernadero tipo túnel. Según la forma que adopte el techo pueden encontrarse distintas alternativas (circulares, semielípticos, medio punto, ojivales). Junto con los invernaderos tipo túnel, es el de más alta transmitancia a la luz solar y tiene buena resistencia a los vientos, sin embargo, presenta dificultades con la ventilación (Figura 1.2f).
- Invernadero plano o tipo parral. Este tipo de invernadero es usado en zonas poco lluviosas. Son construidos de palos y alambres, denominados parral por ser una versión modificada de los tendidos de alambre empleados en los parrales para uva de mesa. La pendiente es casi inexistente, o bien suele darse  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$  (Figura 1.2g). Su principal ventaja es su construcción económica, adaptabilidad a la geometría del terreno y mayor resistencia al viento. Sin embargo, posee una ventilación deficiente y alto riesgo de rotura por precipitaciones intensas.
- Invernadero tipo venlo. Son invernaderos de estructura metálica prefabricada con cubierta de vidrio (Figura 1.2h) y se emplean generalmente en el norte de Europa. Los paneles descansan sobre los canales de recogida del agua pluvial. Estos invernaderos carecen de ventanas laterales (puede ser debido a que en Holanda no existen demasiadas exigencias en cuanto a ventilación). En vez, tiene ventanas

cenitales alternadas en su apertura. Tienen el mejor comportamiento térmico y alto grado de control de las condiciones ambientales, sin embargo, son de alto costo.

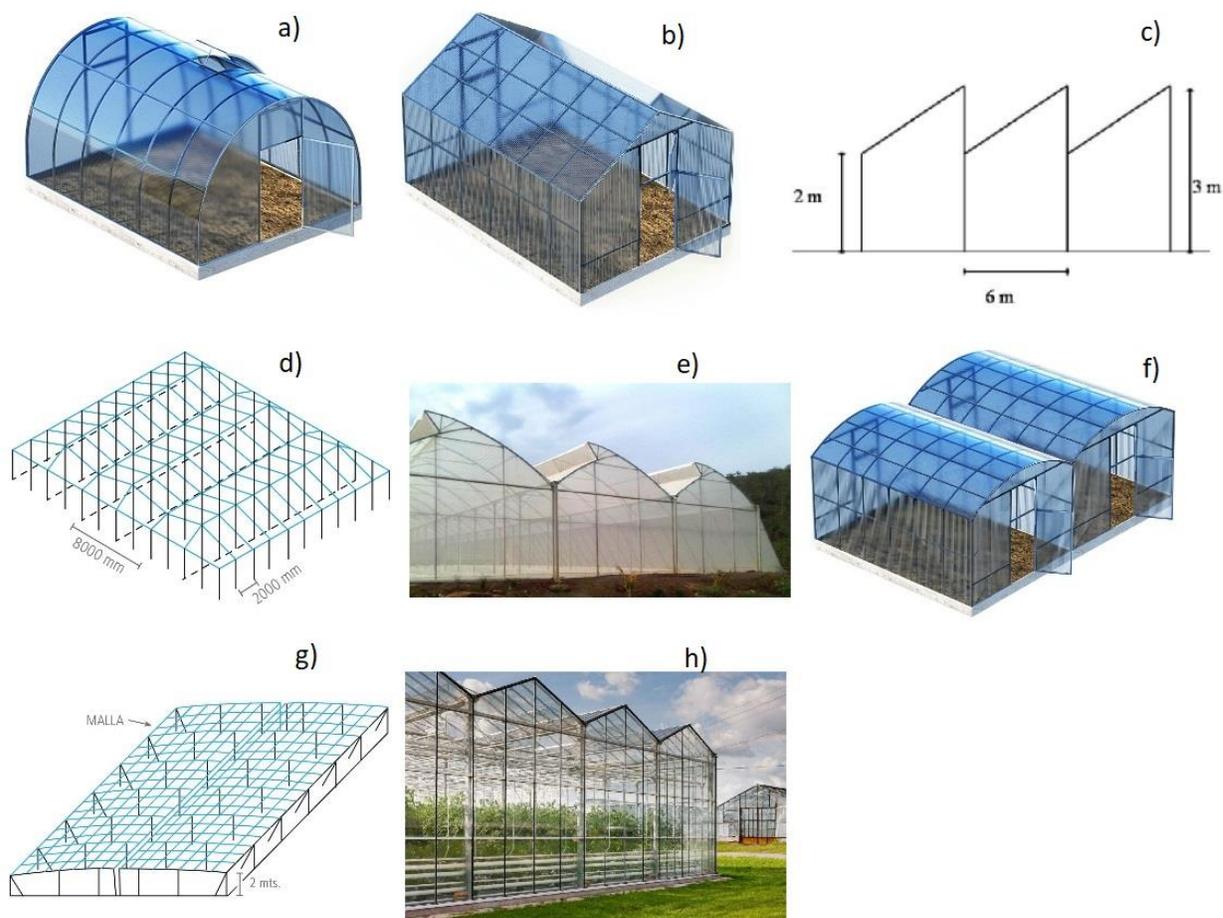


Figura 1.2. Tipos de invernaderos.

Fuente: Horticultivos (2017), Buozo & Gariglio (2009).

Con relación al nivel de tecnificación de invernaderos en México, la mayoría de éstos se consideran de baja y media tecnología, en función de lo siguiente (Juárez-López et al., 2011):

- 1) Tecnología baja: es 100% dependiente del ambiente, al hacer uso de tecnologías simples similares a las utilizadas en cultivo a intemperie.
- 2) Tecnología media: corresponde a estructuras modulares o en batería que están semi-climatizadas, con riegos programados, y pueden ser en suelo o hidroponía. Por lo general la productividad y calidad es mayor que en el nivel anterior.
- 3) Tecnología alta: en este nivel se incluyen instalaciones que cuentan con control climático automatizado (mayor independencia del clima externo), riegos, computarizados y de

precisión, inyecciones de CO<sub>2</sub>, para ello cuentan con sensores y dispositivos que operan los sistemas de riego y ventilación, pantallas térmicas para el control de la iluminación y cultivo en sustratos.

Debido a que el invernadero basa su adaptación climática de acuerdo con las características climáticas externas, es deseable que el tipo de invernadero también este basado en las necesidades climáticas. En este sentido, las condiciones semiáridas de la meseta potosina y altiplano de San Luis Potosí contrastan al clima templado del oriente del Estado de México, lo cual implica una tipología específica que aporte el desarrollo potencial del invernadero al menor costo ambiental. Los invernaderos típicos de la zona del estado de México pueden ser observados en las **Figura 1.3** y **Texcoco Figura 1.4**).



Figura 1.3. Invernadero en Coatlinchán, Estado de México.

Fuente: Autoría propia.

En ambos invernaderos el cultivo en producción era jitomate en diferentes etapas fenológicas. Sin embargo, la forma de producción es la misma en la región, ya que las características climáticas son similares. El medio de cultivo es en sustrato, en el cual emplean una mezcla de tezontle y materia orgánica como sustrato y las variedades de tomate empleadas son de crecimiento indeterminado.

La estructura de los invernaderos es de acero galvanizado, la cubierta de polietileno y tienen instaladas mallas anti insectos en las zonas de las ventilas.



Figura 1.4. Invernadero en Texcoco, Estado de México.

Fuente: Autoría propia.

En el estado de San Luis Potosí los invernaderos típicos como los que se desarrollan en Santa María del Río y Villa de Arista, son invernaderos tipo multitunel, como los que se observan en la **Figura 1.5**. También, debido a las altas temperaturas de la zona, los productores han optado por la utilización de casas sombra, como las mostradas en la **Figura 1.6**.



Figura 1.5. Invernaderos en Santa María, San Luis Potosí.

Fuente: Autoría propia.

Las estructuras de los invernaderos multitunel y de las casas sombra es de acero galvanizado y aluminio. La cubierta de los invernaderos es de polietileno y la malla de las casas sombra es generalmente con espesores de malla de 20x10 hilos/cm<sup>2</sup> y de 16x10 hilos/cm<sup>2</sup>.

Las mallas empleadas en los invernaderos son generalmente para cerrar en el caso de las casas sombra o como material de cerramiento secundario en las zonas de las ventilas de los invernaderos cumpliendo la función de detener a los insectos.



Figura 1.6. Casas sombra en Villa de Arista, San Luis Potosí.

Fuente: Autoría propia.

San Luis Potosí se encuentra en los primeros lugares de producción agrícola y el jitomate es de los principales cultivos que se producen. Recientemente el gobierno del estado aportó recursos para la modernización de varias hectáreas de agricultura protegida en la modalidad de invernaderos.

#### 1.4.3. Cultivo de jitomate

El jitomate es uno de los cultivos con mayor importancia económica y social en México, principalmente por el valor de la producción, así como por la generación de divisas y empleos en el país. Pertenece al género *Lycopersicon*, cuyo origen se encuentra en la región andina, pero fue en México donde se domesticó. La clasificación taxonómica del cultivo de jitomate se muestra en la **Cuadro 1.11**.

Cuadro 1.11. Clasificación taxonómica del tomate.

Nombre común	Tomate
Genero	<i>Lycopersicon</i>
Especie	<i>Esculentum</i>
Familia	Solanaceae
Subfamilia	Solanoideae
Subfamilia	Solaneae
Orden:	Solanales
Clase:	Magnoliopsida
División:	Magnoliophyta
Reino:	Plantae

Fuente: Flores-Velázquez, 2005

El jitomate presenta ramificación simpodial, con el tallo principal formado de 6 a 12 hojas que crecen lateralmente con una filotaxia de 2/5. La inflorescencia es un dicasio compuesto generalmente de 4 a 12 flores. El fruto es una baya globular, ovoide o aplastada. El crecimiento se produce a partir de la yema axilar de la última hoja, la cual desarrolla un tallo secundario que crece como una prolongación del tallo primario y desplaza lateralmente la inflorescencia (**Figura 1.7**) (Flores-Velázquez, 2005).



Figura 1.7. Planta de jitomate.

Fuente: Flores-Velázquez, 2005.

La planta se desarrolla bien en un amplio rango de latitudes, tipos de suelos, temperaturas y métodos de cultivo, y es moderadamente tolerante a la salinidad. En invernadero consume un 45 % menos de agua respecto al cultivado en el exterior. El mismo hecho de poder aislarlo de las condiciones exteriores permite avanzar hacia el invernadero cerrado donde las diferentes emisiones puedan ser controladas.

Los cultivos con crecimiento determinado, es decir limitado, pueden alcanzar 2 m de altura. La floración y fructificación se producen en un tiempo limitado, provocando la concentración de la producción y que de esta manera pueda efectuarse la recolección mecánica.

El tallo tiene un grosor de 2 a 4 cm de diámetro y cual está cubierto por pelos glandulares y no glandulares que salen de la epidermis, debajo de la cual se encuentra la corteza, cuyas células más externas contienen clorofila. La capa cortical más interna es la endodermis (Picken, Stewart, & Klapwijk, 1986).

Las hojas son pinnado compuestas, de 0.5 m de largo, con un gran foliolo terminal y hasta 8 laterales (**Figura 1.8**), los cuales son peciolados y lobulados con bordes dentados. La epidermis del envés contiene numerosos estomas que facilitan el intercambio gaseoso con el exterior (Coleman & Greyson, 1976; Picken et al., 1986).



Figura 1.8. Hoja de jitomate.

Fuente: Flores-Velázquez, 2005.

La flor consta de 5 o más pétalos, 5 o más sépalos dispuestos de forma helicoidal, presenta un número igual de estambres que se alternan con los pétalos (**Figura 1.9**). Es un tipo de flor perfecta, regular e hipógea, que se agrupa en inflorescencias de tipo racimoso. La primera flor se forma en la yema apical y las demás se desarrollan lateralmente (Greyson & Sawhney, 1972; Varga & Bruinsma, 1986).



Figura 1.9. Flor de jitomate.

Fuente: Flores-Velázquez, 2005.

El fruto se desarrolla a partir de un ovario de unos 5-10 mg, es una baya bi o plurilocular que alcanza un peso de entre 5 a 500 g (**Figura 1.10**), dependiendo de la variedad y las condiciones de desarrollo. Las partes que lo conforman son el pericarpio (compuesto por la pared externa, radial e interna), el tejido placentario y las semillas.



Figura 1.10. Frutos de jitomate.

Fuente: Flores-Velázquez, 2005.

El ciclo biológico depende de los factores climáticos y del genotipo. El empleo de escalas fenológicas permite referirse a las observaciones y prácticas de manejo del cultivo en una etapa determinada de desarrollo. Por tanto, el conocimiento de la fenología del tomate (**Figura 1.11**) y la duración de las distintas etapas se vuelven necesario.

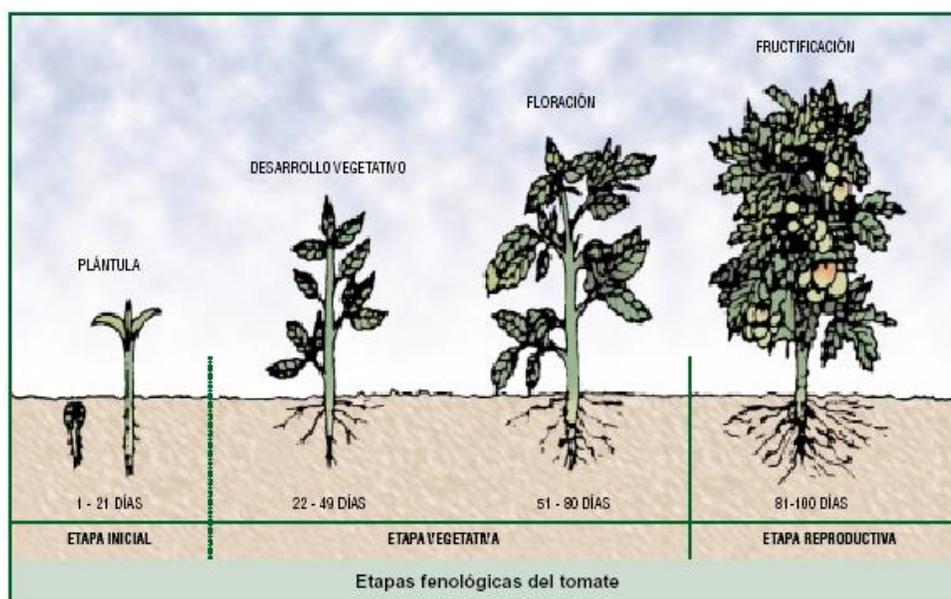


Figura 1.11. Etapas fenológicas del tomate (CENTA, 2003).

### 1.5. Influencia de las variables climáticas en el cultivo

El cultivo de jitomate es insensible al fotoperiodo, aunque requiere buena iluminación y entre 8 y 16 horas (Calvert, 1973). Los umbrales mínimos de radiación total diaria para la floración y cuajado van en torno a  $0.85 \text{ MJ/m}^2$ , siendo preferible mayor iluminación en menor periodo de tiempo (Kinet, 1989).

En la optimización de la intercepción de radiación por el cultivo se debe considerar la densidad de plantación, el sistema de poda y el tutorado, especialmente en la época de invierno cuando la radiación es más limitante.

En ocasiones se tiene la práctica de colocar doble capa de plástico en un invernadero para reducir las pérdidas de calor en invierno, lo que genera reducciones de la radiación interior y por consiguiente la disminución de la producción. La práctica de bloquear el invernadero en épocas calurosas con el fin de reducir las altas temperaturas genera la reducción de la radiación. En este caso es mejor implementar un sistema de ventilación más eficiente (Van de Vooren, Wellws, & Hayman, 1986).

El cultivo de jitomate tiene un rango de temperaturas medias en los cuales se desarrolla. El crecimiento del fruto de jitomate se reduce de manera significativa a una temperatura media diaria de  $24.4 \text{ }^\circ\text{C}$  (Jones, Kenig, & Vallejos, 1999). El cultivo responde linealmente a la temperatura siempre y cuando se encuentre en un rango óptimo de desarrollo. Según Atherton and Rudich (1986) la temperatura mínima de desarrollo del tomate es de  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Las altas temperaturas durante el fructificación provocan la caída de flor y limitan el cuajado. Körner and Challa (2003) reportan un valor de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  para activar el sistema de calentamiento pasivo y de  $34 \text{ }^\circ\text{C}$  para activar el sistema de ventilación usando un modelo de control climático.

La temperatura del suelo afecta también al cultivo del tomate, si estas son inferiores a  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  afectan el desarrollo radicular, repercutiendo en el crecimiento de las partes aéreas (Abdelhafeez, Harssema, Veri, & Verkerk, 1971). La temperatura del suelo también influye en la absorción del agua y nutrientes y la síntesis radicular de reguladores del crecimiento (Hurd & Sheard, 1981).

Las humedades relativas del aire inferiores al 90 % son deseables para el cultivo de jitomate, ya que el aumento de la humedad fomenta el desarrollo de enfermedades. El rango óptimo de humedad relativa va de 70 a 80%. La baja humedad relativa ocasiona el incremento de la tasa de transpiración, generando estrés hídrico, cierre de estomas y reducción de la fotosíntesis (Cooter & Walker, 1967; Winspear, Postlethwaite, & Cotton, 1970).

Con respecto al  $\text{CO}_2$ , las cantidades óptimas son de 700-800 ppm. Si no se tiene dichos niveles se recurre a la aportación externa, que permite compensar el consumo de las

plantas, estimula la fotosíntesis y acelera el crecimiento de las plantas. La calidad productiva y precocidad de los cultivos depende del enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, siempre teniendo presente que un exceso produce daños debidos al cierre de estomas y puede originar quemaduras (Flores-Velázquez, 2005).

#### 1.5.1. Radiación Solar

A excepción de una pequeña cantidad de calor originada en el centro de la tierra toda la energía que llega a la superficie proviene del sol (Rosenberg, Blad, & Verma, 1983). Sin embargo, del total de la energía emitida por el sol, una pequeña parte es la aprovechada por las plantas (1 %), y más aún, existen diferentes factores que provocan cambios en la manera de absorberse, razón por la cual, determinar la cantidad de radiación aprovechada por los cultivos resulta un proceso complejo.

La transmisión de calor por radiación se caracteriza porque la energía se transporta de una superficie a otra en forma de ondas electromagnéticas, que se propagan en línea recta a la velocidad de la luz y no requieren de un medio físico para transmitirse.

En toda superficie existen continuamente electrones que cambian de diferentes niveles, por lo que la energía radiante se emite en un abanico de frecuencias llamado *espectro de la radiación*. Cuando el origen de la radiación es el calor, la energía se emite en función solo de la temperatura y se denomina *radiación térmica*.

No todas las superficies emiten o absorben la misma cantidad de energía radiante cuando se calientan a la misma temperatura. Un cuerpo que absorba o emita a una temperatura determinada la máxima cantidad de energía se denomina superficie negra o simplemente *cuerpo negro*.

De la totalidad de radiación solar solo una pequeña parte, llamada radiación fotosintéticamente activa (PAR), es utilizada por las plantas para fotosintetizar y producir biomasa. Otros componentes de la radiación global son la radiación infrarroja, que aporta gran cantidad de energía necesaria para calentar objetos y en menor cantidad la radiación ultravioleta, cuyo impacto es visible si se presenta un gran deterioro de los materiales plásticos de recubrimiento del invernadero.

El balance de radiación representa el hecho de que la energía recibida por la tierra es la misma que se emite, razón por la cual se mantiene un Balance térmico. La **Figura 1.12** muestra el balance de radiación (térmico) de la atmósfera. De cada 100 unidades de energía que ingresan en la atmósfera, 51 son absorbidas por la tierra, 19 por la atmósfera y 30 reflejadas nuevamente al espacio. Las 70 unidades que absorbe el sistema Tierra-atmósfera (51 + 19 unidades) son irradiadas nuevamente al espacio como una radiación de onda larga.

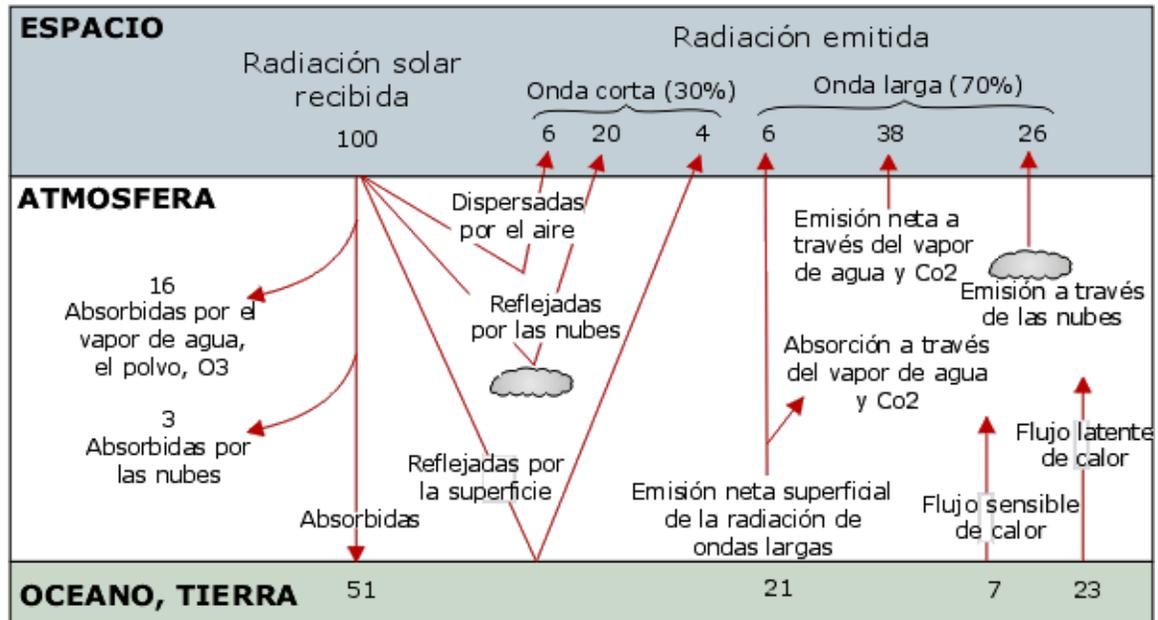


Figura 1.12. Radiación y balance térmico promedio anual de la atmósfera calculada para 100 unidades de radiación solar recibida (National Academy of Sciences, 1975).

En los estudios de balance de energía es importante el conocimiento de la magnitud de la radiación neta, la cual representa la cantidad de energía radiante que es retenida en la superficie terrestre y que aporta las bases para procesos como la transferencia de calor latente y sensible, así como la fotosíntesis, respiración, almacenamiento de calor por la cubierta vegetal, formación de materia orgánica etc.

En el invernadero, existen varios intercambios de energía, principalmente de calor sensible, sin embargo, el balance puede realizarse con los siguientes términos (Rosenberg et al., 1983):

$$R_n = S + A + LE + P + M \quad (1)$$

Donde:

$R_n$  es la energía radiante neta disponible, cuando todos los flujos de radiación han sido considerados.

$S$  identifica el flujo de calor que entra o sale del suelo.

$A$  se refiere al flujo de calor sensible entre la superficie y el aire.

$LE$  es el flujo de calor latente que llega o sale de la superficie a través de la vaporización o condensación del agua.

P en este caso es la energía fijada en las plantas por medio de la fotosíntesis, y

M relaciona la energía involucrada en procesos misceláneos como respiración y calor almacenado en la cobertura de los cultivos.

La determinación de la radiación térmica y de la radiación neta se puede efectuar por medición directa con pirgeómetros. Sin embargo, hay pocos, lo que ha obligado a establecer métodos empíricos para su determinación, tales como las cartas de Radiación.

Cuando la ganancia de calor excede la pérdida, la radiación neta tiene signo positivo, y será negativa en caso contrario. Generalmente es positiva en el día, y negativa en la noche. La radiación neta es aquella que es recibida en la superficie terrestre y que no es reflejada o vuelta a emitir hacia la atmósfera (Romo & Arteaga, 1983). Puede expresarse para un instante o para un periodo dado y en ambos casos representa la diferencia entre el ingreso y el egreso de radiación, la carga radiante efectiva sobre una superficie, esto es:

$$R_n = R_{g \downarrow} + R_{L \downarrow} - R_{g \uparrow} - R_{L \uparrow} \quad (2)$$

Donde:

R<sub>n</sub> Radiación neta

R<sub>g</sub> ↓ Radiación solar incidente (onda corta)

R<sub>L</sub> ↓ Radiación atmosférica incidente (onda larga)

R<sub>g</sub> ↑ Radiación solar reflejada (onda corta)

R<sub>L</sub> ↑ Radiación terrestre emitida (onda larga)

Es conveniente comentar que la radiación solar incidente o radiación global (R<sub>g</sub> ↓) se compone de la suma de la radiación directa (R<sub>dir</sub>) y la radiación solar difusa (R<sub>dif</sub>), es decir:

$$R_{g \downarrow} = R_{dir} + R_{dif} \quad (3)$$

Debido a que la radiación efectiva emitida (radiación efectiva (R<sub>b</sub> ↑) es la diferencia entre la radiación atmosférica (R<sub>L</sub> ↓) y la radiación terrestre emitida (R<sub>L</sub> ↑):

$$R_{b \uparrow} = R_{L \uparrow} - R_{L \downarrow} \quad (4)$$

$$-R_b \uparrow = -R_L \uparrow + R_L \downarrow \quad (5)$$

De estas ecuaciones deriva

$$R_n = R_g \downarrow - R_g \uparrow - R_b \uparrow \quad (6)$$

Misma que puede expresarse de la siguiente manera

$$R_n = R_g(1 - \alpha) - R_b \quad (7)$$

Donde:

$R_n$  es la radiación neta

$\alpha$  = albedo de la superficie

$R_g$  radiación global, y

$R_b$  balance de radiación de onda larga.

El albedo ( $\alpha$ ) es la fracción de la radiación solar de onda corta que es reflejada del suelo y de la superficie del cultivo de la atmósfera. Este depende del ángulo con que inciden los rayos del sol sobre un plano horizontal de la superficie terrestre. Dicho ángulo se denomina altitud solar y varía con el día del año, la hora, la latitud, y de factores como vegetación, textura y humedad del suelo.

La radiación solar en parte es absorbida por suelo, planta y objetos dentro del invernadero, siendo convertida en energía térmica e irradiada como radiación térmica o disipada por convección, conducción y transpiración.

Dentro de un invernadero la cantidad de radiación que llega es menor que en el exterior debido a la reflexión y absorción del material de cubierta, este efecto depende del coeficiente de transmisividad, el cual varía a lo largo del año debido al distinto ángulo de incidencia de los rayos solares y a la acumulación de polvo en la cubierta de los invernaderos (López-Gálvez & López Hernández, 1991).

La orientación del invernadero y el tipo de cubierta juega un papel primordial en la captación de radiación solar, por ejemplo, los meses de diciembre y enero, la radiación

exterior media diaria medida en plano horizontal no sobrepasó los  $12.0870 \text{ W m}^{-2}$  día, frente a los  $19.5682 \text{ W m}^{-2}$  día registrados en el mes de abril, sin embargo, al interior del mismo, estas diferencias se marcan, llegando a reducir hasta  $4 \text{ W m}^{-2}$  día, ello es debido al ángulo con que los rayos solares inciden, que es menor en los meses de invierno. Esa disminución del ángulo de incidencia supone un aumento de la componente de reflexión que es particularmente importante en los invernaderos con cubierta plana.

#### 1.5.2. Humedad Relativa

Este parámetro climático está en estrecha vinculación con la temperatura, y es directamente responsable de la actividad metabólica de los cultivos, en muchos momentos del día es el contenido de vapor en el aire quien determina si las plantas están o no en actividad.

La transpiración de las plantas participa en la transferencia de los elementos nutritivos absorbidos por las raíces, regula la temperatura de las hojas, frutos, y en ambientes cerrados una vez que el cultivo ha logrado una cobertura foliar sobre el suelo, el volumen de agua transpirado es prácticamente el mismo evapotranspirado y por lo tanto, es el volumen de agua que hay que reponer a la planta para que lleva a cabo sus actividades metabólicas.

La intensidad de la transpiración depende de las diferencias de presión de vapor entre la atmósfera de las cámaras subestomáticas de los tejidos vegetales y el aire. Bajo condiciones de humedad relativa muy alta o muy baja, se reduce la transpiración al promoverse el cierre de estomas y en consecuencia la reducción de la absorción de  $\text{CO}_2$ .

Una humedad relativa muy alta significa un déficit de presión muy bajo, por lo tanto, los intercambios gaseosos son reducidos (Monteith, 1973), la transpiración se reduce pudiendo ocasionar alteraciones fisiológicas, tales como pudredumbre apical y en consecuencia un crecimiento muy lento.

Si la humedad relativa es baja, las estomas cierran y al no haber intercambio gaseosos, la fotosíntesis se reduce, al dejar de transpirar, por lo tanto no regula su temperatura y no participa del estado higrométrico de la atmósfera. Durante la fase vegetativa, el tomate necesita valores de HR de 70 a 80 % (INTA, 2003), humedades más altas permite el desarrollo de enfermedades. El exceso de humedad puede producir la caída de flores y compromete la dehiscencia de las anteras en la mayoría de las especies. La falta de HR reduce el periodo de receptividad de los estigmas y malogra la germinación del polen ocasionando bajas tasas de fecundación.

El desarrollo de numerosos patógenos se ve favorecido por una HR alta, con un rango de temperaturas variable, por ejemplo, los que necesitan un medio líquido para propagarse como las esporas, se verán en condiciones óptimas con las condensaciones sobre el follaje. Con HR bajas las condiciones son propicias para la propagación de ácaros.

La humedad relativa (HR [%]) que se define como la tensión actual de vapor sobre la tensión a saturación de la misma masa de aire y se expresa en porcentaje (Monteith, 1973), es la característica obtenida por los higrógrafos, algebraicamente se expresa como:

$$HR = \frac{e_a}{e_s} 100 \quad (8)$$

Hr= humedad relativa diaria (%).

$e_a$ = presión parcial de vapor de agua, (kPa)

$e_s$  = presión de vapor del líquido a saturación a Temperatura constante, (kPa)

para su cálculo se usan:

$$e_a = 610.7 e^{\frac{17.4T_d}{239+T_d}} \quad (9)$$

donde:

$T_d$  es la temperatura del punto de rocío (°C)

$$e_s = 610.7 e^{\frac{12.4T_o}{T_o+239}} \quad (10)$$

donde  $e$  es la base de los logaritmos neperianos = 2,7183.

$T_o$  es la temperatura promedio (°C)

Para el cálculo del valor promedio se toma la temperatura del aire como la media entre la máxima y la media diaria expresada como:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (11)$$

si no se tiene valores máximos y mínimos es posible calcular con la temperatura y humedad promedio la presión de vapor a saturación con la ecuación 1-22 (Monteith, 1973), en cuyo caso solo resta la estimación de la tensión de vapor a saturación la cual se despeja de la ecuación 1-20 quedando como sigue:

$$e_a = \frac{HR}{100}(e_s) \quad (12)$$

#### 1.5.2.1. Humedad ambiental

Una variable ambiental relacionada con el estrés de los cultivos es la humedad del aire. El aire seco tiene mayor capacidad para absorber y transportar vapor de agua que un aire húmedo a la misma temperatura; en consecuencia, un aire seco promueve la transpiración de los cultivos. Bajo condiciones de humedad relativa muy alta o muy baja, se reduce la transpiración al promoverse el cierre de estomas y en consecuencia la reducción de la absorción de CO<sub>2</sub>.

La transpiración del cultivo adiciona vapor de agua al ambiente, que en ambientes cerrados como un invernadero provoca cambios drásticos en la humedad del aire. Cada especie presenta variantes en su respuesta a la humedad relativa. El tomate responde mejor a ambientes de humedad relativa de 50-80% dependiendo de la temperatura ambiental.

#### 1.5.3. Contenido de CO<sub>2</sub>

El anhídrido carbónico de la atmósfera es el material indispensable de la función calorífica de las plantas, particularmente en el invernadero el enriquecimiento de la atmósfera con CO<sub>2</sub> tiene especial interés, debido a que dicha atmósfera tiene serias limitantes de movimiento, esto principalmente en cultivo de hortalizas.

La concentración normal de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es de 370 μmol mol<sup>-1</sup> (Lorenzo, 1994) pero en el invernadero este índice puede disminuir a niveles tan bajos del orden de 150 ppm. El suplemento de CO<sub>2</sub> a concentraciones superiores a los 400 μmol mol<sup>-1</sup> es aplicado en tasas bajas de ventilación.

En invernaderos con ventilación natural la concentración de este gas es muy variable durante el día, alcanzando valores máximos al final de la noche y el mínimo en las horas de máxima radiación, que en el caso de Chapingo, ocurren al medio día.

En un invernadero cerrado por la noche, antes de iniciar la ventilación con la abertura de las ventanas por la mañana, las concentraciones pueden registrarse valores entre 250-270  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  (Lorenzo, Maroto, & Castilla, 1990) que al mismo tiempo que reducen la asimilación neta de carbono, incrementan la conductancia estomática y pueden originar un desequilibrio hídrico en el cultivo y por consecuencia la fotosíntesis drásticamente se reduce.

En regiones frías, donde la necesidad de mantener una temperatura adecuada al cultivo obliga a mantener el invernadero cerrado, las condiciones límites de  $\text{CO}_2$  pueden presentarse a cualquier hora del día, lo que significa una marcada reducción de  $\text{CO}_2$  aprovechable por los vegetales y del mismo modo de fotosíntesis.

Esta situación no es solo producto de la ventilación, variables como la especie cultivada, radiación solar, temperatura y la humedad también determinan los niveles de  $\text{CO}_2$ . Por ejemplo, el óptimo de asimilación ocurre entre los 18 y 23 ° C de temperatura (Infoagro, 2017).

La luz es factor limitante y así, la tasa de absorción de  $\text{CO}_2$  es proporcional a la cantidad de luz recibida, además de depender también de la propia concentración de  $\text{CO}_2$  disponible en la atmósfera de la planta. Se puede decir que el periodo más importante para la absorción de anhídrido carbónico es al medio día, que es la parte del día en que se dan las mejores condiciones de luminosidad.

#### 1.5.4. Viento

Desde el punto de vista físico, el viento en el invernadero tiene la capacidad de transferir vapor atmosférico. A nivel de la planta, tiene la función de remover el vapor alrededor de las hojas, evitando así la saturación del ambiente y consecuentemente el cierre estomático.

##### 1.5.4.1. *Velocidad del viento*

El viento es otra variable de importancia en la transferencia de vapor atmosférico, es un agente de remoción del vapor saturado alrededor de las hojas, agente para uniformizar el  $\text{CO}_2$  y la temperatura. Bajo condiciones de limitada ventilación, el vapor de agua se acumularía en el interior del invernadero y eventualmente saturaría una espesa capa de aire en la vecindad de las hojas con la consiguiente reducción de la tasa transpirativa del cultivo. En ausencia de ventilación forzada, la ventilación natural o pasiva juega un papel importante para mantener el cultivo bajo las mejores condiciones ambientales.

Bajo condiciones de limitada ventilación, se presenta un gradiente térmico provocado por el ascenso del aire caliente. Para uniformizar la temperatura, se recurre al uso de ventanas cenitales y laterales, y a ventiladores para crear el movimiento de la masa de aire dentro del invernadero. Para asegurar una distribución relativamente uniforme, la capacidad total del ventilador debe ser equivalente al movimiento de un cuarto del volumen del invernadero por minuto (Jensen, 2004). Por lo tanto, las necesidades de ventilación de un

cultivo están en función no sólo del tipo de invernadero sino del tipo y etapa del cultivo y de las condiciones ambientales externas.

#### 1.5.4.2. Déficit de presión de vapor (DPV)

El déficit de presión de vapor (DPV) es un valor útil para expresar el flujo de vapor en un invernadero. Permite conocer la tendencia del flujo hacia condensación o transpiración. Altos valores de DPV propician la transpiración del cultivo a expensas de la humedad del sustrato y de los tejidos vegetales. Valores bajos del DPV indican cercanía al punto de rocío, generándose condiciones de condensación que es muy dañina bajo condiciones de invernadero (J. C. Bakker, 1990).

Los valores de DPV integran tanto a la humedad relativa como a la temperatura. Proporciona un estimador del grado de saturación del vapor del aire y la tendencia ambiental para promover la transpiración o condensación y, en consecuencia, para conocer el estado de las condiciones ambientales en el desarrollo óptimo de los cultivos.

A la diferencia entre las presiones de vapor a saturación ( $e_s$ ) y actual ( $e_a$ ) se le conoce como déficit de presión de vapor (DPV, con unidades de presión, usualmente kPa) (Monteith, 1973):

$$DPV = e_s - e_a \quad (13)$$

Cuyos términos han sido definidos.

Cada especie responde a rangos óptimos del DPV para su desarrollo. El DPV es útil no sólo para conocer la demanda evaporativa del ambiente sino también para identificar condiciones ambientales propicias para el desarrollo de enfermedades. Por ejemplo, Prenger and Ling (2001) mencionan una regla práctica de sobrevivencia de hongos patógenos cuando los valores de DPV se encuentran por abajo de 0.43 kPa, siendo su actividad más dañina para valores de DPV por debajo de 0.20 kPa. El correspondiente valor de la HR para un DPV de 0.20 kPa aumenta con la temperatura. Valores óptimos del DPV para evitar el cierre de estomas se encuentra en el rango de 0.5-1.5 kPa.

#### 1.5.5. Indicadores climáticos

Según el Programa Integral de Agricultura Sostenible y Reconversión Productiva en Zonas de Siniestralidad Recurrente (PIASRE) los peligros por fenómenos climáticos que tienen efectos sobre la producción agropecuaria, incluyendo la agricultura protegida son:

1. Sequía
2. Lluvias torrenciales
3. Granizadas
4. Heladas
5. Limitantes del suelo

La diversidad climática de México ocasiona diferentes riesgos en el país. Debido a esto, no se puede aplicar la misma estrategia en la agricultura protegida para todas las regiones de la República Mexicana.

#### 1.5.5.1. Riesgo de heladas

Actualmente se han elaborado metodologías para la estimación de índices de riesgo por bajas temperaturas y distintos fenómenos hidrometeorológicos enfocados a la protección civil (Jiménez Espinosa, Baeza Ramírez, Matías Ramírez, & Eslava Morales, 2012; Jiménez Espinosa, Matías Ramírez, & Eslava Morales, 2009).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) actualizó la metodología del Índice de Peligro por Bajas Temperaturas (IPBT), en el cual se emplean los parámetros de días con heladas y temperatura mínima extremas. De acuerdo con Jiménez Espinosa et al. (2012) existen dos grandes regiones en México que son afectadas por las heladas, una ubicada al norte de la república mexicana, que es la de mayor extensión, y otra en el centro del país, que es de menor extensión.

Respecto al número de días con heladas (**Figura 1.13**), Vidal (2007) utilizó el mapa del Nuevo Atlas Nacional de México donde se asignó una calificación a cada municipio según la isolínea que cubre a éste; sin embargo, hay ocasiones donde más de una isolínea toca a un lugar, en este caso se utilizó la de mayor número de días con heladas, es decir, se calificó con la más desfavorable, los intervalos obtenidos se muestran en el **Cuadro 1.12**.

Cuadro 1.12. Intervalos del número de días con heladas

Días
> 120
61-120
1 – 60
cero

Después se asigna un valor a cada uno de éstos, el cálculo del índice de días con heladas es a partir de cada valor que se divide entre el dato más alto, y después se multiplica por 0.5. De esta forma se obtienen las siguientes categorías (**Cuadro 1.13**).

Cuadro 1.13. Distribución por municipio según el índice de heladas

Número de días con heladas	Valor	Índice	Categoría	Municipios
> 120	3	0.5	Alta	223
61-120	2	0.375	Media	465
1 – 60	1	0.25	Baja	1051
cero	0	0.125	Muy baja o nula	717
Total	2456			

Similar al índice de días con heladas, el grado de peligro por bajas temperaturas (**Figura 1.14**) muestra que las regiones con mayor grado de peligro son las comprendidas entre los estados de Sonora y Chihuahua, además de las colindancias del estado de Durango con Sinaloa. También se observa, que en este caso, el estado de Coahuila presenta un grado medio de peligro, así como el estado de Baja California (Vidal, 2007).

En la determinación del riesgo de heladas se calcula la probabilidad de que la temperatura caiga por debajo de una temperatura crítica para los cultivos y de esta forma se determina la certeza de que ocurra una helada al menos una vez en un número determinado de años. También es posible conocer los daños que puede causar dicho evento y las pérdidas económicas que esto podría ocasionar. Además, se pueden evaluar los costos de protección contra heladas, su eficacia y la aplicabilidad de uno u otro método de protección.

La probabilidad indica las posibilidades de experimentar temperaturas que dañen el cultivo en un año determinado, mientras que el riesgo describe la probabilidad de que ocurra una helada en un periodo dado.

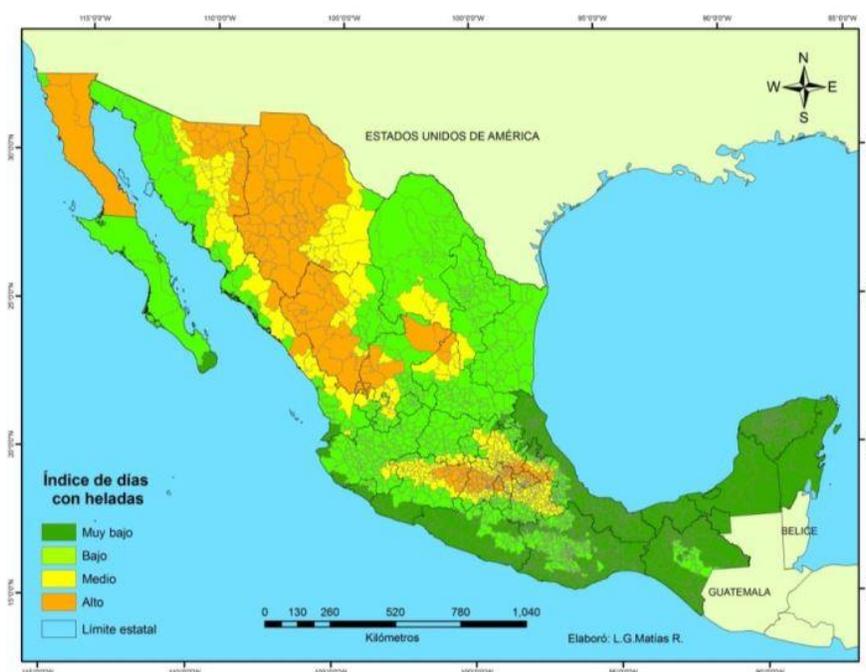


Figura 1.13. Índice de días con heladas en la República Mexicana.  
Fuente: Jiménez-Espinosa et al., 2012.



Figura 1.14. Grado de peligro por bajas temperaturas.

Fuente: Jiménez-Espinosa et al., 2012.

El análisis de la probabilidad de heladas es útil en la toma de decisiones sobre la protección contra heladas, la cual dependerá del cultivo. Haan (1979) elaboró una metodología en la que se determinan la probabilidad y el riesgo de heladas durante el invierno.

Al conocer la probabilidad de alcanzar una temperatura crítica de daño en una fecha determinada es útil para determinar fechas de siembra y cosecha de cultivos anuales, así como la duración de la estación de crecimiento.

El riesgo se determina con el método de (Haan, 1979) que utiliza una distribución binomial (i.e. un proceso de Bernoulli). En una distribución binomial, el riesgo ( $R$ ) de tener una o más ocurrencias de temperatura por debajo de la temperatura mínima seleccionada en un período de  $n$  años se calcula como:

$$R = 1 - \binom{n}{0} P^0 (1 - P)^n \quad (14)$$

donde  $\binom{n}{0} = 1$  es la combinación de  $n$  elementos 0 cada vez que  $P^0 = 1$

Simplificando esta ecuación obtenemos:

$$R = 1 - (1 - P)^n \quad (15)$$

donde  $P = P(T < T_c)$

Hay muchos tipos de funciones de densidad de probabilidad, pero Haan (1979) obtuvo buenos resultados para datos de temperaturas mínimas utilizando una función de densidad de probabilidad de valor extremo tipo I. La curva acumulada para una función de densidad de probabilidad de valor extremo tipo I es:

$$P(T < T_c) = 1 - \exp \left[ -\exp \left( \frac{T_c - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad (16)$$

Las probabilidades se calculan utilizando una función de valor extremo tipo I y el riesgo se calcula utilizando un proceso de Bernoulli.

La protección contra heladas puede efectuarse con la plantación de cultivos que no sean sensibles a la congelación, además de la plantación de cultivos en lugares donde no se presenten heladas, o la producción en temporadas libres de heladas. Sin embargo, en casi todas las zonas del mundo es posible que lleguen a ocurrir heladas.

Dependiendo de la época del año, la probabilidad y el riesgo de heladas varían, además la sensibilidad al daño por heladas también cambia dependiendo del cultivo. El conocer la probabilidad y el riesgo de heladas ayuda a tomar decisiones sobre qué y cuándo cultivar.

#### 1.5.5.2. Riesgo de máxima temperatura

Durante el desarrollo fenológico de un cultivo, la temperatura ejerce un papel determinante. Cada especie tiene un rango óptimo de crecimiento, por lo que en un invernadero se tiene la finalidad de mantener dicho rango mediante el control del clima, pero sin incurrir en altos costos (Ojeda-Bustamante, 2004).

Cuando la temperatura se encuentra fuera del rango óptimo, se obtienen respuestas negativas de los cultivos ya que comienza a afectarse el desarrollo anatómico y morfológico, así como los procesos de asimilación y transporte, lo que conlleva a reducciones en el rendimiento (López et al., 2000).

#### METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ONDAS DE CALOR

Una forma de identificar las ondas de calor es mediante la metodología empleada por Herrera-Alanís (2012), la cual comprende los siguientes pasos:

1. Buscar una estación climatológica en o cerca de la zona de estudio, que permita la obtención de temperaturas máximas y mínimas diarias, con un número conveniente de años, más de 30, y que no tenga periodos sin información o huecos; de preferencia se debe revisar la calidad de los mismos, evitando los casos en que los datos sean dudosos. Una fuente de información es la base de datos ERIC III (IMTA, 2013), el cual contiene datos hasta 2009 de estaciones del país. Para poder aprovechar esta base de datos se creó el programa *Extractor del Eric\_3*, el cual permitió conformar la información de la temperatura máxima o mínima e, incluso,

de la precipitación, en series de tiempo. Por supuesto, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) también es fuente de información de estaciones climatológicas a lo largo y ancho del país.

2. En una hoja de cálculo se depura la información extraída, quitando los registros donde no hay una o ambas temperaturas, ya que el evento OC implica la conjunción de ambas variables.
3. Una vez que se dé el visto bueno a una estación, de las series de tiempo de temperatura máxima y mínima se estima, para ambas temperaturas, el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación, la asimetría, la curtosis y los percentiles 95 y 99.
4. Para identificar a las OC se usa el percentil 95, por lo que se marcan los días con temperaturas iguales o superiores a este valor; si la temperatura máxima y la mínima superan o igualan a sus percentiles 95 por dos o más días seguidos, entonces se contabiliza una onda de calor.
5. Una vez identificada una OC, se calculan sus parámetros, los cuales se enlistan a continuación:
  - a) Fecha de inicio (FI). La fecha en que inicia la OC y que se da en forma continua, empezando la numeración el 1 de enero hasta el 31 de diciembre del mismo año.
  - b) Fecha de término (FT). La fecha en que termina la OC, esta se da en forma continua empezando el 1 de enero y terminando el 31 de diciembre del mismo año.
  - c) Duración (D). El tiempo que dura la OC.
  - d) Intensidad (I). Se define como la suma de las temperaturas divididas entre la duración de la OC. Con esta definición se tienen dos intensidades, las de la serie de temperatura máxima (I<sub>max</sub>) y la serie de la temperatura mínima (I<sub>min</sub>).
  - e) Índice de Intensidad (IEI). Es la suma de la temperatura modulada entre la duración de la OC. Se presentan dos índices, uno en la serie de temperatura máxima y otro para la serie de temperatura mínima.
  - f) Temperatura de alivio (TA). Se define como la diferencia entre la temperatura máxima y temperatura mínima.
  - g) Índice de la temperatura de alivio (IETA). Es la obtenida de la serie modulada de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima.
  - h) Temperatura Máxima (TM). Es la temperatura máxima que se registra en la OC. Al igual que la intensidad, se tiene una temperatura máxima *maximorum* en la serie de temperatura máxima (TM<sub>max</sub>) y otra en la serie de temperatura mínima (TM<sub>min</sub>).
  - i) Índice de la temperatura máxima (IETM). Es la temperatura máxima modulada.
  - j) Severidad de la OC (S). Se determina como el producto del promedio entre la intensidad máxima y mínima y la duración de la OC entre la temperatura de alivio promedio

$$S = D \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \frac{1}{T_{APROM}} \quad (17)$$

k) Índice de Severidad de la OC. Se determina como el producto del promedio de la intensidad índice máxima y mínima y la duración de la OC dividida entre el índice de la temperatura de alivio promedio.

$$IS = D \frac{IEI_{max} + IEI_{min}}{2} \frac{1}{IETAPROM} \quad (18)$$

Después de analizarse todo el periodo de la estación, se analizan los parámetros anuales:

- a) Número de eventos por año (NEA). El número de veces que aparece una OC en un año.
- b) Duración anual (DA). Es la suma total de las duraciones de las OC que aparecen en un año.
- c) Duración promedio (DP). Es el cociente entre la duración total anual y el número de eventos por año.
- d) Duración máxima anual (DMA). Es la máxima duración de la OC registrada en un año.
- e) Intensidad promedio (IP). Es el promedio de las intensidades de las OC que aparecen en un año. Se presentan dos, una en la serie de temperaturas máximas y la otra en la serie de temperaturas mínimas.
- f) Índice de la Intensidad promedio (IEIP). Es el promedio de los índices de las intensidades de las OC que aparecen en un año.
- g) Intensidad máxima (IM). Es la intensidad máxima registrada en un año. Se presentan dos, una en la serie de temperaturas máximas y la otra en la serie de temperaturas mínimas.<sup>8</sup>
- h) Índice de la intensidad máxima ((IEIM). Es el índice máximo de las intensidades máximas registradas en un año.
- i) Temperatura de alivio promedio (TAP). Es el promedio de las temperaturas de alivio promedio.
- j) Índice de temperatura de alivio promedio (IETAP). Es el promedio de los índices de las temperaturas de alivio registradas en un año.
- k) Temperatura de alivio mínima (TAM). Es la temperatura de alivio mínima registrada en un año.
- l) Índice de la temperatura de alivio mínima (IETAM). Es el índice mínimo de temperatura mínima de alivio que se registró en un año.
- m) Severidad total (ST). Es la suma de las severidades que se presentan en un año.
- n) Índice severidad total (IST). Es la suma de los índices de severidad que se presentan en un año.
- o) Severidad promedio (SP). Es la severidad total anual entre el número de eventos al año.
- p) Índice de severidad promedio (ISP). Es el índice de severidad total anual entre el número de eventos al año.
- q) Severidad máxima (SM). Es la severidad máxima registrada en un año.

- r) Índice de severidad máxima (ISM). Es el índice de severidad máxima registrada en un año.
- s) Temperatura máxima promedio (TMP). Es el promedio de las temperaturas máximas, se obtienen dos, una en la serie de temperaturas máximas y otra en la serie de temperaturas mínimas.
- t) Índice de temperatura máxima promedio (IETMP). Es el promedio del índice modulado de temperatura máxima que se presenta en el año.
- u) Temperatura máxima registrada (TMR). Es la temperatura máxima registrada en un año. Se obtienen dos, una en la serie de temperaturas máximas y otra en la serie de temperaturas mínimas.
- v) Índice de temperatura máxima registrada (IETMR). Es el índice estándar de la temperatura máxima registrada en el año.
- w) Día de inicio de la temporada de la OC. Es el día en que aparece la primera OC en un año.
- x) Día de término de la temporada de la OC. Es el último día de la última OC que aparece en un año.

Se grafica la serie de tiempo de las severidades totales.

7. También se pueden determinar los siguientes parámetros para un cierto periodo de estudio:

- a) Mes más probable (MMP). Es el mes que más veces presenta el evento de la OC en un periodo determinado.
- b) Promedio total de los eventos de la ola de calor (PT). Es la suma de OC que se presentan en un periodo entre el número de años en los que se presenta la OC.
- c) Duración de la OC más probable (DMP). Es la duración de la OC que más veces se presenta en un periodo determinado.
- d) Probabilidad anual de ocurrencia (P). Es la suma de años en los que se presenta la OC entre el total de años del periodo considerado.
- e) Fecha de inicio de la OC con una probabilidad  $G(x)=0.95$  (FI95). Es la fecha que tiene una probabilidad del 95% de presentarse en ese día o después. Esta fecha se determina a través de una Función de Distribución de Probabilidad Mixta.
- f) Fecha de término de la OC con una probabilidad  $G(x)=0.95$  (FT95). Es la fecha que tiene una probabilidad del 95% de terminarse en ese día o antes. Esta fecha se determina a través de una Función de Distribución de Probabilidad Mixta.
- g) Duración de la temporada de la OC con una  $G(x)=0.95$  (NIT95). Es la diferencia entre la fecha de inicio con una probabilidad del 95% menos la fecha de término con una probabilidad del 95%.
- h) Total de eventos (TE). Es el número total de eventos presentados en un determinado periodo.

Considerando lo anterior, el CENAPRED elaboró un mapa de peligro por ondas de calor, que se muestra en la **Figura 1.15**.

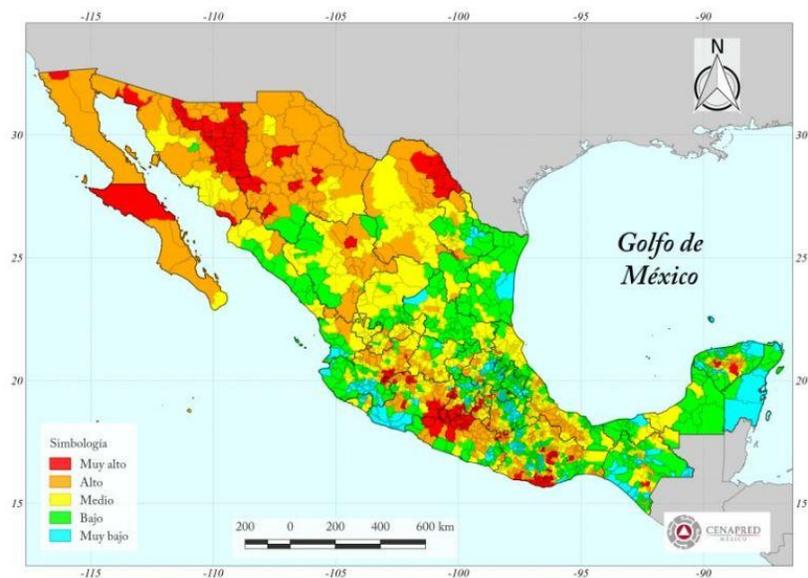


Figura 1.15. Índice de peligro por ondas de calor a escala municipal.  
Fuente: Jiménez-Espinosa, Monroy Cruz, and Cordero-Devesa (2017).

En la **Figura 1.15** se observa que el norte de la República Mexicana presenta los índices más altos de peligro por ondas de calor, así como la región comprendida entre el Estado de México, Guerrero y Michoacán. En la península de Yucatán se tienen los valores más bajos de índice de peligro por ondas de calor, aunque también se presenta una zona con valores altos en el centro de Yucatán.

En la zona que comprende los estados de Sonora y Chihuahua, se observa que el índice de peligro por ondas de calor es muy alto y, además, también es alto el riesgo de heladas. Así mismo, la región sureste de la república presenta los índices de peligro por ondas de calor más bajos y también el riesgo de heladas más bajo.

#### 1.5.6. Indicadores agronómicos

##### 1.5.6.1. *Evaporación máxima*

Una gran parte del agua que llega a la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor, ya sea directamente por evaporación, o a través de las plantas, por transpiración. La cantidad de agua que así se escapa al posible uso por el hombre, dada la dificultad de medir por separado ambos términos, se reúne frecuentemente bajo el nombre de evapotranspiración (Segerer & Villodas, 2006) .

La evaporación es el resultado del proceso físico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. Este proceso se distingue de la ebullición, principalmente por dos razones:

- a) La evaporación se puede producir a cualquier temperatura, mientras que la ebullición se produce únicamente a una temperatura determinada, que es función de la presión atmosférica (100°C a nivel del mar).
- b) En la ebullición, el agua pasa del estado líquido al estado de vapor en forma tumultuosa; en la evaporación, por el contrario, el pasaje se efectúa en forma tranquila.

La evaporación de la humedad de un suelo sin vegetación se produce en la capa superficial. Al disminuir la humedad de ésta, se genera un desequilibrio y hay una atracción de la humedad subyacente, que asciende por capilaridad a la superficie, prosiguiendo la evaporación hasta que esta agua capilar se agota. Así pues, la evaporación desde la superficie de un suelo queda limitada por la disponibilidad de agua o la posibilidad de evaporación. El agua higroscópica en equilibrio con la humedad atmosférica no se evapora.

La evaporación es una magnitud difícil de medir, debido principalmente a que experimenta considerables variaciones de carácter local y no puede encontrarse un proceso suficientemente representativo de las condiciones medias de un lugar determinado. La evaporación es distinta en un terreno seco que, en otro con charcos, en un río que en un bosque, etc.; influyendo también notoriamente las condiciones meteorológicas del aire.

Los instrumentos para medir la evaporación desde superficies de agua libre se denominan en forma genérica atmómetros o evaporímetros (también evaporómetros, en algunos textos), y se clasifican en cuatro tipos, de los cuales sólo el primero resulta de interés en ingeniería hidrológica:

- a) Tanques de evaporación
- b) Evaporímetros de balanza
- c) Porcelanas porosas
- d) Superficies de papel húmedo

Existen varios métodos teóricos para estimar la evaporación, con el objeto de efectuar la determinación de la evaporación que se produce a partir de grandes superficies de agua libre, como así también para contrastar con la realidad las medidas obtenidas con algunos de los instrumentos citados anteriormente, se han desarrollado una variedad de técnicas de cálculo que permiten deducir o estimar el transporte de vapor desde las referidas superficies. Tales técnicas profundizan en las características que presenta el fenómeno, y a

partir de ellas tratan de establecer los valores que alcanza la evaporación en intervalos de tiempo preestablecidos (Segerer & Villodas, 2006).

#### Balance Hídrico

El enfoque más obvio del problema resulta el de establecer la igualdad entre las entradas y salidas de agua en el ámbito bajo estudio, mediante la formulación matemática del balance hídrico del mismo. Si se supone que el almacenamiento  $S$ , el caudal de entrada  $I$ , el caudal de salida  $E$ , la infiltración subsuperficial “ $i$ ” y la precipitación  $P$  pueden medirse, la evaporación se calcula como:

$$Ev = (S_1 - S_2) + I + P - E - i \quad (19)$$

Este enfoque es simple en teoría, pero su aplicación muchas veces produce resultados poco confiables debido a que los errores al medir los caudales y el cambio de almacenamiento se reflejan directamente en el cálculo de la evaporación (Segerer & Villodas, 2006).

#### Balance Energético

De acuerdo con Segerer & Villodas (2006) con, la cantidad de agua que puede evaporarse depende de la energía disponible para efectuar el cambio de estado. La evaporación  $Ev$  (en cm), en un determinado intervalo de tiempo, será:

$$Ev = \frac{R_i - R_r - C_a - C}{C_1 * (1 + \beta)} \quad (20)$$

$R$  radiación global incidente sobre una superficie horizontal

$R_r$  radiación reflejada y devuelta al espacio

$C_a$  calor almacenado en el agua, considerando toda la profundidad del embalse

$C$  pérdidas de calor hacia el terreno- circundante o por otras causas, al igual que las tres anteriores en cal/cm<sup>2</sup>

$C_1$  calor latente de vaporización del agua a la temperatura ordinaria, en cal/cm<sup>3</sup> (su valor es del orden de 585 cal/cm<sup>3</sup> para un agua de densidad 1, a 15°C de temperatura)  $\beta$  relación de Bowen, que se expresa por:

$$\beta = \frac{0.6 * (t_s - t) * P_a}{1000 * (e_s - e)} \quad (21)$$

$t_s; t$  temperatura del agua y del aire, respectivamente, en °C

es; e tensiones de vapor saturante para la temperatura  $t$  y del aire, respectivamente, en mmHg

$P$  a presión atmosférica, en mmHg

Calculo de la evapotranspiración de referencia

Entre los métodos más utilizados destaca el Método de Blanney-Criddle, cuya fórmula es ampliamente aplicable en zonas áridas (FAO, 1990).

$$ET_0 = p * (0.46T + 8.13) \quad (22)$$

De manera generalizada, la ET de referencia (mm día-1) se calcula mediante la ecuación de PenmanMonteith adaptada a una pradera de gramíneas (Doorenbos y Pruitt, 1977):

$$ET_0 = \frac{\Delta Rn + 0.499 DPV U}{2.45 [\Delta + 0.06734 (1 + 0.332 U)]} \quad (23)$$

Donde:

$ET_0$  es la evapotranspiración de referencia del cultivo, en mm día-1,  $Rn$  es la radiación neta en MJ m-2,  $DPV$  es el déficit de presión de vapor en el aire en kPa,  $U$  es la velocidad del viento a 2 m de altura en m s-1 y ... la pendiente correspondiente a la tasa de incremento observada.

La ET en ausencia de déficit hídrico se estima comúnmente como el producto de la evapotranspiración de referencia por la constante  $Kc$  del cultivo (FAO, 1990):  
 $ET = Kc * ET_0$

Donde:

$Kc$  es el denominado coeficiente de cultivo que depende de factores relacionados con el cultivo (área foliar, rugosidad y otros) y  $ET_0$  es la ET de referencia, la cual es función de variables climáticas (radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento).

## 1.6. Distribución de la superficie Agricultura Protegida en México

La agricultura en México y en el mundo presenta diversos retos que se deben cumplir uno es proporcionar alimento a una creciente y demandante población, dos aumentar las fuentes de empleo para combatir la pobreza del sector rural, tres ser agradable con el ambiente.

Aunque son varias las técnicas y estructuras que integran la agricultura protegida, es el desarrollo de los invernaderos el que ha marcado la pauta de la agricultura protegida mexicana, sirviendo de hilo conductor para el estudio de este sector. Los datos indican que la superficie cubierta pasó de unas 100 hectáreas de invernaderos en 1970 a más de 25,000 hectáreas en la actualidad (**Cuadro 1.14** y **Figura 1.16**).

Cuadro 1.14. Desarrollo la agricultura protegida en México (Diversas fuentes)

Año	Superficie (Ha)	Fuente
1970	100.00	SAGARPA, 2010
1980	300.00	AMHPAC, 2008; citado por SAGARPA, 2009
1999	721.00	
2005	3,214.00	
2008	9,948.00	
2009	15,000.00	AMHPAC, 2009
2011	11,759.00	SIAP, 2012
2012	20,000.00	SAGARPA, 2012
2013	22,508.53	SAGARPA, citado por AMHPAC, 2013
2014	23,251.00	SIAP, 2014
2015	23,482.92	SIAP/SAGARPA, 2015
2016	25,000.00	SIAP/SAGARPA, 2016

La Agricultura protegida se refiere a Invernaderos, casas sombras y túneles altos.

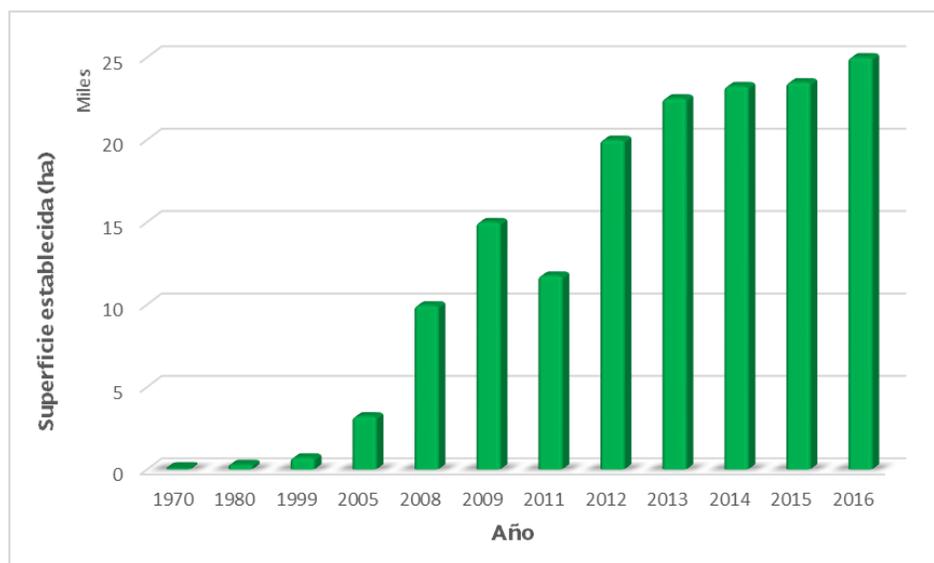


Figura 1.16 Evolución de la Agricultura Protegida en México (Siap-Sagarpa, 2017).

#### 1.6.1. Características de la AP Año 2008

De acuerdo a datos la SAGARPA, en el 2008 la mayoría de la superficie de Agricultura Protegida utiliza casas o malla sombra. SAGARPA (2009) señala que el 51% de la superficie de horticultura protegida eran de casa sombra, el 39.3% de invernaderos y 9.7% de otros sistemas de agricultura protegida (acolchados, microtúneles, etc.) (Figura 1.17).

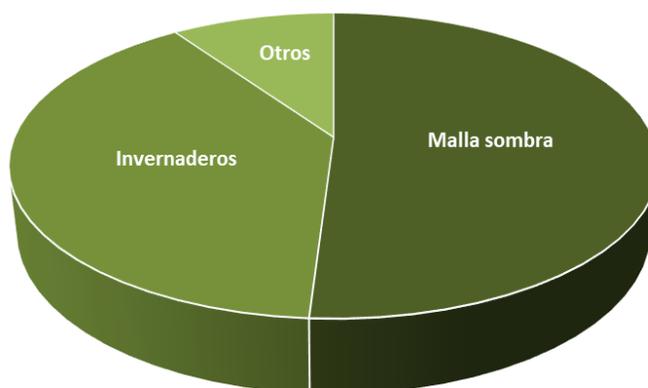


Figura 1.17. Superficie cultivada por tipo de agricultura protegida en el 2008 (SAGARPA, 2009)

De acuerdo con la misma fuente, en el 2008, el 37.9% de la superficie de agricultura protegida se cultiva el jitomate, seguida por el pimiento morrón (*Capsicum annum*) con 16%; pepino (*Cucumis sativus* L.), con 10.8%; ornamentales, con el 1.8%; melón (*Cucumis melo* L.), con 1.0%; y otros, con 32.5% (**Cuadro 1.15** y **Figura 1.18**).

Cuadro 1.15. Principales cultivos en horticultura protegida (SAGARPA, 2009)

Cultivo	Porcentaje
Jitomate	37.9 %
Pimiento Morrón	16.0 %
Pepino	10.7 %
Ornamentales	1.8 %
Melón	1.0 %
Otros (Cítricos, Papaya y Forrajes)	32.6 0%

A pesar de los esfuerzos por diversificar los cultivos, el abanico en México es aún reducido, con lo cual se expone a riesgos de fracaso en el momento en que las variaciones del mercado lo impongan o un evento afecte a una especie. La **Figura 1.18** muestra los porcentajes de los cultivos que predominan la superficie en agricultura protegida, siendo el invernadero el que lleva mejor posicionamiento.

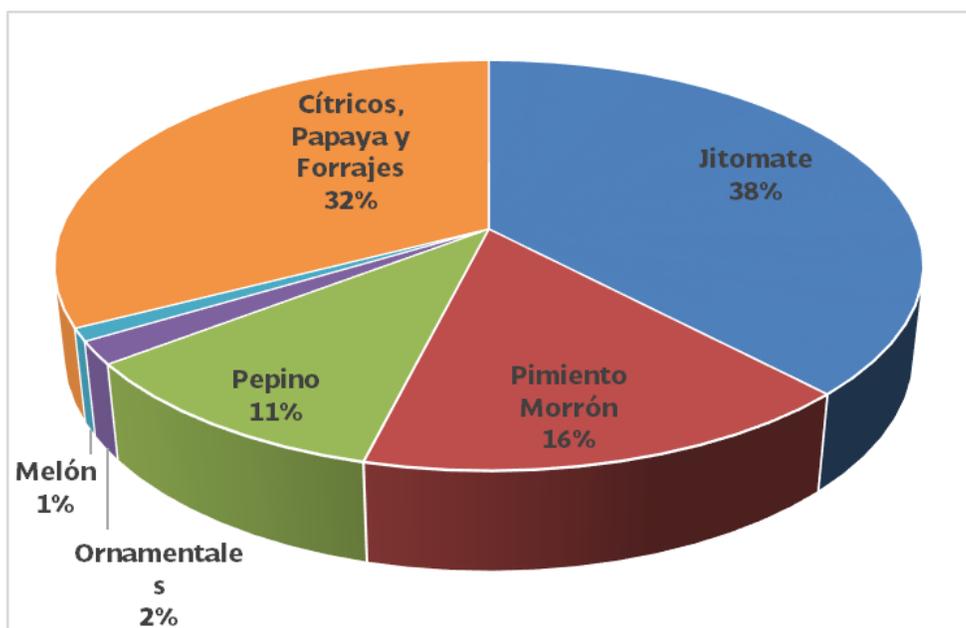


Figura 1.18. Distribución de cultivos en agricultura protegida del año 2008.

Si se atiende solo lo que dominan estos seis estados, la superficie ocupada por ellos, representa 79.3% del total nacional, de acuerdo con la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (2008). El resto de la superficie cultivada (20.7%) se encuentra pulverizado entre los otros 25 estados y el Distrito Federal. Por lo tanto en cuanto a la superficie por estado, destacan:

- Sinaloa, con 2,980 ha;
- Baja California, con 2,300 ha;
- Jalisco, con 970 ha;
- Sonora, con 890 ha;
- Coahuila, con 380 ha; y
- Chihuahua, con 375 ha.

En México, la horticultura protegida se ha desarrollado en condiciones muy heterogéneas, tanto en niveles tecnológicos, como en la superficie de las unidades de producción. De acuerdo a Ponce (2011) con datos de SAGARPA, el 86% de la unidades de producción son de menos de 0.5 has, el 11.5% de 0.51 a 5.0 has y el 2.5% de más de 5.0 has. Lo anterior indica que la mayoría de los productores tienen unidades de producción muy pequeñas, lo que limita su acceso a tecnología, capacitación y asistencia técnica, así como un mayor acceso a mercados más exigentes (**Cuadro 1.16**).

Cuadro 1.16. Superficie de horticultura protegida en las unidades de producción en México (Ponce, 2011)

Edad de producción	Porcentaje (%)
Menos de 0.5 ha	86.0
0.5-5.0 ha	11.5
Más de 5.0 ha	2.5

De acuerdo con Rikj (2008), el nivel tecnológico con el que trabajan los sistemas de producción en ambientes protegidos se divide en tres grandes grupos:

- a) Tecnología baja: son dependientes totalmente del ambiente, utilización de tecnologías simples y siembra a cielo abierto.
- b) Tecnología media: utilizan invernaderos simples o semiclimatizados, casas-sombra, riegos programados y cultivo en suelo o hidroponía.
- c) Tecnología alta: con invernaderos con clima automatizado, con mayor independencia del clima exterior, riegos computarizados, inyección de CO<sub>2</sub> y cultivo en suelo o hidroponía.

En México, en el 2008 por superficie cultivada, la agricultura protegida es

- 79% se encuentran en el nivel tecnológico alto,
- 17% con tecnología media y
- 5% con tecnología baja (SAGARPA, 2008).

Una situación que contrasta de las unidades de producción, son precisamente las superficies predominantes; si bien es cierto la parte que le da un verdadero incremento a la superficie son los grandes consorcios, capitales extranjeros con sistemas High tech, que pueden tener 100 o mas ha de producción, lo es también el hecho de que el grueso de la población que se impulsa en México, son instalaciones promedio de entre 1000 y 5000 m<sup>2</sup>, pulverizados en todo el territorio nacional.

La representatividad no está acotada entre estos dos situaciones y ninguna por si sola reflejan la realidad de las unidades de producción y el impacto en los pequeños productores, ya que son pocos los agricultores que tienen grandes superficies y son muchos los pequeños agricultores, como lo reflejan los datos de las unidades de producción que tienen menos de 0.5 has de horticultura protegida.

El rendimiento en el nivel tecnológico bajo fue de aproximadamente 120 t/ha en el tomate o jitomate, en el de tecnología media oscila entre 200 y 250 t/ha, y en el de tecnología alta se llega a obtener hasta 600 t/ha (SAGARPA, 2008).

1.6.2. Características de la AP en 2012

Para el 2012 en el país existían 19,985 mil hectáreas bajo agricultura protegida de las cuales y de acuerdo con los últimos datos oficiales sobre la superficie con estructuras de la agricultura protegida bajo cubiertas, el 66% de ellas correspondían a invernaderos, un 11% eran macro túneles o túneles altos, otros 10% consistían de casas sombra, otro 5% para micro túneles o túneles bajos, además de un 5% de techos sombra y el restante 3% para pabellones (**Cuadro 1.17** y **Figura 1.19**)

Cuadro 1.17. Superficies de AP por tipo de estructura año 2012 (SIAP, 2013)

Estructura	Nombre de Estructura	Superficie (has)
	Invernadero	13,200
	Macro túnel	2,200

Estructura	Nombre de Estructura	Superficie (has)
	Casa sombra	2,000
	Micro Túnel	1,000
	Malla sombra	1,000
	Pabellones	600

Estructura	Nombre de Estructura	Superficie (has)
Total		

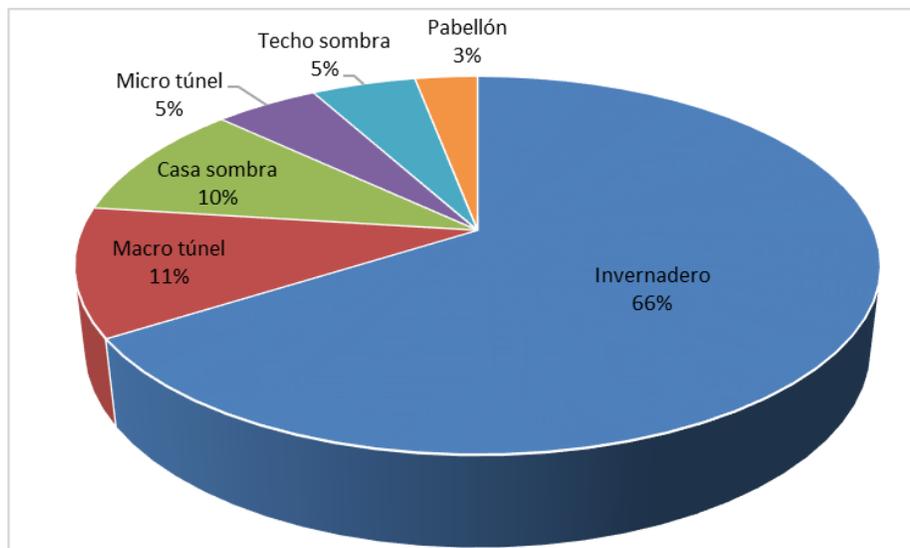


Figura 1.19. Porcentaje de estructuras de la agricultura bajo cubierta en el año 2012 (SIAP, 2013)

Oficialmente, la SAGARPA (2012), reportaba que el 50% de la superficie con agricultura protegida se concentraba en cuatro estados: Sinaloa, 22%; Baja California, 14%; Baja California Sur, 12% y Jalisco, 10%.

De acuerdo a la SIAP (2013) los principales cultivos en la AP son el jitomate, el pepino y el pimiento. En el **Cuadro 1.18** se presenta un comparativo con respecto a la agricultura a campo abierto.

Cuadro 1.18. Rendimiento de los cultivos en invernadero

Cultivo	Campo abierto	Invernaderos	Incremento
	Rendimiento (ton ha <sup>-1</sup> )		%
Jitomate	43.7	132.5	203
Pepino	30.5	98	221
Pimiento	51.9	78	50

### 1.6.3. Características de la AP en 2013

La AMHPAC (2014), realizó un estudio que consideraba 22,508.17 hectáreas de la agricultura bajo cubierta, en el 2013. En el mismo se reportaban que el 42 % se ubicaba en el Noroeste de México, en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora. Mientras al Occidente le corresponde el 22 %, en los estados de Colima, Jalisco, Michoacán y Nayarit. En el Norte de México se concentraba el 16 %, en los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí y Zacatecas. Por su parte la región centro contaba con el 15 %. Mientras en el sur y sureste existía el 5% de la superficie de agricultura protegida.

### 1.6.4. Características de la AP en 2014

Con los datos disponibles al 2014, en el panorama internacional, México ocupaba el séptimo lugar en cuanto a Agricultura protegida (**Cuadro 1.19**).

Cuadro 1.19. México y los países con mayor superficie de agricultura protegida.

Lugar	País	Superficie (Ha)	Fuente
1	China	3,300,000.00	ESA, 2013
2	Corea del sur	89,541.00	Ministry of Agriculture, 2012
3	Japón	87,886.00	MAFF, 2012
4	Turquía	61,776.00	Turkish Statistical Institute, 2012
5	España	45,200.00	EuroStat, 2013
6	Italia	38,910.00	EuroStat, 2013
7	México	25,000.00	SIAP/SAGARPA, 2016
8	Francia	11,190.00	EuroStat, 2013
8	Holanda	9,330.00	EuroStat, 2013
10	Estados Unidos	8,425.00	US Census Hort Spec 2010

La SAGARPA reporta que en 2014 había alrededor de 23,000 has de agricultura protegida, distribuida en 40,000 instalaciones. Dichas instalaciones se dividieron en 8 categorías, de las más importantes son los invernaderos, casa sombra y Macro túneles que representan el 87% del total (**Cuadro 1.20**).

Cuadro 1.20. Tipo de instalaciones en Agricultura Protegida en México, año 2014.

Tipo de instalación	Número de Unidades	Porcentaje	Superficie	Porcentaje
		(%)	(ha)	(%)
Invernaderos	25,055	62.67	11,100.25	47.27
Casa sombra	5,032	12.59	6,366.66	27.11

Tipo de instalación	Número de Unidades	Porcentaje	Superficie	Porcentaje
		(%)	(ha)	(%)
Macro túneles	5,001	12.51	3,705.61	15.78
Malla sombra	1,362	3.41	1,550.33	6.60
Micro	2,693	6.74	575.95	2.45
Túneles	605	1.51	133.34	0.57
Pabellón	229	0.57	50.77	0.22
Total	39,977	100.00	23,482.91	100.00

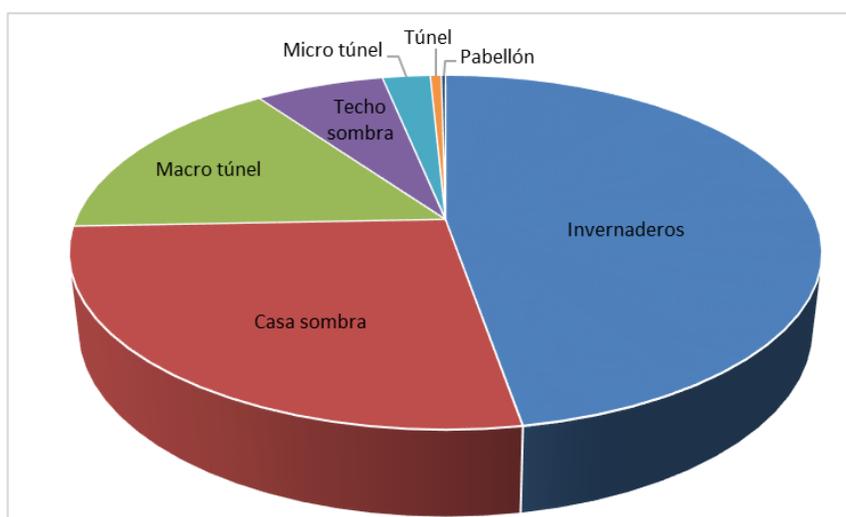


Figura 1.20. Porcentaje de estructuras de la agricultura bajo cubierta en el año 2014 (SIAP, 2015)

El aumento de la superficie plantada desde el 2012 fue de 17%. Incrementándose considerablemente la superficie de Casa sombra en contraste con las de invernadero, pabellón y micro túnel que disminuyeron (**Figura 1.20**).

De los principales estados el cultivo más importante es el Jitomate, seguido por la Manzana, Frambuesa y el Pepino (**Cuadro 1.21**).

Cuadro 1.21. Cultivo principal de los 5 estados con mayor superficie de AP (SIAP, 2015)

Estado	Cultivo	Superficie Cosechada (ha)
Chihuahua	Manzana	1,228.07
Jalisco	Frambuesa	1,102.45

Estado	Cultivo	Superficie Cosechada (ha)
Baja California	Tomate Rojo (Jitomate)	1,011.56
Baja California Sur	Tomate Rojo (Jitomate)	877.60
Sinaloa	Tomate Rojo (Jitomate)	726.80
San Luis Potosí	Tomate Rojo (Jitomate)	478.96
Sonora	Pepino	364.06

De acuerdo con la SIAP (2015), el 52.75% de la superficie con agricultura protegida se concentraba en cuatro estados: Jalisco, 18.06%; Baja California, 13.49%; Sinaloa, 10.75 y Baja California Sur, 10.44%.

#### 1.6.5. Características de la AP en 2016

Las últimas estadísticas oficiales reportan que la superficie de agricultura con cubiertas de protección de cultivos es de más de 25 mil hectáreas, sin considerar acolchados y túneles bajos (SIAP, 2017).

Con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017), el estado que más superficie reporta bajo algún tipo de agricultura protegida es Sinaloa con 9 mil hectáreas, siendo su cultivo principal el tomate rojo saladette bajo malla sombra. Le sigue Jalisco con 7 mil 713 hectáreas, de las cuales 4 mil 448 son de frambuesa con estructura de macro túnel. Campeche y Tabasco no reportaron cultivos bajo agricultura protegida 2016.

Por tipo y/o variedad de cultivo, el más importante por superficie sembrada es la frambuesa y fresa con estructura de macro túnel 12.5% y 11.5%, respectivamente, seguidos por el tomate rojo saladette, produciéndose bajo invernadero 11.2%. Éstos últimos dos, son también los que más aportan al valor de la producción: 12.3% y 17.5% respectivamente (SIAP, 2017).

### 1.6.6. Visitas técnicas de campo

Se realizaron varias visitas de campo a los tres estados con los fines de recolección de datos y verificación de la existencia de invernaderos reportados por el SIAP, así como para obtener las características principales y el estado de los mismos.

#### Tamaños promedio del invernadero

De los recorridos de campo realizados en el periodo del contrato, se encontró que la mayoría de los invernaderos son de plástico en todos los estados menos Sinaloa, que tiene una mayor superficie de malla sombra (**Cuadro 1.22**).

Cuadro 1.22. Representatividad en las estructuras visitadas.

Estado	Tipo	Tamaño promedio (m <sup>2</sup> )	Cubierta	Techo	Control ambiental
Estado de México	Cenital	1000-2500	Plástico	Capilla	No
Jalisco	Túnel	2500-5000	Plástico	Capilla	No
Michoacán	Túnel	2000-4000	Plástico/malla	Capilla	No
San Luis Potosí	Cenital	5000-10000	Plástico	Baticenital	Parcial
Sinaloa	Malla sombra	10 000	malla	Capilla	No

Se visitaron 218.19 hectáreas de agricultura protegida en el recorrido, de las cuáles la mayor superficie fue en San Luis Potosí (**Cuadro 1.23**).

Cuadro 1.23. Superficie visitada por estado.

Estado	Superficie (ha)
Estado de México	90.00
Jalisco	10.00
Michoacán de Ocampo	37.11
San Luis Potosí	71.09
Sinaloa	10.00
<b>Total</b>	<b>218.19</b>

## Tipos de invernaderos

Los tipos de invernaderos fueron: invernadero con 118.38 hectáreas seguido por casa sombra con 58 hectáreas, otros tipos fueron Macro túnel y vivero (**Cuadro 1.24**).

Cuadro 1.24. Tipo de invernaderos.

Tipos de invernadero	Superficie (ha)
Invernadero	118.38
Casa sombra	58.00
Macrotúnel	40.95
Vivero	0.86
<b>Total general</b>	<b>1.19</b>

### 1.6.7. Características de la AP por estado

#### Características del estado de Jalisco

De acuerdo con el gobierno del estado de Jalisco, este ocupa el quinto lugar en producción de Chile a nivel nacional, participando con cerca de las 100 mil toneladas anuales, que representan 4.3 por ciento del total de la producción nacional, con un valor de cerca de los 800 millones de pesos que participan con el 5.3 por ciento del nacional.

La superficie de cultivo de esta hortaliza en la entidad es de poco más de las 4300 hectáreas, con rendimientos promedios que oscilan entre 85 y 45 toneladas por hectárea; los primeros rendimientos se refieren a plantaciones de chile bajo ambientes controlados o invernaderos y los segundos, a producciones a cielo abierto, con tecnología de punta a través de sistemas de acolchados y fertirrigación (técnica de aplicar fertilizantes en el riego).

#### Descripción de los invernaderos

En el estado de Jalisco se visitaron tres tipos de invernadero: invernadero, macro túnel y casa sombra. Que juntos sumaron una superficie de 10 hectáreas (**Cuadro 1.25**).

Cuadro 1.25. Tipos de invernadero del estado de Jalisco

Estado Tipo invernadero	Superficie (ha)
Jalisco	10.00
Invernadero	7.00
Macro túnel	2.00
Casa sombra	1.00

Se encontraron tres tipos de capillas en el estado de Jalisco la más importante fue la Cenital con 7 ha (**Cuadro 1.26**).

Cuadro 1.26. Tipos de Capillas del estado de Jalisco.

Estado Tipo de Capilla	Superficie (ha)
Jalisco	10.00
Cenital	7.00
Macro túneles	2.00
Malla Sombra	1.00

En el **Cuadro 1.27** se presenta la ubicación de los invernaderos visitados del estado de Jalisco. En total se visitaron 5 invernaderos.

Cuadro 1.27. Ubicación de los invernaderos.

Clave	Entidad Federativa	Municipio	Nombre del Usuario
Jalisco_1	Jalisco	Autlán de Navarro	Agroparque Autlán
Jalisco_2	Jalisco	Jacotepec	Berrymex
Jalisco_3	Jalisco	Autlán de Navarro	Bonanza
Jalisco_4	Jalisco	Autlán de Navarro	Luis Rogelio Mancilla Flores
Jalisco_5	Jalisco	Autlán de Navarro	Nutripaz

En el **Cuadro 1.28** se presentan las características generales de los invernaderos visitados del estado de Jalisco.

En el **Cuadro 1.29** se presentan las características generales de cultivos sembrados en los invernaderos visitados del estado de Jalisco.

Cuadro 1.28. Características generales de los invernaderos.

Clave	Tipo de Invernadero	Tipo de Capilla	No de Capillas-Naves	Superficie Construida (ha)
Jalisco_1	Invernadero	Cenital	15	6
Jalisco_2	Macro túnel	Macrotúneles	26	1
Jalisco_3	Invernadero	Cenital	7.12	1
Jalisco_4	Macro túnel	Macrotúneles	26	1
Jalisco_5	Casa sombra	Malla Sombra	10	1
Clave	Tipo de Cubierta	Sistema de Riego	Sistema de Ventilación	Sistema de Calefacción
Jalisco_1	Polietileno baja densidad	Fertirriego	Natural-Automático	NA
Jalisco_2	Polietileno baja densidad	Fertirriego	Natural	NA
Jalisco_3	Polietileno baja densidad	Fertirriego	Natural-Automático	Combustión
Jalisco_4	Polietileno baja densidad	Fertirriego	Natural	NA
Jalisco_5	Malla	Fertirriego	Natural	NA

Cuadro 1.29. Cultivos sembrados en los invernaderos

Clave	Superficie Sembrada (ha)	No de Capillas Sembradas	Cultivo Establecido	Rendimiento del cultivo (ton/ha)	Tipo de Sustrato
Jalisco_1	6	90	Chile Morrón	140	Suelo
Jalisco_2	21	536	Frambuesa	17	Fibra de coco
Jalisco_3	6.46	46	Tomate Rojo (Jitomate)	500	Fibra de coco
Jalisco_4	2	52	Arándano	8	Suelo
Jalisco_5	4	40	Tomate Rojo (Jitomate)	100	Suelo

Los detalles de cada uno de los invernaderos del estado de Jalisco se pueden consultar en el Anexo A.

## Características del estado de Michoacán

### Descripción de los invernaderos

En el estado de Michoacán se visitaron 3 tipos de invernadero: macro túnel, invernadero y vivero. Que juntos sumaron una superficie de 37.11 hectáreas (**Cuadro 1.30**).

Cuadro 1.30. Tipos de invernadero del estado de Michoacán.

Estado Tipo invernadero	Superficie (ha)
<b>Michoacán de Ocampo</b>	<b>37.11</b>
Macro túnel	35.48
Invernadero	0.90
Vivero	0.73

Se encontraron 3 tipos de capillas en el estado de Michoacán la más importante fueron los macro túneles con 35.48 ha (**Cuadro 1.31**).

Cuadro 1.31. Tipos de Capillas del estado de Michoacán.

Estado Tipo de Capilla	Superficie (ha)
<b>Michoacán de Ocampo</b>	<b>37.11</b>
Asimétrico	0.90
Doble capilla	0.73
Macro túneles	35.48

En el **Cuadro 1.32** se presenta la ubicación de los invernaderos visitados del estado de Michoacán. En total se visitaron 8 invernaderos.

Cuadro 1.32. Ubicación de los invernaderos.

Clave	Entidad Federativa	Municipio	Nombre del Usuario
Mich_1	Michoacán de Ocampo	Indaparapeo	Mariano Rico Díaz
Mich_1	Michoacán de Ocampo	Indaparapeo	Mariano Rico Díaz
Mich_2	Michoacán de Ocampo	Jungapeo	Roberto Aguilar
Mich_3	Michoacán de Ocampo	Morelia	Ulises Coronel Chávez
Mich_4	Michoacán de Ocampo	Zamora	Claudio Rivero
Mich_5	Michoacán de Ocampo	Zamora	Jesús Fernández
Mich_6	Michoacán de Ocampo	Los Reyes	Salvador García
Mich_7	Michoacán de Ocampo	Zitácuaro	Eleuterio Gabriel
Mich_8	Michoacán de Ocampo	Zitácuaro	Antonio Vilchis Tello

En el **Cuadro 1.33** se presentan las características generales de los invernaderos visitados del estado de Michoacán.

En el **Cuadro 1.34** se presentan las características generales de cultivos sembrados en los invernaderos visitados del estado de Michoacán.

Los detalles de cada uno de los invernaderos del estado de Michoacán se pueden consultar en el Anexo B.

Cuadro 1.33. Características generales de los invernaderos.

Clave	Tipo de Invernadero	Tipo de Capilla	No de Capillas	Superficie Construida (ha)
Mich_1	Invernadero	Asimétrico	12	0.448
Mich_1	Invernadero	Asimétrico	12	0.448
Mich_2	Vivero	Doble capilla	15	0.48
Mich_3	Macro túnel	Macro túneles	17	0.48
Mich_4	Macro túnel	Macro túneles	45	20
Mich_5	Macro túnel	Macro túneles	50	10
Mich_6	Macro túnel	Macro túneles	45	5
Mich_7	Vivero	Doble capilla	8	0.04
Mich_8	Vivero	Doble capilla	5	0.21
Clave	Tipo de Cubierta	Sistema de Riego	Sistema de Ventilación	Sistema de Calefacción
Mich_1	Polietileno alta densidad	Goteo	Natural-Automático	Combustión
Mich_1	Polietileno alta densidad	Goteo	Natural-Automático	Combustión
Mich_2	Polietileno alta densidad	Manual	Natural-Manual	Ninguno
Mich_3	Polietileno alta densidad	Goteo	Nebulización	Ninguno
Mich_4	Polietileno baja densidad	Fertirriego	Natural-Manual	NA
Mich_5	Polietileno baja densidad	Manual	Natural-Manual	NA
Mich_6	Polietileno baja densidad	Manual	Natural-Manual	NA
Mich_7	Polietileno alta densidad	Manual	Natural-Manual	Ninguno
Mich_8	Polietileno alta densidad	Manual	Natural-Manual	Ninguno

Cuadro 1.34. Cultivos sembrados en los invernaderos.

Clave	Superficie Sembrada (ha)	No de Capillas Sembradas	Cultivo Establecido	Rendimiento del cultivo (ton/ha)	Tipo de Sustrato
Mich_1	0.318	8	Tomate Rojo (Jitomate)	300	Suelo
Mich_1	0.13	4	Pepino	300	Arena
Mich_2	0.48	15	Noche Buena	200000	Tezontle
Mich_3	0.48	17	Fresa		Composta
Mich_4	20	950	Blueberry	5.5	Fibra de coco
Mich_5	10	500	Blueberry	1.1	Fibra de coco
Mich_6	5	225	Blueberry	1.1	Fibra de coco
Mich_7	0.04	8	Noche Buena	360000	Tezontle
Mich_8	0.04	8	Noche Buena	250000	Tezontle

### Características del Estado de México

Existe una variedad de invernaderos y diversas instituciones que los clasifican de diferentes forma por ejemplo, la Asociación Mexicana de Construcción de Invernaderos (AMCI, 2008), los clasifica como un túnel, multitúnel, unitúnel ventanilla cenital fija, multitúnel ventanilla cenital fija, multitúnel diente de sierra ventanilla fija, multitúnel ventanilla (s) central móvil, unitúnel capilla, multitúnel capilla, modular tipo parral que se señala en la certificación de invernaderos de acuerdo a la norma mexicana nmx-e-255-cncp-2008 (AMCI, 2008).

Para el año 2010 el GRUPOGAM, en concordancia con SAGARPA, CHAPINGO, CP, CECADER y CIESTAAM realizaron un estudio denominado Identificación y sistematización de modelos productivos para la generación de empleos e ingresos en regiones de alta y muy alta marginalidad.

Es importante definir criterios para la selección de los grupos a apoyar (experiencia, liquidez, organización, etc.) así como de los proveedores de invernaderos (solvencia económica y moral). La ubicación del invernadero es un factor determinante y de esta manera se debe considerar la revisión preliminar de los lugares en donde se construirán los nuevos proyectos.

El tamaño de las construcciones es importante para generar economías de escala en los proyectos y hacer más eficiente los recursos, además de incrementar el nivel tecnológico de los invernaderos.

El informe general retrospectivo de la alianza para el campo del periodo 1996-2007, expresa que en el año 2007 se crea un apoyo económico en donde las tres delegaciones con mayor población rural en el Estado (Metepec, Atlacomulco e

Ixtapan de la Sal) albergan el 53.5% del total estatal y recibieron el 42.3% del presupuesto total de la APC, mientras que las tres con menor población rural, donde vive el 11.1% (Texcoco, Amecameca y Zumpango), recibieron el 16.3% del presupuesto.

### Descripción de los invernaderos

En el estado de México se visitaron dos tipos de invernadero: Invernadero y macrotúnel. Que juntos sumaron una superficie de 90 hectáreas (**Cuadro 1.35**).

Cuadro 1.35. Tipos de invernadero del Estado de México

Estado Tipo invernadero	Superficie (ha)
Estado de México	90.00
Invernadero	50.00
Macrotúnel	40.00

Se encontraron 4 tipos de capillas en el estado de México la más importante fueron los Cenitales y macro túneles (**Cuadro 1.36**).

Cuadro 1.36. Tipos de Capillas del Estado de México

Estado Tipo de Capilla	Superficie (ha)
Estado de México	90.00
Capilla doble agua	ND
Cenital	50.00
Macro túneles	40.00
Parral	ND

En el **Cuadro 1.37** se presenta la ubicación de los invernaderos visitados del estado de México. En total se visitaron 13 invernaderos.

Cuadro 1.37. Ubicación de los invernaderos.

Clave	Entidad Federativa	Municipio
Mex_1	Estado de México	Xochicalco
Mex_2	Estado de México	Miacatlán
Mex_3	Estado de México	Mazatepec
Mex_4	Estado de México	Michiapa
Mex_5	Estado de México	Tonatico
Mex_6	Estado de México	Ixtapan de la Sal
Mex_7	Estado de México	Villa Guerrero
Mex_8	Estado de México	Villa Guerrero
Mex_9	Estado de México	Tenancingo Degollado
Mex_10	Estado de México	San Pedro Zictepec
Mex_11	Estado de México	San Bartolome Atlatlahuca
Mex_12	Estado de México	Atlacomulco de Fabela
Mex_13	Estado de México	San Lorenzo Tlacotepec

En el **Cuadro 1.38** se presentan las características generales de los invernaderos visitados del estado de México. Los detalles de cada uno de los invernaderos del estado de México se pueden consultar en el Anexo C.

Cuadro 1.38. Características generales de los invernaderos.

Clave	Tipo de Inv.	Tipo de Capilla	No de Cs.	Superficie Construida (ha)	Tipo de Cta.	Sistema de Riego	Sistema de Ventilación	Sistema de Calefacción
Mex_1	Inv.	Cenital	3		PET	Aspersión	Natural-Manual	Ninguno
Mex_2	Inv.	Cenital	3	100	PET	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
Mex_3	Inv.	Cenital	7		PET	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
Mex_4	Inv.	Cenital	9		PET	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
Mex_5	Inv.	Cenital	5		PET	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
Mex_6	Inv.	Cenital	5		PET	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
Mex_7	Inv.	Capilla doble agua	20		PET		Natural-Manual	Ninguno
Mex_8	Inv.	Parral	1		Malla		Natural-Manual	Ninguno
Mex_9	Inv.	Cenital	1		PET		Natural-Manual	Ninguno
Mex_10	Macro túnel	Macro túnel	1		PET		Natural-Manual	Ninguno
Mex_11	Inv.	Cenital	1		PET		Natural-Manual	Ninguno
Mex_12	Inv.	Cenital	1		PET		Natural-Manual	Ninguno
Mex_13	Inv.	Cenital	1		PET		Natural-Manual	Ninguno

\*Inv. = Invernadero; Cs. = Capillas; Cta. = Cubierta; PET = Polietileno

### Características del estado de San Luis Potosí

En San Luis Potosí el incremento de invernaderos ha sido significativo en el uso de malla sombra, invernadero, macro túnel y micro túnel reportándose 174 sitios en el 2006 y en donde las producciones de tomate bajo este tipo de sistemas se sostienen como el cultivo con mayor rendimiento (Hernández-Chacón, 2009). Actualmente la agricultura protegida se practica en las cuatro Regiones: Centro, Media, Altiplano y Huasteca, produciendo principalmente jitomate, pimiento, pepino, chile, calabaza entre otros en una superficie de 471.5 hectáreas entre invernaderos, malla sombra, macro túnel y micro túnel (SEDARH, 2009).

### Descripción de los invernaderos

En el estado de San Luis Potosí se visitaron cuatro tipos de invernadero: casa sombra, invernadero, macrotúnel y vivero. Que juntos sumaron una superficie de 71.09 hectáreas (**Cuadro 1.39**).

Cuadro 1.39. Tipos de invernadero del estado de Jalisco

Estado Tipo invernadero	Superficie (ha)
San Luis Potosí	71.09
Casa sombra	57.00
Invernadero	10.48
Macro túnel	3.47
Vivero	0.13

Se encontraron 6 tipos de capillas en el estado de San Luis Potosí la más importante fue casa sombra con 42.00 ha (**Cuadro 1.40**).

Cuadro 1.40. Tipos de Capillas del estado de Jalisco

Estado Tipo de Capilla	Superficie (ha)
San Luis Potosí	71.09
Casa Sombra	42.00
Cenital	10.48
En raspa y amagado	2.00
Macrotúneles	1.47
Malla Sombra	15.00
Vivero Plántula	0.13

En el **Cuadro 1.41** se presenta la ubicación de los invernaderos visitados del estado de San Luis Potosí. En total se visitaron 11 invernaderos.

Cuadro 1.41. Ubicación de los invernaderos

Clave	Entidad Federativa	Municipio	Nombre del Usuario
SLP_1	San Luis Potosí	San Ciró de Acosta	Miguel Ángel Cervantes Verástegui
SLP_1	San Luis Potosí	San Ciró de Acosta	Miguel Ángel Cervantes Verástegui
SLP_1	San Luis Potosí	San Ciró de Acosta	Miguel Ángel Cervantes Verástegui
SLP_2	San Luis Potosí	San Ciró de Acosta	Grupo Agropecuario San Cerv SPR de RL
SLP_3	San Luis Potosí	Guadalcazar	Agropecuaria La huerta SPR de RL
SLP_4	San Luis Potosí	Norias del Refugio	Grupo Naturey SPR de RL de CV
SLP_5	San Luis Potosí	Norias del Refugio	Grupo Naturey SPR de RL de CV
SLP_6	San Luis Potosí	Norias del Refugio	Huertas Daly SPR de RL
SLP_7	San Luis Potosí	Guadalcazar	Huerta MarVal SPR de RL de CV
SLP_8	San Luis Potosí	San Ciró de Acosta	Los compadres de la Zona Media SPR de RL de CV
SLP_9	San Luis Potosí	San Ciró de Acosta	Grupo Agropecario Los Laureles SPR de RL
SLP_10	San Luis Potosí	RioVerde	Tomateras de Plazuela SPR de RL
SLP_11	San Luis Potosí	RioVerde	Tomateras de Plazuela SPR de RL

En el **Cuadro 1.42** se presentan las características generales de los invernaderos visitados del estado de San Luis Potosí.

En el **Cuadro 1.43** se presentan las características generales de cultivos sembrados en los invernaderos visitados del estado de San Luis Potosí.

Los detalles de cada uno de los invernaderos del estado de San Luis Potosí se pueden consultar en el Anexo D.

Cuadro 1.42. Características generales de los invernaderos

Clave	Tipo de Inv.	Tipo de Capilla	No de Cs	Superficie Construida (ha)	Tipo de Cta.	Sistema de Riego	Sistema de Ventilación	Sistema de Calefacción
SLP_1	Inv.	Cenital	12	0.48384	PEBD	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
SLP_1	Macro túnel	Macro túneles	9	0.468	PEBD	Goteo	Natural	Ninguno
SLP_1	Vivero	Vivero Plántula	2	0.1344	PEBD	Nebulización	Natural	Ninguno
SLP_1	Inv.	Cenital	20	2	PEBD	Goteo	Natural-Manual	NA
SLP_3	Casa sombra	Casa Sombra	14	42	Malla	Goteo	Natural	Malla Térmica
SLP_4	Casa sombra	Malla Sombra	36	3	Malla	Goteo	Natural	Ninguno
SLP_5	Macro túnel	En raspa y amagado	20	2	PEBD	Goteo	Natural	Ninguno
SLP_1	Inv.	Cenital	26	3	PEAD	Fertirriego	Natural-Manual	Malla Térmica
SLP_7	Casa sombra	Malla Sombra	36	12	Malla	Goteo	Natural	Ninguno
SLP_1	Inv.	Cenital	12	1.5	PEAD	Fertirriego	Natural-Manual	Ninguno
SLP_1	Inv.	Cenital	10	1.5	PEAD	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
SLP_10	Invernadero	Cenital	14	2	PEBD	Goteo	Natural-Manual	Ninguno
SLP_11	Macro túnel	Macro túneles	16	1	PEBD	Goteo	Natural	Ninguno

\*Inv. = Invernadero; Cs. = Capillas; Cta. = Cubierta; PEBD = Polietileno baja densidad; PEAD = Polietileno alta densidad

Cuadro 1.43. Cultivos sembrados en los invernaderos

Clave	Superficie Sembrada (ha)	No de Capillas Sembradas	Cultivo Establecido	Rendimiento del cultivo (ton/ha)	Tipo de Sustrato
SLP_1	0.4838	12	Tomate Rojo (Jitomate)	103.35	Composta
SLP_1	0.468	9	Tomate Rojo (Jitomate)	64.10	Composta
SLP_1	0.1344	2	Melón Chino	223,214.29	Composta
SLP_2	2.016	30	Tomate Rojo (Jitomate)	52.00	Composta
SLP_3	42	14	Tomate Rojo (Jitomate)	90	Composta
SLP_4	3	36	Tomate Rojo (Jitomate)	92	Composta
SLP_5	2	22	Tomate Rojo (Jitomate)	74	Composta
SLP_6	3	26	Tomate Rojo (Jitomate)	165	Tezontle
SLP_7	12	36	Tomate Rojo (Jitomate)	92	Composta
SLP_8	1.4745	12	Tomate Rojo (Jitomate)	110	Composta
SLP_9	1.4784	10	Melón Chino	233.33	Composta
SLP_10	2	14	Tomate Rojo (Jitomate)	120	Composta
SLP_11	1	16	Tomate Rojo (Jitomate)	50	Composta

### Características del estado de Sinaloa

Sinaloa es un estado de contrastes, cambios y paradojas, desde la diversidad de climas y paisajes, a su evolución histórica y la riqueza de culturas. Esta condición multifacética probablemente ha propiciado el liderazgo de esta región que ostenta la primera posición en producción alimentaria en México. De hecho su capital, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional.

### Descripción de los invernaderos

En el estado de Sinaloa se visitaron 3 tipos de invernadero: Macrotúnel, Invernadero, y Mallasombra. Que juntos sumaron una superficie de 10 hectáreas. Cabe señalar que a pesar de la gran superficie que existe en Sinaloa, no fue fácil el acceso a las instalaciones, fue posible apreciar las numerosas unidades que existen en la entidad, de las cuales se toma memoria fotográfica (**Cuadro 1.44**).

Cuadro 1.44. Tipos de invernadero del estado de Sinaloa

Estado Tipo invernadero	Superficie (ha)
Sinaloa	10.00
Casa sombra	7.00
Invernadero	3.00
Macro túnel	--
Vivero	--

El estado de Sinaloa es el estado con mayor superficie dedicada a la producción de cultivos en ambientes protegidos. Sin duda que uno de los motivos para este despunte es el clima. Las características climáticas han permitido abaratar los costos de instalación y sobre todo mantenimiento.

La reducción de los costos en la instalación del invernadero puede ser atenuados con una estructura más débil, en el sentido de que las dimensiones y los materiales lo permiten. La principal forma de producir en el estado es mediante cubiertas de malla que reducen el peso y pueden establecer una estructura con menos acero como se muestra en las **Figuras 1.21 a 1.24**.



Figura 1.21. Cubiertas de malla.

Fuente: Tomada por personal del IINBAMEX.

De la misma manera el mantenimiento de la misma se reduce, tener una ventana de producción en la que prácticamente el ambiente se encarga de mantener las condiciones adecuadas para la producción del cultivo.

En general, predomina 3 tipos de capillas en el estado de Sinaloa la más importante fueron los mallasombra, de los invernaderos visitados se observaron gran cantidad de instalaciones, pero los que se describen aproximadamente suman 10 ha (**Cuadro 1.45**).

Cuadro 1.45. Tipos de Capillas del estado de Sinaloa.

Estado Tipo de Capilla	Superficie (ha)
Sinaloa	<b>10.09</b>
Casa Sombra	0.00
Cenital	3.00
En raspa y amagado	0.00
Macrotúneles	0.00
Malla Sombra	7.00
Vivero Plántula	0.0



Figura 1.22. Cubiertas de maya en Sinaloa.

Fuente: Tomada por personal del IINBAMEX.

De acuerdo con la bibliografía es Culiacán el municipio que mayor superficie representan a nivel estatal y caso a nivel nacional. Siendo la mallasombra la principal estructura en la cual se lleva a cabo la producción de cultivos en invernadero. No obstante Guasave y Los Mochis son municipios con gran superficie también dedicada a este sistema de producción y de acuerdo con el recorrido es un sistema en crecimiento

En el **Cuadro 1.46** se presenta la ubicación de los invernaderos visitados del estado de Sinaloa. En total se visitaron 5 invernaderos.

Cuadro 1.46. Ubicación de los invernaderos.

Clave	Entidad Federativa	Municipio	Nombre del Usuario
SIN_1	Sinaloa	Culiacán	SRL
SIN_2	Sinaloa	Guamúchil	Agrícola El Encanto
SIN_3	Sinaloa	Guasave	Campo San Luis
SIN_4	Sinaloa	Los Mochis	Agrícola Yépez
SIN_5	Sinaloa	Los Mochis	Campo Santa Rosa



Figura 1.23. Invernaderos en Sinaloa.

Fuente: Tomada por personal del IINBAMEX.

Los techos en capilla y cubiertos de malla son las principales características de este estado. En el **Cuadro 1.47** se presentan las características generales de los invernaderos visitados del estado de Sinaloa.



Figura 1.24. Techos de capilla cubiertos con malla.  
Fuente: Tomada por personal del IINBAMEX.

En el **Cuadro 1.48** se presentan las características generales de cultivos sembrados en los invernaderos visitados del estado de Sinaloa.

Cuadro 1.47. Características generales de los invernaderos.

Clave	Tipo de Inv.	Tipo de Capilla	No de Cs.	Superficie Construida (ha)	Tipo de Cubierta	Sistema de Riego	Sistema de Ventilación	Sistema de Calefacción
SIN_1	MALLA SOMBRA	PLANA	NA	2	MALLA	GOTEO	Natural	Sin sistema
SIN_2	MALLA SOMBRA	CENITAL	11	1	MALLA	GOTEO	Natural	Sin sistema
SIN_3	INV.	CENITAL	NA	3	PEBD malla	GOTEO	Natural	Sin sistema
SIN_4	MACRO TUNEL	TUNEL	4	1	MALLA	GOTEO	Natural	Sin sistema
SIN_5	MALLAS OMBRA	CENITAL	10	3	MALLA	GOTEO	Natural	Sin sistema

\*Inv. = Invernadero; Cs. = Capillas; Cta. = Cubierta; PEBD = Polietileno baja densidad; PEAD = Polietileno alta densidad

Cuadro 1.48. Cultivos sembrados en los invernaderos.

Clave	Superficie Sembrada (ha)	No de Capillas Sembradas	Cultivo Establecido	Rendimiento del cultivo (ton/ha)	Tipo de Sustrato
SIN_1	2	La misma	Tomate Rojo (Jitomate)		Suelo
SIN_2	1	La misma	Pimiento		Suelo
SIN_3	3	La misma	Jitomate y pimiento		Suelo
SIN_4	1	La misma	Arándano y tomate		Suelo
SIN_5	3	La misma	Tomate de cascara		Suelo

## 1.7. Nivel tecnológico

De acuerdo a De Anda y Hervey (2017), mientras sea menor el número de instalaciones por hectáreas, mayor es el grado de tecnología que se usa en la instalación, ya que estas, requieren más tecnología para controlar las variables para el crecimiento y productividad de las plantas.

En los estados situados al norte, cerca de la frontera de Estado Unidos, cuentan con instalaciones de tecnología media-alta. Tomando en cuenta que la tecnología media-alta cuenta con menos de dos unidades por hectárea, mientras que la tecnología media es de 3-5 unidades por ha y baja de 5 unidades por ha (**Cuadro 1.49 y Figura 1.25**).

Cuadro 1.49. Relación entre el número de instalaciones colocadas en México con agricultura protegida (De Anda y Hervey, 2017)

Estado	Unidades	Superficie	Relación
Chihuahua	275	1,497.74	0.18
Sinaloa	1,074	4,744.22	0.23
Baja California Sur	364	803.2	0.45
Baja California	1,339	2,689.91	0.5
Sonora	724	1,196.43	0.61
Michoacán de Ocampo	870	1,004.06	0.87
Jalisco	3,004	3,310.09	0.91
Coahuila de Zaragoza	327	353.99	0.92
Tamaulipas	286	295.19	0.97
Colima	439	425.38	1.03
Guanajuato	811	655.34	1.24
San Luis Potosí	1,129	901.41	1.25
Zacatecas	729	410.54	1.78
Querétaro	573	244.77	2.34
Nuevo León	282	106.64	2.64
Quintana Roo	151	56.48	2.67
Aguascalientes	238	87.1	2.73
Puebla	3,021	1,071.25	2.82
Campeche	199	69.51	2.86
Veracruz de Ignacio de la Llave	367	112.38	3.27
México	5,564	1,517.39	3.67
Morelos	1,038	237.53	4.37
Nayarit	555	121.08	4.58
Durango	365	75.02	4.87

Estado	Unidades	Superficie	Relación
Yucatán	360	67.89	5.3
Guerrero	907	151.28	6
Tabasco	89	13.61	6.54
Hidalgo	2,556	272.47	9.38
Oaxaca	4,671	482.91	9.67
Chiapas	3,651	273.74	13.34
Tlaxcala	1,163	81.05	14.35
Distrito Federal	2,856	152.45	18.73
Total	39,977	23,482.05	1.7

Datos del 2014.

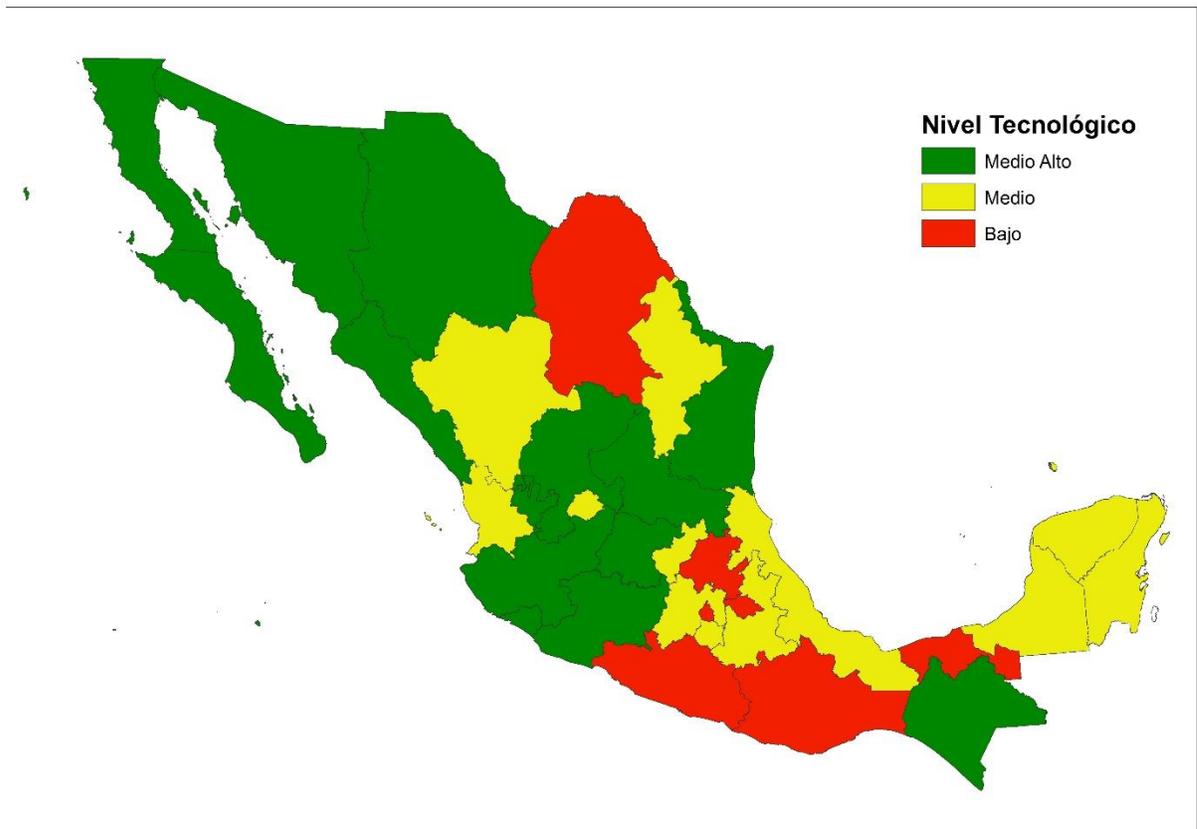


Figura 1.25. Nivel tecnológico por estado, año 2014 (De Anda y Hervey, 2017).

Los datos, sobre la tecnología agrícola protegida en México, muestran la variación de las tecnologías utilizadas. Donde la baja tecnología es del 100 % de dependientes que emplean tecnologías sencillas similares a las usadas en el cultivo al aire libre.

La tecnología media corresponde a estructuras modulares o de baterías semi-calentadas, con riego programado y que pueden estar en el suelo o en hidroponía (**Figura 1.26**).

Las altas tecnologías incluyen instalaciones con control automático de clima, riego, inyecciones computarizadas de precisión de CO<sub>2</sub>, así como todo lo requerido en sensores, dispositivos, ventilación, pantallas térmicas para el control de la iluminación y cultivo de plantas sobre sustratos.



Figura 1.26. Invernadero con Tecnología Media.

El nivel de tecnología, depende de la cantidad de mano de obra y rendimientos que se obtengan para su instalación.

- Un invernadero de baja tecnología consume en promedio \$5USD/m<sup>2</sup> y consta de elementos simples como estructuras de metal ligero, plástico, cortinas de malla de fibra sintética, etc.
- El de tecnología media cuesta en promedio \$19USD/m<sup>2</sup> y emplea procesos semi-automáticos.
- El invernadero de tecnología alta, está totalmente automatizado y cuesta alrededor de \$115USD/m<sup>2</sup>.

Los cultivos de tomate en campo, tienen un rendimiento anual de 40 a 60 t/ha (toneladas por hectárea), empleando baja tecnología se obtiene de 120 a 150 t/ha, con tecnología media de 200 a 250 t/ha y en invernaderos de alta tecnología aproximadamente 600 t/ha.

### 1.8. Principales cultivos de la agricultura protegida en México

La agricultura protegida se ha desarrollado en todo el territorio nacional, tanto en condiciones de clima templado como zonas áridas y clima tropical, pero con mayor superficie instalada en el Noroeste, Occidente y Norte de México (Bastida, 2008).

En el año 2012 los principales cultivos que se producían eran jitomate, 70%, pimiento, 16%, pepino, 10% y otros cultivos ocupaba el 4% restante. Aunque mínima pero presentó una diversificación mediante cultivos como la papaya, fresa, chile habanero, flores y plantas aromáticas. Además, las empresas grandes se ubican en el occidente y noroeste, mientras en el centro del País la mayoría de las unidades de producción no rebasan las tres hectáreas (Figura 1.27).

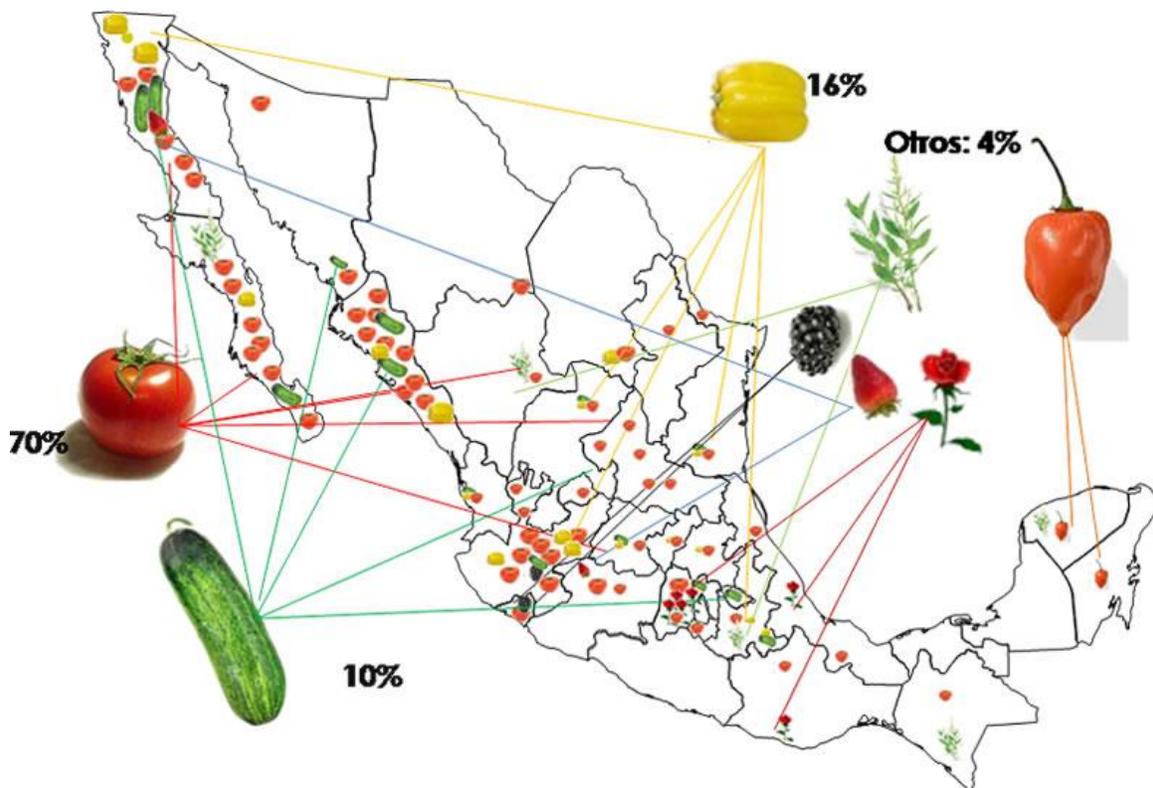


Figura 1.27. Principales cultivos de la agricultura protegida y su distribución en México (AMHPAC, 2013)

En 2014 se produjo cerca de 2,8 millones de toneladas de tomates, generando ingresos de \$135 mil millones de dólares, donde el consumo interno fue del 37% y el resto exportado a Estados Unidos (95%) y Canadá (5%). Dando como resultado, que el cultivo de tomate depende de en mayor importancia de las exportaciones.

En el **Cuadro 1.50** se presentan los cinco principales cultivos por estado de acuerdo a los datos obtenidos por el SIAP del año 2014.

Cuadro 1.50. Principales cultivos por estado (Elaborado con datos del SIAP 2014)

Estado Cultivos	Superficie (Ha)	Estado Cultivos	Superficie (Ha)
<b>Jalisco</b>	<b>2,561.71</b>	<b>Colima</b>	<b>158.75</b>
Blueberry	160.21	Chile Morrón	4.85
Frambuesa	1,102.45	Palma Areka	3.4
Fresa	262.76	Palma Rubelina	3.4
Tomate Rojo (Jitomate)	575.9	Pepino	20.53
Zarzamora	460.39	Tomate Rojo (Jitomate)	126.57
<b>Baja California</b>	<b>2,019.80</b>	<b>Tamaulipas</b>	<b>115.58</b>
Arándano	143.02	Berenjena	15
Frambuesa	150.96	Chile Habanero	8
Fresa	150.56	Pepino	15.49
Pepino	563.7	Tomate Rojo (Jitomate)	67.07
Tomate Rojo (Jitomate)	1,011.56	Tomate Rojo (Plántula)	10.02
<b>Sinaloa</b>	<b>1,675.07</b>	<b>Querétaro</b>	<b>113.39</b>
Berenjena	17.01	Chile Morrón	26.86
Chile Morrón	533.13	Gypsophilia	5
Chile Verde	81.61	Pepino	18.82
Pepino	316.51	Rosa	21.93
Tomate Rojo (Jitomate)	726.8	Tomate Rojo (Jitomate)	40.77
<b>Baja California Sur</b>	<b>1,643.67</b>	<b>Guerrero</b>	<b>98.4</b>
Albahaca	19	Crisantemo	0.92

Estado Cultivos	Superficie (Ha)	Estado Cultivos	Superficie (Ha)
Chile Morrón	311	Flores	0.98
Chile Verde	177.3	Pepino	2.01
Pepino	258.77	Rosa	0.66
Tomate Rojo (Jitomate)	877.6	Tomate Rojo (Jitomate)	93.83
<b>Chihuahua</b>	<b>1,243.35</b>	<b>Morelos</b>	<b>96.24</b>
Chile Verde	2.38	Bugambilia (Planta)	7.91
Manzana	1,228.07	Calabaza	8.41
Naranja	3	N/A	14.41
Tomate Rojo (Jitomate Semilla)	4.5	Noche Buena	12.82
Tomate Rojo (Jitomate)	5.41	Tomate Rojo (Jitomate)	52.69
<b>Sonora</b>	<b>999.65</b>	<b>Veracruz</b>	<b>83.56</b>
Blueberry	1	Chayote	61.14
Chile Morrón	230.72	Hongos	4.5
Chile Verde	65	Plantas de Ornato	3.85
Pepino	364.06	Plántula	4.36
Tomate Rojo (Jitomate)	338.87	Tomate Rojo (Jitomate)	9.71
<b>México</b>	<b>551.34</b>	<b>Quintana Roo</b>	<b>76.25</b>
Clavel	87.74	Chile Habanero	38.2
Crisantemo	98.38	Chile X-Catic	0.04
Plantas de Ornato	82.19	Pepino	36.4
Rosa	181.51	Plantas de Ornato	0.12
Tomate Rojo (Jitomate)	101.51	Tomate Rojo (Jitomate)	1.49

Estado Cultivos	Superficie (Ha)	Estado Cultivos	Superficie (Ha)
<b>San Luis Potosí</b>	<b>549.72</b>	<b>Nuevo León</b>	<b>69.63</b>
Chile Morrón	21.3	Chile Habanero	1
Chile Poblano	12.9	Chile Morrón	4.81
Chile Verde	17.29	Papa (Semilla)	0.5
Pepino	19.27	Tomate Rojo (Jitomate)	63.12
Tomate Rojo (Jitomate)	478.96	Tomate Rojo (Plántula)	0.2
<b>Michoacán</b>	<b>505.3</b>	<b>Nayarit</b>	<b>51.86</b>
Chile Morrón	9.9	Chile	4.06
Fresa	270.25	Pepino	2.72
Noche Buena	52.71	Pino	3.62
Tomate Rojo (Jitomate)	163.34	Tomate Rojo (Jitomate)	36.3
Zarzamora	9.1	Tomate Rojo (Plántula)	5.16
<b>Guanajuato</b>	<b>453.98</b>	<b>Aguascalientes</b>	<b>45.82</b>
Brócoli (Plántula)	15.1	Chile Verde	5.76
Chile Morrón	91.04	Fresa	2.44
Fresa	94.01	Nopal Verdura	4
Pepino	24.41	Pepino	9.17
Tomate Rojo (Jitomate)	229.43	Tomate Rojo (Jitomate)	24.45
<b>Zacatecas</b>	<b>318.2</b>	<b>Distrito Federal</b>	<b>36.56</b>
Chile Morrón	5	Lechuga	13.19
Lechuga	4.24	Malvon	3.08
Pepino	46.44	Noche Buena	6.16

Estado Cultivos	Superficie (Ha)	Estado Cultivos	Superficie (Ha)
Tomate Rojo (Jitomate Semilla)	6.52	Tomate Rojo (Jitomate)	2.79
Tomate Rojo (Jitomate)	256	Verdolaga	11.35
<b>Puebla</b>	<b>290.2</b>	<b>Tlaxcala</b>	<b>30.62</b>
Crisantemo	5.47	Nopal Verdura	4.28
Noche Buena	11.97	Papa	0.7
Pino	5.7	Pepino	0.71
Rosa	18.26	Tomate Rojo (Jitomate Semilla)	1.88
Tomate Rojo (Jitomate)	248.81	Tomate Rojo (Jitomate)	23.05
<b>Oaxaca</b>	<b>272.62</b>	<b>Yucatán</b>	<b>22.35</b>
Chile Habanero	1.79	Chile Habanero	11.55
Chile Verde	4.16	Hortalizas Y Medicinales	2.42
Papaya	3.43	Pepino	2.67
Pepino	2.68	Plantas de Ornato	0.72
Tomate Rojo (Jitomate)	260.55	Tomate Rojo (Jitomate)	4.99
<b>Coahuila</b>	<b>248.47</b>	<b>Durango</b>	<b>19.62</b>
Chile Morrón	10.5	Chile Verde	0.49
Nopal Verdura	3.6	Frutales Varios	0.22
Papa (Semilla)	2.25	Pino	1.89
Pepino	2	Rosa	0.56
Tomate Rojo (Jitomate)	230.12	Tomate Rojo (Jitomate)	16.46
<b>Chiapas</b>	<b>186.19</b>	<b>Campeche</b>	<b>10.74</b>
Aster (Manojo)	9.4	Caoba	1.33

Estado Cultivos	Superficie (Ha)	Estado Cultivos	Superficie (Ha)
Flores	8.32	Cedro	1.76
Pon-Pon	7.99	Chile Habanero	5.5
Rosa	16.58	Tomate Rojo (Jitomate Semilla)	0.53
Tomate Rojo (Jitomate)	143.9	Tomate Rojo (Jitomate)	1.63
<b>Hidalgo</b>	<b>180.22</b>	<b>Tabasco</b>	<b>3.39</b>
Chile Morrón	29.62	Chile Habanero	1.54
Frambuesa	9	Chile Morrón	0.1
Nopal Verdura	33.17	Limón	0.12
Rosa	9.65	Pepino	1.2
Tomate Rojo (Jitomate)	98.78	Tomate Rojo (Jitomate)	0.43

#### 1.8.1. Requerimientos hídricos de los Principales cultivos

Uno de los factores críticos en la producción de cultivos en invernadero, es el consumo de agua por las plantas y que debe ser aplicado mediante el riego. Si bien es cierto cuando se habla de nivel tecnológica, se concibe en función de sistemas auxiliares para el control, manejo y operación del invernadero, lo cierto es que ninguno puede funcionar sin un sistema de riego.

#### 1.8.2. Consumo hídrico para 4-5 ciclos

Los cinco principales cultivos del año 2015 por superficie cubierta en la agricultura protegida en el país fueron: para el tomate rojo 6,188.18 ha, chile verde 2,919.23 ha, pimiento Morrón 2,147.24 ha, pepino 1,648.8 ha, frambuesa 284.03 ha, según información del sistema de información agroalimentaria y pesquera (SIAP, 2015).

La última información en cifras promedio para el país, sobre los rendimientos de los tres principales cultivos producidos en invernadero (SIAP, 2013), relaciona a estos con la productividad del agua ubicando al tomate como el de mejor rendimiento por superficie cosechada, seguido del pimiento y el pepino (**Cuadro 1.51**).

Cuadro 1.51. Rendimiento de los tres principales cultivos de invernadero en México. (SIAP, 2013)

Cultivo	Rendimiento [ton/ha]	Productividad del agua [kg/m <sup>3</sup> ]
Tomate	135.2	22.1
Pimiento morrón	98	2.2
Pepino	78	1.95

A partir de la información anterior, es posible estimar un valor aproximado de la cantidad de agua que los cultivos utilizaron durante su ciclo vegetativo, dada la información de las cartas tecnológicas de cultivo del programa integral de desarrollo rural, fichas técnicas de distintos cultivos que contienen la información del manejo sugerido por cultivo, así como datos de la cantidad de plantas por superficie o espaciamiento entre plantas entre otros, se obtuvo para cada cultivo el volumen de agua consumido por planta aproximado por cultivo (**Cuadro 1.52**), no obstante se debe tener en cuenta que la densidad de población es otra variable que influye en los demás parámetros como el consumo de agua.

Cuadro 1.52. Consumo de agua por planta de los principales cultivos en invernadero durante el ciclo vegetativo.

Cultivo	Rendimiento [Kg/m <sup>2</sup> ]	Productividad del agua [kg/l]	Densidad de población sugerida (PIDR - SAGARPA, 2014) [pl/m <sup>2</sup> ]	Consumo de agua promedio por ciclo [l/pl]
Tomate	12.27	2.209x10 <sup>-2</sup>	4	138.7
Pimiento	8.89	2.19x10 <sup>-3</sup>	6	673.5
Pepino	7.07	1.95x10 <sup>-3</sup>	2	1814.4

Los requerimientos de riego diarios se pueden estimar usando la ecuación de balance hídrico, sin embargo, para el caso de los invernaderos, debido a la ausencia de lluvia y otras aportaciones, el requerimiento de riego es igual a la evapotranspiración real del cultivo ETr (Flores et al., 2007).

Para cada etapa fenológica el consumo es variable, la tasa evapotranspirativa es distinta según la hora del día y la demanda hídrica presente del cultivo de invernadero, por lo tanto, su evapotranspiración tendrá relación directa con las fases de su desarrollo, el momento del día, y la cantidad de agua aprovechable que esté disponible en el suelo aportada por los riegos, sin olvidar que esta cantidad está en función de variables físicas como la temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad del viento.

### 1.8.3. Tomate

En el caso de estudio para el cultivo de tomate en el noreste de China, el trabajo de Qiu R. et al. (2013), obtiene la evapotranspiración de cultivo por planta de tomate en invernadero variando la densidad de plantación en 3.1, 3.7, 4.4, 5 y 5.6 plantas por metro cuadrado, y adoptando la misma programación de riego, para dos periodos diferentes.

Flores et al., (2007) obtuvo los valores de  $ET_0$ ,  $K_c$  y  $ET_c$  para los periodos representativos del desarrollo de la planta, inicial, desarrollo, media y final, para las diferentes densidades de plantación, el mayor rendimiento por planta fue la configuración de 3.7 plantas por metro cuadrado correspondiente al primer ciclo 2010-2011 con 4.8 kg por planta, los resultados se muestran en el **Cuadro 1.53**.

Cuadro 1.53. Comparación entre riego,  $ET_c$ ,  $ET_0$ , para cada etapa de desarrollo.

Etapa del Cultivo	Riego [mm] para el ciclo	$ET_0$ promedio [mm d <sup>-1</sup> ]	$ET_c$ [mm] por planta	$ET_c / ET_0$ promedio
Inicial	32	1.55	31.8	0.59
Desarrollo	55.9	2.22	52.3	0.53
Media	223.6	3.88	227.0	0.77
Final	83.9	4.44	101.4	0.79
Total	395.4	3.13	412.5	0.72

Del **Cuadro 1.53**, el requerimiento hídrico por planta de tomate para el ciclo completo fue de 412.5 l, si el tiempo promedio del ciclo, entre la cosecha y la siembra se asume como de 110 días, en este estudio 3.75 l por planta por día.

### 1.8.4. Pimiento

Aladenola, O. y Madramootoo, C. (2014), llevaron a cabo un experimento para medir la respuesta del pimiento morrón (*Capsicum annuum L.*) en invernadero a la variación del riego.

Flores et al., (2007) menciona que cuatro esquemas de riego fueron aplicados en dos periodos 2011 y 2012, y fueron 120%, 100%, 80% y 40% del  $ET_c$ , se observó que el mayor

rendimiento con 0.63 kg por planta fue el primer esquema (120% de ETc) en 2011, del cual los valores obtenidos se muestran en el **Cuadro 1.54**, para un total de 105 días del ciclo.

Cuadro 1.54. Valores de ETc del pimiento para el esquema 120% de ETc

Etapa del Cultivo	ETc (mm)
Inicial	11.9
Desarrollo	24
Media	34.9
Final	13.5
Total	84.2

El esquema de riego correspondiente del cual se obtuvo mayor rendimiento fue de 101.04 [mm] por planta, el cual corresponde a 101.04 l por planta, o 0.97 l por planta por día.

#### 1.8.5. Importancia de la producción de Jitomate

Actualmente doce son los países que destacan en la superficie destinada a la producción de esta hortaliza, siendo China el principal país productor con una superficie de 1,105,153 ha, y se ha caracterizado por triplicar su superficie en la última década (Namesny, 2004). En cuanto a la producción de jitomate, México se encuentra en el lugar número 10 (**Cuadro 1.55**).

Cuadro 1.55. Producción mundial de tomate para consumo en fresco

País	Producción de jitomate (toneladas)
China	25,456,211
Estados Unidos	10,250,000
Turquía	9,000,000
India	8,500,000
Italia	7,000,000
Egipto	6,328,720
España	3,600,000
Brasil	3,518,163
Irán	3,000,000

País	Producción de jitomate (toneladas)
México	2,100,000
Francia	2,000,000
Rusia	1,950,000
Chile	1,200,000
Portugal	1,132,000
Ucrania	1,100,000
Uzbekistan	1,000,000
Marruecos	881,000
Nigeria	879,000
Francia	870,000
Túnez	850,000
Argelia	800,000
Japón	797,600
Argentina	700,000

En México, el jitomate es la segunda hortaliza más importante por su superficie sembrada; la más importante por su volumen en el mercado nacional, y la primera en su valor de producción. Además, su cultivo utiliza una gran cantidad de mano de obra remunerando en beneficio social. A esta hortaliza de fruto se le encuentra en los mercados durante todo el año; su fruto se consume tanto en fresco como procesado y es una fuente rica de vitaminas. A pesar de cultivarse en 27 estados de México, sólo 5 entidades (Sinaloa, Baja California, San Luis Potosí, Jalisco y Nayarit) concentran el 74% de la producción, destacando Sinaloa como el principal productor, tanto para abastecer el mercado nacional como el de exportación (Velasco y Nieto, 2006).

El noroeste del México produce una tercera parte del total de tomate para consumo en fresco y el total de la producción de industria. El rendimiento promedio más altos se obtienen en Baja California y Sinaloa, donde se alcanzan alrededor de  $56.3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (SIAP, 2013).

Como ejemplo de los altos rendimiento se presenta los datos de producción de jitomate (SAGARPA, 2009), donde a cielo abierto los rendimientos promedios anuales son de 40 toneladas por hectárea, mientras que en sistemas con fertirrigación ese rendimiento se multiplicaba por tres, llegando hasta cinco o seis veces más en invernaderos de mediana tecnología y hasta 15 veces más en invernaderos de alta tecnología (**Cuadro 1.56**). Rendimientos similares se obtuvieron en otros cultivos, como pimiento, pepino, lechugas y calabacita, ornamentales y frutilla, con ello quedo manifiesto como el uso de invernaderos, bien manejados, era donde se obtenían los más altos rendimientos agrícolas, por arriba de cualquier otro sistema de producción intensiva.

Cuadro 1.56. Rendimiento por sistema productivo con jitomate o tomate rojo.

Sistema de producción	Rendimiento (ton/hectárea)
Agricultura de campo y cielo abierto	40.0
Cultivo a cielo abierto con fertirrigación	120.0
Invernadero de tecnología media y fertirrigación	200.0
Invernadero de tecnología media y mejora de sustrato	250.0
Invernadero de alta tecnología	600.0

Fuente: SAGARPA, 2009

Las inferencias sobre el rendimiento de un cultivo pueden lograrse mediante el análisis de las variables climáticas de precipitación y temperatura relacionadas con las etapas fenológicas del cultivo y determinando las acciones directas o indirectas que tienen dichos factores en el desarrollo de la planta. (Aptitud agroclimática de México, SIAP, 2017)

De acuerdo con el SIAP, La producción acumulada de tomate rojo en el país a septiembre fue de **2 millones 100 mil toneladas**, lo que representa **16.3% de incremento** respecto de la obtenida el año previo (**Cuadro 1.57**). A nivel, nacional tres entidades concentran alrededor de 52% de la producción nacional, **Sinaloa que se mantienen como el principal productor** aporta 35% del total, seguida por **San Luis Potosí**, que produce 10%, y **Zacatecas** que genera 7 por ciento (Boletín mensual de la producción, SIAP-SAGARPA, 2017).

Cuadro 1.57. Avance a septiembre de 2017 (Miles de toneladas)

Estado	Producción acumulada a septiembre (miles de ton)		Variación %anual	Participación %2017
	2016	2017		
Total	1,805.80	2,100.10	16.3	100
Sinaloa	551.1	744.8	35.2	35.5
San Luis Potosí	179.8	201.1	11.8	9.6
Zacatecas	132.4	140.1	5.8	6.7
Sonora	95.5	109.6	14.8	5.2
Baja California Sur	78.2	80.1	2.4	3.8
Querétaro	64.3	77.7	20.7	3.7
Oaxaca	56.9	73.7	29.5	3.5
Michoacán	83.1	71.6	-13.8	3.4
Jalisco	78.4	70.6	-10	3.4
Baja California	95.2	68.8	-27.7	3.3
Coahuila	67.9	64.8	-4.5	3.1
México	47.9	58.1	21.3	2.8
Resto	275.1	339	23.3	16.1

Fuente: Boletín mensual de la producción, SIAP-SAGARPA, 2017. <https://www.gob.mx/siap/documentos/boletin-mensual-de-avances-de-la-produccion-de-tomate-rojo-jitomate>

Con la producción en invernadero se logra proporcionar a la planta las condiciones adecuadas para el crecimiento y desarrollo, lo que repercute en un aumento del rendimiento y calidad del fruto. En invernadero de alta tecnología se pueden obtener rendimientos promedio de 342 toneladas por hectárea, mientras que, en invernaderos tipo parral, pueden obtenerse 48 cortes que corresponden a 8 cortes por mes, obteniéndose un rendimiento total de 244.8 ton/ha (Navarro-Urbina, 2011).

De acuerdo con Ponce (2017), la tecnología de la agricultura protegida en México se sitúa entre baja, media y alta. El 79 % de la superficie cultivada en agricultura protegida es de media-alta tecnología, mientras que el 17% tiene tecnología media y un 5% presenta baja tecnología.

Los rendimientos de jitomate en invernaderos de baja tecnología son cercanos a las 120 toneladas por hectárea (t/ha), mientras que en los de tecnología media el rendimiento oscila entre las 200 a 250 t/ha y con alta tecnología se pueden obtener hasta 600 t/ha (Cuadro 1.58 a 1.61).

Cuadro 1.58. Producción agrícola de tomate bola en invernadero por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California	16.25	16.25	1,411.06	86.83	19,841.62	27,997.72
Baja California Sur	20	17	876.86	51.58	8,410.29	7,374.65
Chihuahua	0.59	0.42	38	90.48	11,464.74	435.66
Coahuila	3	3	606.46	202.15	8,174.20	4,957.33
Colima	1.79	1.79	274.23	153.2	4,380.00	1,201.13
Guanajuato	111.93	111.93	20,208.44	180.54	4,442.73	89,780.71
Hidalgo	1	1	186	186	6,831.72	1,270.70
Jalisco	207	207	20,613.42	99.58	10,015.26	206,448.84
México	84.75	84.75	34,311.25	404.85	6,099.58	209,284.23
Nuevo León	2	2	344	172	6,000.00	2,064.00
Sinaloa	788	788	106,104.55	134.65	3,680.04	390,469.48
Sonora	177	177	35,091.00	198.25	4,414.78	154,918.87
Zacatecas	37.7	37.7	12,272.56	325.53	11,105.73	136,295.78
<b>Total</b>	<b>1,451.01</b>	<b>1,447.84</b>	<b>232,337.83</b>	<b>160.47</b>	<b>5,304.77</b>	<b>1,232,499.09</b>

Cuadro 1.59. Producción agrícola de tomate bola en malla sombra por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California Sur	30	30	2,130.36	71.01	7,057.29	15,034.56
Sinaloa	1,138.50	1,138.50	121,764.50	106.95	3,684.17	448,601.09
Sonora	52.46	52.46	10,608.66	202.22	8,902.93	94,448.14
Zacatecas	22	22	3,140.00	142.73	4,554.36	14,300.68
<b>Total</b>	<b>1,242.96</b>	<b>1,242.96</b>	<b>137,643.52</b>	<b>110.74</b>	<b>4,158.46</b>	<b>572,384.47</b>

Cuadro 1.60. Producción agrícola de tomate saladette en invernadero por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California	18.75	18.75	1,780.00	94.93	15,593.15	27,755.80
Baja California Sur	3.16	3.16	214.88	68	6,900.00	1,482.67
Chiapas	45	45	3,150.00	70	6,722.22	21,175.00
Chihuahua	4	4	507.5	126.88	9,721.00	4,933.41
Ciudad de México	1.5	1.5	126.05	84.03	8,150.08	1,027.32
Coahuila	444	444	63,038.41	141.98	6,415.05	404,394.39
Colima	142.14	142.14	14,760.46	103.84	6,169.63	91,066.56
Durango	73.89	73.89	10,705.16	144.88	8,121.76	86,944.70
Guanajuato	294.71	294.71	42,625.27	144.64	4,518.99	192,623.24
Guerrero	149.62	149.62	3,277.34	21.9	7,176.22	23,518.92
Hidalgo	143.93	143.93	25,847.46	179.58	6,571.98	169,869.08
Jalisco	458.98	458.98	55,242.44	120.36	7,957.77	439,606.70
Michoacán	120	120	17,331.00	144.42	5,468.11	94,767.82
Morelos	130.4	130.4	30,854.10	236.61	7,185.04	221,688.01
México	159.14	159.14	25,396.49	159.59	8,656.48	219,844.17
Nayarit	55	55	13,743.22	249.88	5,185.35	71,263.34
Nuevo León	93	93	22,756.00	244.69	8,400.49	191,161.62
Oaxaca	384.79	384.79	84,376.46	219.28	7,335.36	618,931.52
Puebla	575.52	575.52	111,382.17	193.53	6,480.94	721,861.51
Querétaro	154.68	154.68	82,107.55	530.82	6,046.46	496,460.24
Quintana Roo	7.24	6.24	380.01	60.9	10,456.05	3,973.40
San Luis Potosí	240.5	240.5	47,177.70	196.16	7,366.51	347,535.00
Sinaloa	267	267	34,323.96	128.55	4,863.58	166,937.43
Sonora	120.26	120.26	24,703.74	205.42	5,911.29	146,030.90
Tamaulipas	100	100	9,000.00	90	11,511.11	103,600.00

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Tlaxcala	23	23	3,910.00	170	10,000.00	39,100.00
Yucatán	0.92	0.92	31.14	33.85	5,967.57	185.83
Zacatecas	203.07	193.07	34,420.86	178.28	7,374.62	253,840.91
<b>Total</b>	<b>4,414.20</b>	<b>4,403.20</b>	<b>763,169.37</b>	<b>173.32</b>	<b>6,763.35</b>	<b>5,161,579.50</b>

Cuadro 1.61. Producción agrícola de tomate saladette en malla sombra por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California Sur	730.25	730.25	54,358.00	74.44	8,481.47	461,035.93
Chiapas	138.65	138.65	9,107.75	65.69	6,648.67	60,554.45
Chihuahua	16	16	1,920.00	120	8,500.00	16,320.00
Coahuila	160	160	27,057.40	169.11	7,145.00	193,325.12
Durango	75	75	12,765.00	170.2	7,737.29	98,766.51
Guanajuato	7.3	7.3	1,058.50	145	4,035.00	4,271.05
Guerrero	1.19	1.19	22.18	18.64	7,387.01	163.84
Jalisco	20	20	1,047.20	52.36	8,299.57	8,691.31
Nuevo León	1	1	174	174	5,162.07	898.2
San Luis Potosí	192	192	36,260.00	188.85	6,856.54	248,618.17
Sinaloa	1,602.50	1,602.50	150,935.78	94.19	3,998.35	603,494.58
Sonora	288	280.5	32,168.53	114.68	5,857.11	188,414.46
Yucatán	0.36	0.36	6	16.67	7,500.00	45
Zacatecas	19	19	2,670.00	140.53	6,819.83	18,208.95
<b>Total</b>	<b>3,251.25</b>	<b>3,243.75</b>	<b>329,550.34</b>	<b>101.6</b>	<b>5,773.95</b>	<b>1,902,807.57</b>

El tomate, o jitomate como también se le conoce a esta solanácea, es por mucho el cultivo más extendido, no solo en México sino en el Mundo. De ahí que una de las revoluciones más importantes a nivel de variedad es el diseño de otras estructuras hortícolas, pero sin perder el sabor base del jitomate.

En la **Figura 1.28** se presenta la distribución de la superficie de los cultivos por tipo de estructura.

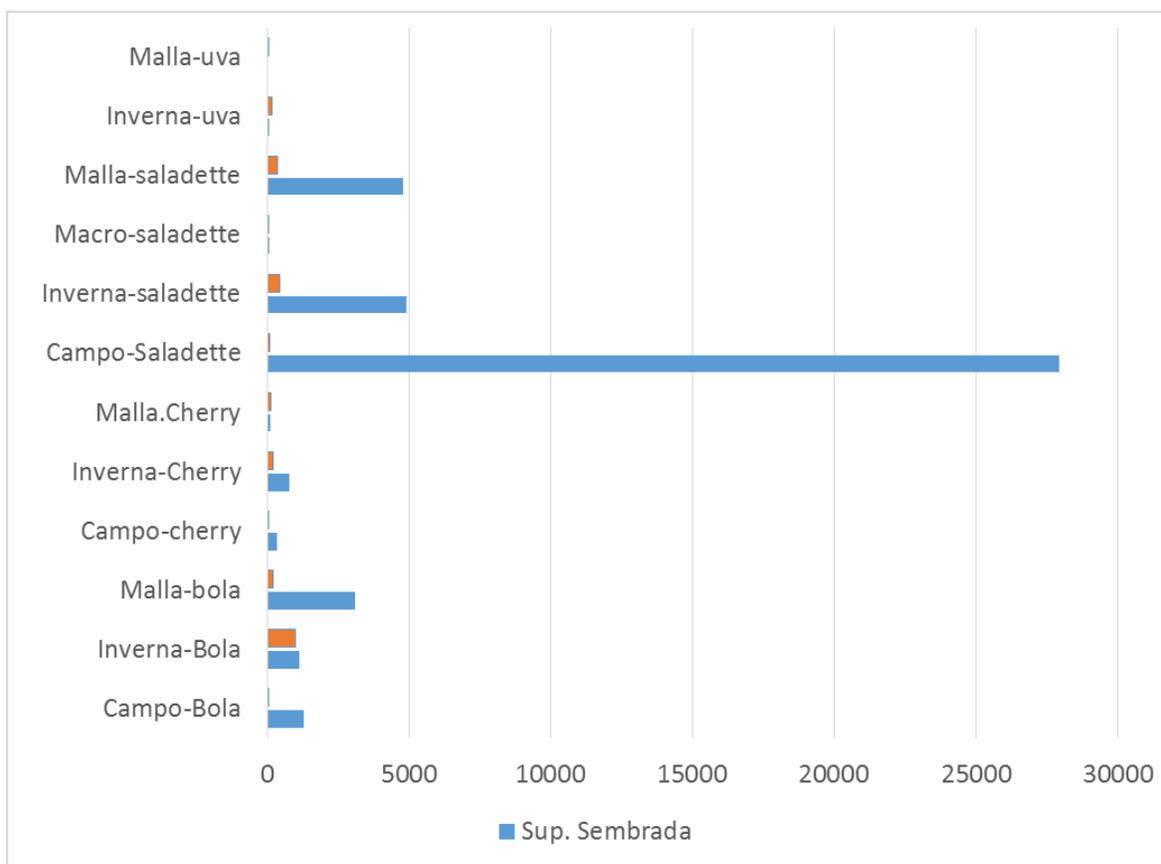


Figura 1.28. Distribución de la superficie dedicada al cultivo del tomate por tipo (SIAP, 2017).

#### 1.8.6. Pimiento

El cultivo de pimiento tiene gran importancia a nivel mundial y ocupa el tercer lugar en superficie cultivada en invernadero, después del tomate y pepino pero el segundo en importancia económica. En México es el segundo con mayor superficie bajo cubierta y en importancia económica.

El cultivo del pimiento se puede establecer en explotaciones de diferentes niveles tecnológicos, desde sistemas convencionales en campo abierto, bajo malla sombra, en invernadero de baja, media y alta tecnología. El rendimiento promedio varía de acuerdo al sistema de cultivo llegando a alcanzar hasta más de 28 kg/m<sup>2</sup> en invernaderos de alta tecnología donde se cuenta con un adecuado control del clima.

La Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC) señaló que cerca del 32 por ciento de los pimientos mexicanos procedía de invernaderos en el 2014, cantidad que en años anteriores aumentó un 25 por ciento (2012) y 30 por ciento (2013).

Alrededor del 15 por ciento de la superficie hortícola protegida mexicana se utiliza para el cultivo de pimientos, y unos cálculos aproximados indican que unas 163 mil toneladas se produjeron en el 2014.

Se estima que la producción de pimiento de los productores de AMHPAC alcanzó las 139 mil toneladas en 2012, cantidad que aumentó a 142 mil toneladas en 2013.

Beltrán dijo que sus productores habían reportado que el 80 por ciento de la producción se destinó a Estados Unidos, seguido de un 6 por ciento a Canadá. El resto se comercializó en los mercados nacionales.

Según el Servicio de Comercialización Agrícola (AMS, por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), en 2013 las importaciones de pimiento mexicano totalizaron 355 mil toneladas, cantidad que representó el 74 por ciento del total de las importaciones de pimiento realizadas por Estados Unidos y el 98 por ciento de las exportaciones de pimiento de México.

Análogamente, el pimiento que también es una solanácea, es el segundo cultivo que se expande en el país, aunque la diversificación obligada de cultivos, empieza a reducir ese porcentaje.

Cuadro 1.62. Producción agrícola de Morrón en México, en 2014 (SIAP, 2017)

Tipo / Variedad	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Chile verde morrón (bell pepper) invernadero	1,053.54	119,137.61	113.08	13,600.10	1,620,283.23
Chile verde morrón (bell pepper) invernadero exportación	22.00	2,383.80	108.35	7,016.76	16,726.54
Chile verde morrón (bell pepper) macro túnel	7.00	504.00	72.00	7,300.00	3,679.20
Chile verde morrón (bell pepper) malla sombra	1,778.58	157,447.71	88.52	6,658.71	1,048,398.73
Chile verde morrón (bell pepper) malla sombra exportación	1,088.00	67,200.20	61.76	9,411.65	632,464.65
Chile verde morrón (bell pepper) malla sombra orgánico exportación	4.50	425.53	94.56	10,374.25	4,414.56
Chile verde morrón (bell pepper) orgánico	124.44	4,698.14	37.75	8,851.31	41,584.68

### 1.9. Caracterización de la agricultura protegida en 5 estados de la república mexicana (Estados de México, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí y Sinaloa)

A pesar de que en México no se nota una real expansión por región o área específica, estadísticamente hay estados que muestran una estabilidad en cuanto a la superficie operativa que manejan y esta se mantiene funcional y en la mayoría de estos casos, en incremento.

De acuerdo a los datos del SIAP 2015, los estados con mayor superficie cultivada son Sinaloa, Jalisco y Estado de México (**Cuadro 1.63**). Y los estados con un crecimiento mayor de superficie establecida son Estado de México y Michoacán con un aumento mayor al 500% (**Figura 1.29**).

Cuadro 1.63. Evolución de la superficie de agricultura protegida

Estado	Superficie 2008	Superficie 2014	Diferencias (ha)	Diferencias (%)
Estado de México	100.00	1,517.39	1,417.39	1,417.39
Michoacán	140.00	1,004.06	864.06	617.19
Jalisco	900.00	3,310.09	2,410.09	267.79
San Luis Potosí	460.00	901.41	441.41	95.96
Sinaloa	2,500.00	4,744.22	2,244.22	89.77

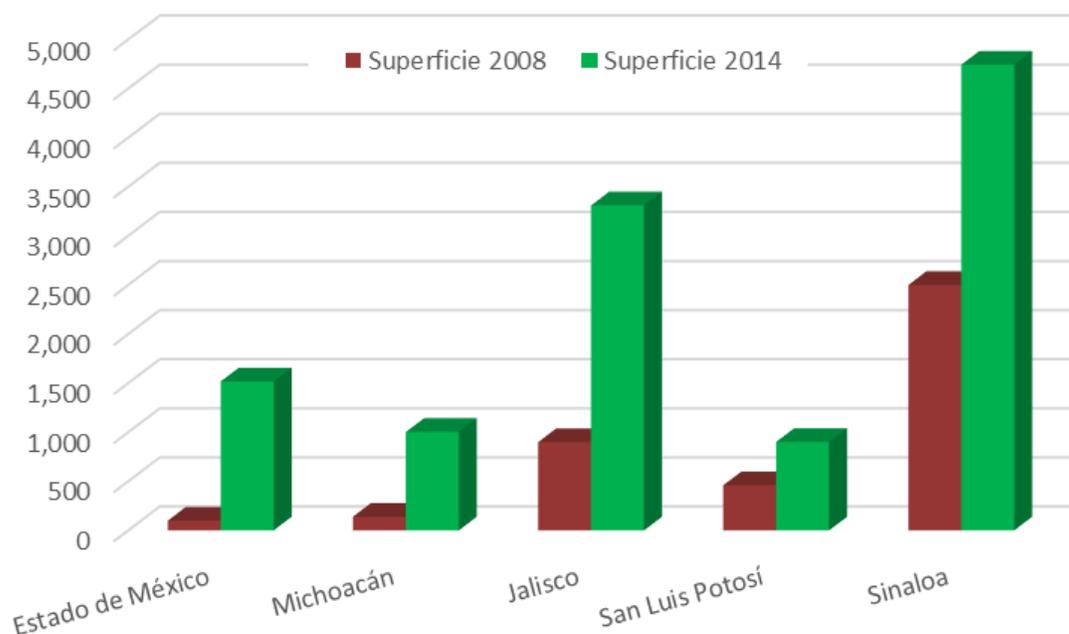


Figura 1.29. Evolución de la superficie de agricultura protegida

Los estados con mayor superficie de AP son: Sinaloa con un 20.2 % seguido por Jalisco con un 14.1 % y baja California con un 11.5 % (**Cuadro 1.64**).

Cuadro 1.64. Estados con mayor superficie de horticultura protegida en el 2014

Estado	Superficie (ha)	Porcentaje del total
Sinaloa	4,744.221	20.2%
Jalisco	3,310.091	14.1%
Baja California	2,689.914	11.5%
México	1,517.391	6.5%
Chihuahua	1,497.742	6.4%
Sonora	1,196.434	5.1%
Puebla	1,071.249	4.6%
Michoacán	1,004.059	4.3%
San Luis Potosí	901.413	3.8%

La **Figura 1.30** esquematiza la distribución de la superficie en el país, con los principales estados productores de cultivos, bajo el sistema en ambientes protegidos.

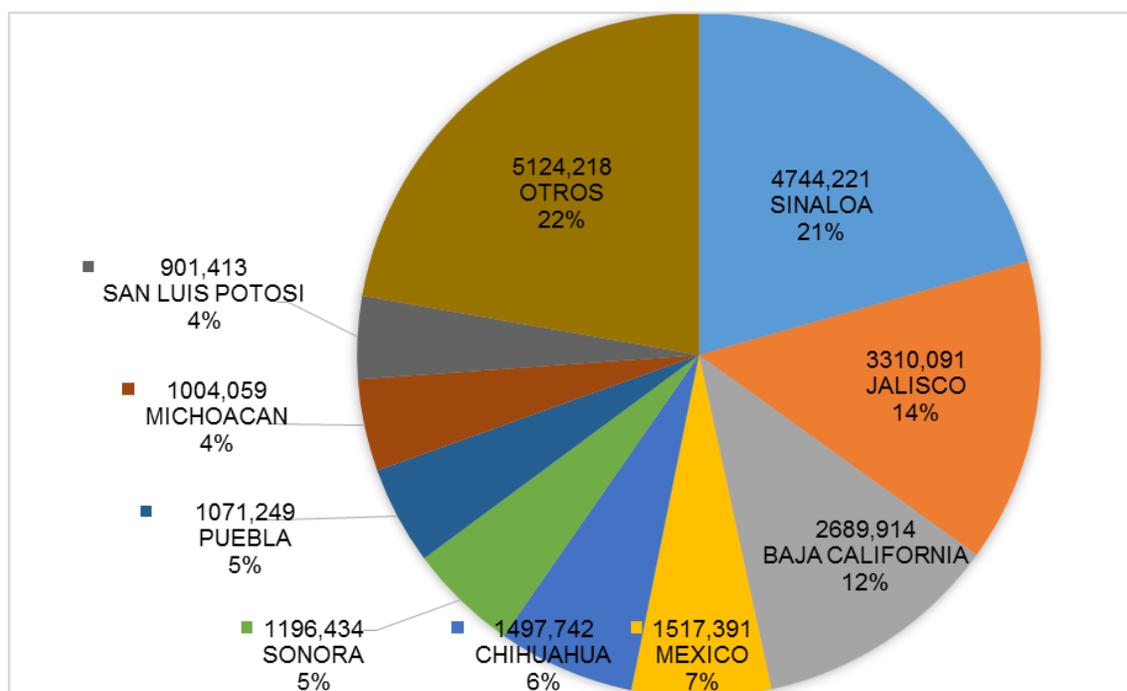


Figura 1.30. Distribución de la superficie con AP de México.

Los municipios con mayor superficie activa, son: Ensenada con 2,605.77 ha casi el total del estado, seguido por Jocotepec, Jalisco con 1,130.2 hectáreas muy similar al de Culiacán, Sinaloa con 1,110.28 ha (**Cuadro 1.65 y Figura 1.27**).

Cuadro 1.65. Superficie de horticultura protegida del 2014 por Municipio (Fuente: SIAP, 2015)

Municipio	Superficie Activa (ha)	Superficie Inactiva (ha)	Total (ha)
Ensenada, BC.	2,605.77		2,605.77
Jocotepec, Jal.	1,130.20	11.20	1,141.41
Culiacan, Sin.	1,110.28	51.94	1,162.22
Cuauhtemoc, Chih.	848.09	35.15	883.24
Zapotiltic, Jal.	441.84	1.67	443.50
Navolato, Sin.	388.95	236.54	2,754.37
Cajeme, Son.	382.36	38.02	420.37
Mulege, BCS.	377.45	31.91	409.36
Guasave, Sin.	365.80	65.91	431.71
Guerrero, Chih.	330.02	7.36	337.38
Tenancingo, EdoMex	322.07	39.68	361.74

Esquemáticamente se aprecia en la **Figura 1.31** la representatividad por municipio; aun cuando comparten el mismo orden en cuanto estados, resaltan otros con menor superficie.

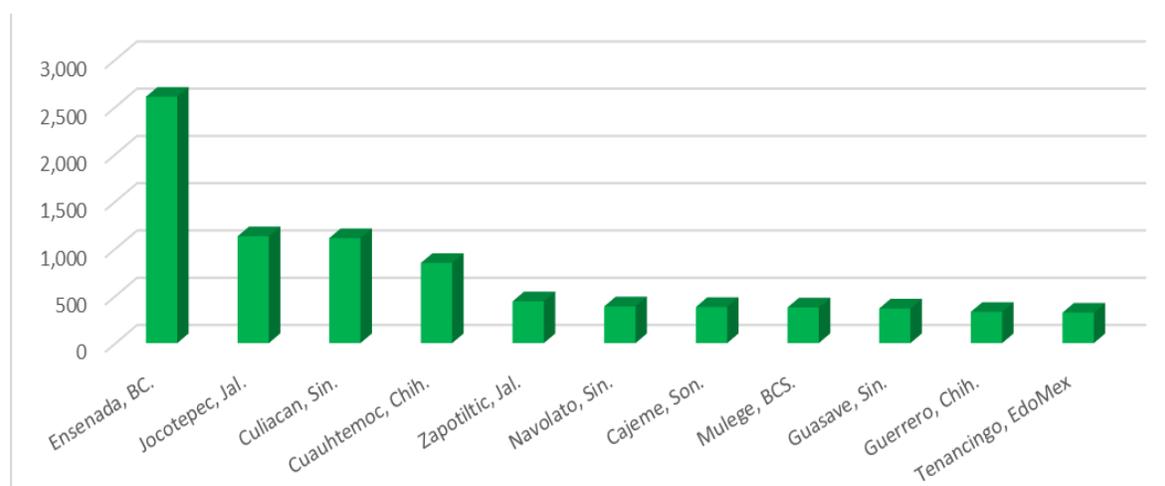


Figura 1.31. Superficie de horticultura protegida en México por municipio.

### 1.9.1. Principales características productivas del Estado de México

El estado de México es el estado con mayor tradición en el cultivo en ambientes controlados; A pesar de su localización geográfica en el centro del país, presenta regiones donde las condiciones climáticas mayormente dificultan la producción de cultivos a campo abierto.

Los orígenes datan de los años 60 y es posible encontrar tres regiones climáticamente definidas, siendo la más representativa la parte colindante con Michoacán y Guerrero donde predomina por mucho el cultivo de flores.

No obstante, la evolución de esta técnica, derivó en la ampliación de cultivos y actualmente es posible encontrar instalaciones que dedican su espacio al cultivo de hortalizas y tal como se ha constatado, el cultivo de jitomate al oriente del mismo. El cuadro 1.39 ejemplifica las instalaciones del tipo de estructura que predomina.

En el año 2014 el Estado de México tenía instalado 100 hectáreas de jitomate con AP, de las cuales la estructura más utilizada es el invernadero, seguido del Macro túnel con 3.88 hectáreas (**Cuadro 1.66**).

Cuadro 1.66. Superficie de AP para cultivo de jitomate en el Estado de México año 2014.

Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)	Número de Instalaciones
Invernadero	96.47	864
Macro túnel	3.881	182
Micro túnel	0.936	13
Pabellón	0.02	1
Techo sombra	0.157	4
Vivero	0.05	1

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.

Los principales municipios con superficie de AP son: Villa Guerrero, Tenancingo, Coatepec Harinas y Atlacomulco. La principal estructura utilizada en estos municipios es el invernadero, seguido por el micro túnel, por el número de unidades utilizadas (**Figura 1.32**).

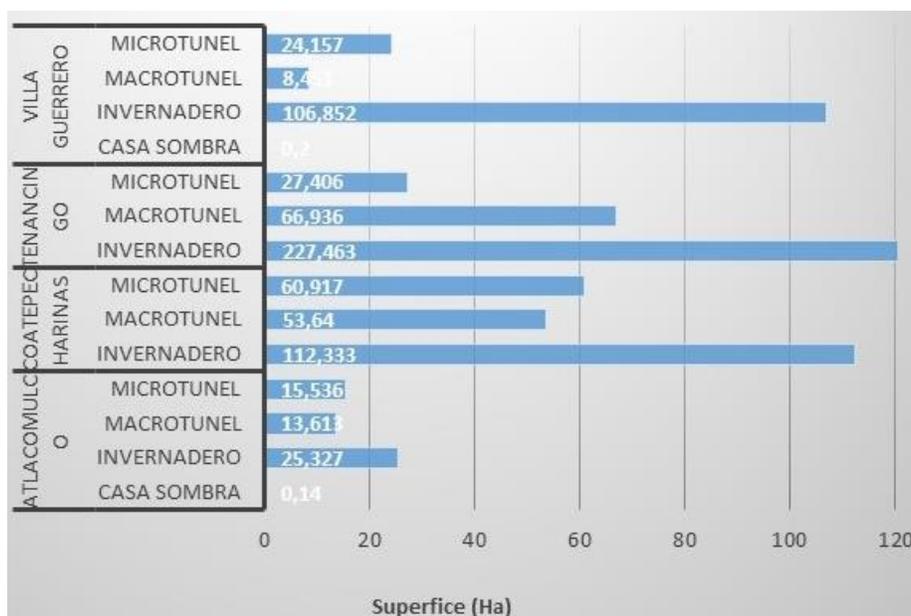


Figura 1.32. Tipos de estructura más utilizada en los municipios

El **Cuadro 1.67** se presentan la superficie por cultivo por tipo de instalación. La tabla indica que, en la actualidad, el Estado de México ha diversificado el uso de la agricultura protegida; no obstante, predomina la producción de especies ornamentales, ya sea en pie o en corte.

De los cultivos hortícolas que se encuentran, resalta la producción de berries aunque en una superficie aun reducida. Y como se ha mencionado, el común denominador en el País y en el Mundo, el jitomate y el pimiento siguen siendo las especies principalmente cultivadas en invernaderos.

Cuadro 1.67. Cultivos desarrollados por tipo de instalación

Cultivo	Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)
Alcatraz	Macro túnel	0,02
Chile Manzano	Invernadero	9,53
Chile Manzano	Macro túnel	1,96
Chile Manzano	Microtunel	0,22
Chile Morrón	Invernadero	0,21
Chile Morrón	Macro túnel	0,032
Clavel	Invernadero	7,348
Clavel	Macro túnel	44,671
Clavel	Microtunel	35,723
Crisantemo	Invernadero	33,198
Crisantemo	Macro túnel	30,49
Crisantemo	Microtunel	34,696
Dalia	Invernadero	0,156

Cultivo	Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)
Fresa	Invernadero	2,731
Fresa	Macro túnel	0,553
Fresa	Microtúnel	0,25
Fresa	Techo sombra	0,015
Gerbera	Invernadero	15,244
Gerbera	Macro túnel	1,82
Gerbera	Microtúnel	0,25
Hongos	Invernadero	0,033
Hortencia (Planta)	Invernadero	0,25
Lilis	Invernadero	4,49
Lilis	Macro túnel	5,267
Lilis	Microtúnel	2,05
Pepino	Invernadero	3,45
Pepino	Macro túnel	0,051
Plantas de Ornato	Casa sombra	0,08
Plantas de Ornato	Invernadero	76,491
Plantas de Ornato	Macro túnel	4,091
Plantas de Ornato	Microtúnel	0,74
Plantas de Ornato	Techo sombra	0,213
Plantas de Ornato	Vivero	0,573
Rosa	Invernadero	159,738
Rosa	Macro túnel	15,25
Rosa	Microtúnel	6,524
Tomate Rojo (Jitomate)	Invernadero	96,47
Tomate Rojo (Jitomate)	Macro túnel	3,881
Tomate Rojo (Jitomate)	Microtúnel	0,936
Tomate Rojo (Jitomate)	Pabellón	0,02
Tomate Rojo (Jitomate)	Techo sombra	0,157
Tomate Rojo (Jitomate)	Vivero	0,05

### 1.9.2. Principales características productivas de Jalisco

Jalisco es uno de los estados con mayor despunte en agricultura protegida de mediana y baja tecnología. Como ya se mencionó, existen consorcios con cultivos de exportación y grandes superficies, pero de manera nacional, son los pequeño y mediano productores el sector más vulnerable.

El jitomate sigue siendo el cultivo de mayor producción en el estado, no obstante, los berries, tales como fresa, zarzamora y frambuesa son cultivos que empiezan a ser representativos. El **Cuadro 1.68** muestra la distribución de los cultivos más representativos y el tipo de estructura en la que se cultiva.

Cuadro 1.68. Cultivos por tipo de instalación del estado de Jalisco

Cultivo	Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)
Chile Morrón	Casa sombra	5,04
Chile Morrón	Invernadero	151,902
Chile Morrón	Macro túnel	0,075
Crisantemo	Invernadero	0,64
Crisantemo	Macro túnel	0,04
Fresa	Invernadero	0,207
Fresa	Macro túnel	258,554
Fresa	Micro túnel	4
Gerbera	Invernadero	2,266
Lechuga	Invernadero	2,039
Papaya	Macro túnel	0,075
Pepino	Casa sombra	3,93
Pepino	Invernadero	5,876
Pepino	Macro túnel	0,75
Plantas de Ornato	Casa sombra	0,03
Plantas de Ornato	Invernadero	0,602
Plantas de Ornato	Macro túnel	0,059
Plantas de Ornato	Techo sombra	0,05
Rosa	Invernadero	7,994
Tomate Rojo (Jitomate)	Casa sombra	16,648
Tomate Rojo (Jitomate)	Invernadero	558,98
Tomate Rojo (Jitomate)	Macro túnel	0,271

Tlajomulco es uno de los municipios con mayor superficie dedicada al cultivo en ambientes protegidos y semiprottegidos como es el caso de los micro y macro túneles. En el estado de Jalisco los municipios más importantes por superficie cultivada son: Zapopan en Grande de Ciudad Guzmán, Zapotiltic, Tuxpan y Tuxcueca (Figura 1.33).

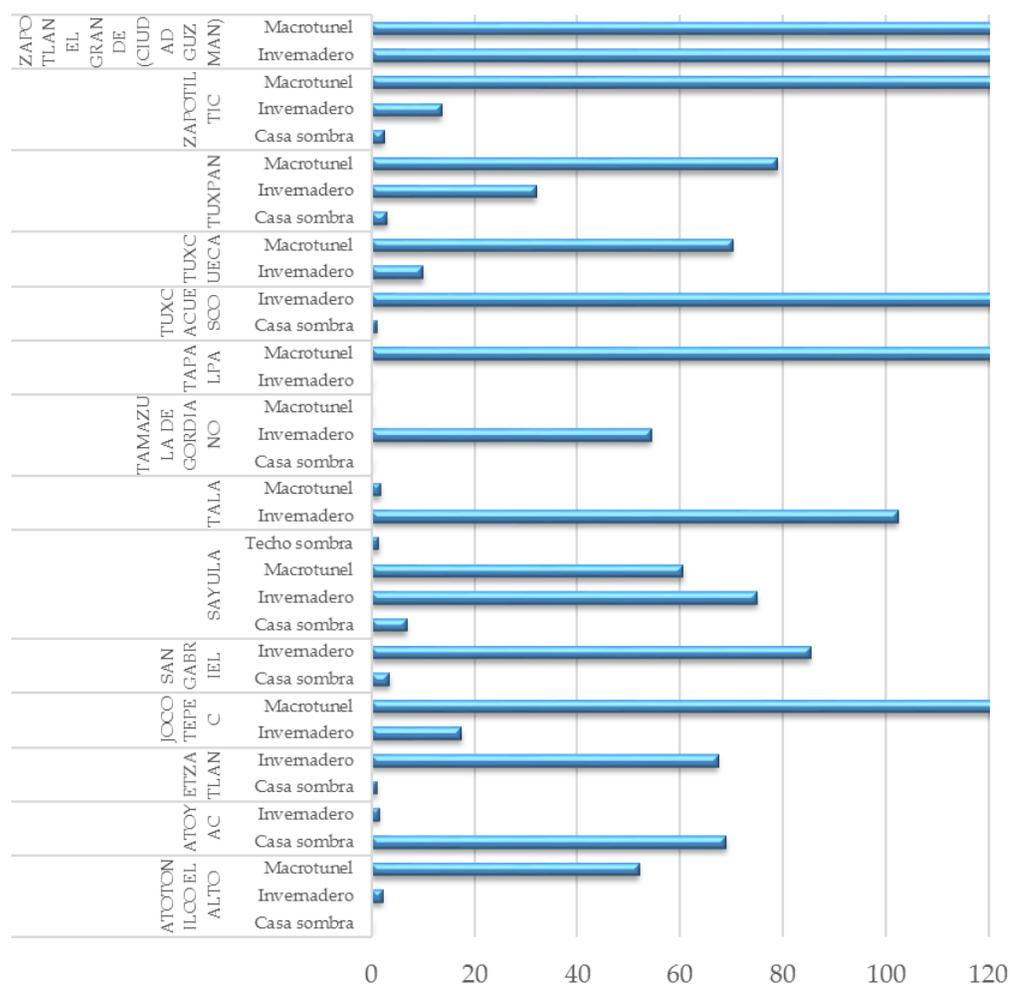


Figura 1.33. Tipo de instalación por municipios más importantes

Cuadro 1.69. Tipo de instalación de Jalisco

Tipo Estructura	Superficie cosechada (Ha)
Casa sombra	25.65
Invernadero	730.51
Macro túnel	259.82
Micro túnel	4.00
Techo sombra	0.05

<b>Total general</b>	<b>1,020.03</b>
----------------------	-----------------

Los cultivos más importantes por superficie fueron: jitomate con 575.90 ha, Fresa con 262.76 ha y chile morrón con 157.02 ha (**Cuadro 1.70**)

Cuadro 1.70. Cultivos en el estado de Jalisco

Cultivo	Superficie cosechada (Ha)
Tomate Rojo (Jitomate)	575.90
Fresa	262.76
Chile Morrón	157.02
Pepino	10.56
Rosa	7.99
Gerbera	2.27
Lechuga	2.04
Plantas de Ornato	0.74
Crisantemo	0.68
Papaya	0.08
<b>Total general</b>	<b>1,020.03</b>

Motivado en parte por las buenas condiciones medioambientales y con el fin de abaratar costos, los macro túneles son estructuras sencillas que han dado buenos resultados en la producción de algunos cultivos (**Figura 1.34**).



Figura 1.34. Invernadero tipo Macro túnel del estado de Jalisco

En la **Figura 1.33** se esquematiza el despunte de la tecnología en agricultura protegida y semiprotegida; a pesar de que el invernadero convencional como normalmente se conoce es la estructura que predomina en superficie, el macro túnel compite dignamente en este rubro y a diferencia de Sinaloa o San Luis Potosí, la malla sombra queda más rezagada, en parte por el tipo de cultivo, pero sobre todo por las condiciones medioambientales.

Otro rasgo que destaca es la amplitud en el estado donde se tiene el sistema de producción protegido; a diferencia de otros estados donde se focaliza en una zona, en Jalisco son más bien varios los municipios que han estacado en su agricultura, siendo Ciudad Guzmán y Tuxcacuexco dos de los municipios que reporta mayor superficie y mayor variedad en los tipos de estructura

### 1.9.3. Principales características productivas de Michoacán

El estado de Michoacán a pesar de la superficie importante a nivel nacional que reporta, también es cierto que este tipo de sistema de producción compite por un lugar con el Cultivo del Aguacate en las zonas templadas y cítricos en las más cálidas.

El Jitomate es el cultivo predominante, no obstante, otros cultivos como la flor y las frutillas tienen significancia; otro de los cultivos que se produce en el estado es la zarzamora, sin embargo y a pesar de que en un tiempo se intentó cultivarla en invernadero, los resultados fueron mejores a campo abierto por lo que ha quedado más para el estado de Jalisco en macro túneles (**Cuadro 1.71**).

Cuadro 1.71. Principales cultivos por tipo de instalación del estado de Michoacán el año 2014 (SIAP, 2017)

Cultivo	Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)
AGUACATE	Invernadero	0,024
CHILE MORRÓN	Casa sombra	4
CHILE MORRÓN	Invernadero	4,9
CHILE MORRÓN	Macro túnel	1
NOCHE BUENA	Invernadero	51,883
NOCHE BUENA	Macro túnel	0,825
TOMATE ROJO (JITOMATE)	Invernadero	157,509
TOMATE ROJO (JITOMATE)	Macro túnel	5,19
TOMATE ROJO (JITOMATE)	Vivero	0,638
ZARZAMORA	Invernadero	0,102
ZARZAMORA	Macro túnel	9

El **cuadro 1.71** muestra que en 2004 del total de la producción agrícola en ambientes protegidos 158 ha fueron en invernadero, siendo significativamente menor el resto de las especies, como fue la noche buena con 52 ha.

Los principales municipios por superficie de AP establecida son: Zitácuaro, Zamora, Yurécuaro, Jacona y Chavinda. En este estado únicamente Zitácuaro y Yurécuaro tienen dominancia los invernaderos. En los demás municipios domina el Macro túnel (**Figura 1.30**).

Zamora presenta más de 10 ha de cultivos en macro túnele, sin embargo, toda esa superficie no llega a ser representativa por municipio, comparada con el jitomate a nivel estatal.

Las **Figuras 1.35** y **1.36** muestran la distribución de estructuras por tipo en algunos de los municipios representativos, y el tipo de estructura predominante que es el invernadero tipo cenital con baja tecnología, solo sistema de riego y ventilación natural con ventanas cenitales y laterales.

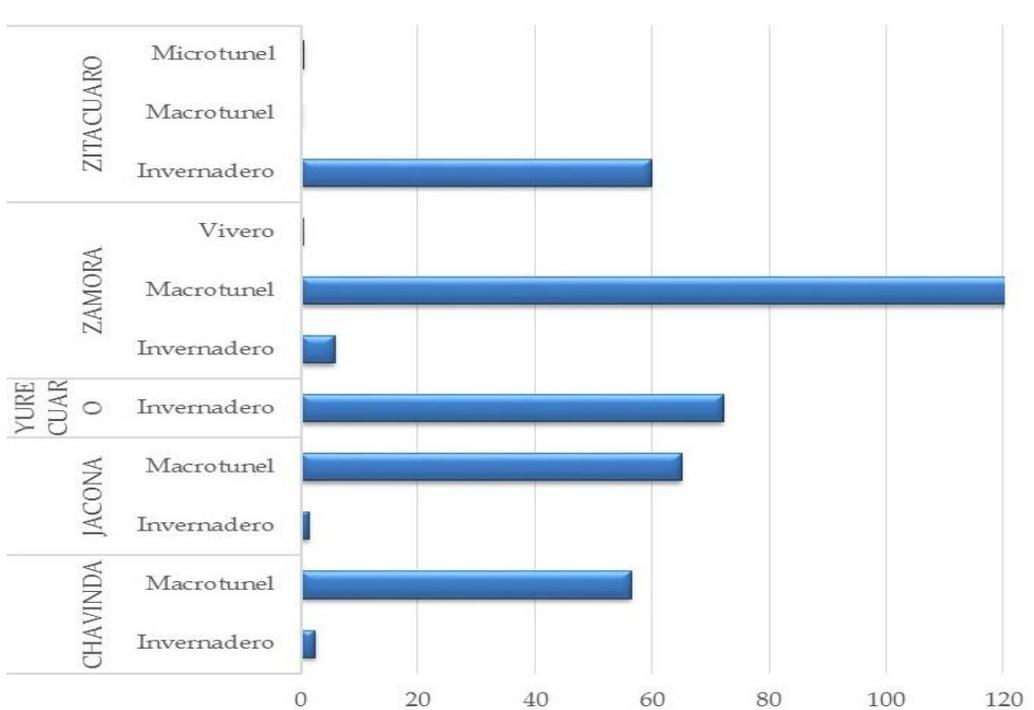


Figura 1.35. Distribución de la superficie por tipo de Instalación en Michoacán (SIAP, 2017)



Figura 1.36. Invernadero tipo cenital para la producción hortícola en Michoacán.

#### 1.9.4. Principales características productivas de San Luis Potosí

Al igual que Sinaloa, San Luis Potosí es otro de los estados que más ha incrementado la superficie dedicada al cultivo protegido, para situarse en un 6º o 7º lugar a nivel nacional. El cultivo del jitomate es el que predomina, pero también ha sido significativo el morrón e malasombra.

El **Cuadro 1.72** muestra la superficie dedicada el cultivo por tipo de estructura, con datos reportados al 2014. En san Luis potosí domina la estructura Casa o Malla Sombra en la AP con 329.74 hectáreas en 101 instalaciones, le sigue el Invernadero con 209 instalaciones en 137.07 hectáreas.

Cuadro 1.72. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en San Luis potosí para el año 2014.

Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)	Núm. de Instalaciones
Casa sombra	329.738	101
Invernadero	137.066	209
Macro túnel	7.12	15
Micro túnel	0.037	2
Techo sombra	5	1

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.

El invernadero tipo cenital es que principalmente se usa en la producción hortícola. Siendo en ocasiones necesario contar con un sistema de calefacción emergente basado en combustión para específicos periodos del invierno en específicas periodos de la mañana, antes de salir el sol.

En las regiones menos templadas el sistema de ventilación natural es suficiente para evacuar las altas temperaturas que se generan durante las horas de mayor insolación, tal como se muestra en la **Figura 1.37**.



Figura 1.37. Invernadero tipo baticenital con cosecha de lluvia para la producción hortícola en San Luis Potosí.

En el **Cuadro 1.73** se presentan los principales municipios con superficie de AP por tipo de estructura dominante.

Cuadro 1.73. Tipo de invernadero por municipio más importante de SLP

Superficie cubierta (Ha)	Activo	Total general
<b>CEDRAL</b>	<b>94,233</b>	<b>94,233</b>
Casa sombra	53,1	53,1
Invernadero	37,12	37,12
Macro túnel	4,013	4,013
<b>GUADALCAZAR</b>	<b>59,935</b>	<b>59,935</b>
Casa sombra	27	27
Invernadero	32,935	32,935
<b>MOCTEZUMA</b>	<b>84,273</b>	<b>84,273</b>
Casa sombra	55,25	55,25
Invernadero	17,933	17,933

Superficie cubierta (Ha)	Activo	Total general
Macro túnel	10,97	10,97
Microtúnel	0,12	0,12
<b>RIO VERDE</b>	<b>50,021</b>	<b>50,021</b>
Casa sombra	3,95	3,95
Invernadero	42,231	42,231
Macro túnel	3	3
Microtúnel	0,84	0,84
<b>SAN LUIS POTOSÍ</b>	<b>58,043</b>	<b>58,043</b>
Casa sombra	37,286	37,286
Invernadero	19,685	19,685
Macro túnel	1	1
Microtúnel	0,072	0,072
<b>VANEGAS</b>	<b>109,03</b>	<b>109,03</b>
Invernadero	109,03	109,03
<b>VILLA DE ARISTA</b>	<b>117,631</b>	<b>117,631</b>
Casa sombra	88,388	88,388
Invernadero	21,183	21,183
Macro túnel	4	4
Microtúnel	4	4
Techo sombra	0,06	0,06
<b>VILLA DE GUADALUPE</b>	<b>118,345</b>	<b>118,345</b>
Casa sombra	112,57	112,57
Invernadero	4,385	4,385
Macro túnel	1	1
Microtúnel	0,39	0,39
<b>Total general</b>	<b>691,511</b>	<b>691,511</b>

Los principales cultivos en el estado son Chile Morrón y Jitomate (**Cuadro 1.74**).

Cuadro 1.74. Superficie de agricultura protegida para el Estado de San Luis Potosí.

Cultivo	Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)	Instalaciones
Chile Morrón	Casa sombra	0,25	1
Chile Morrón	Invernadero	21,046	14
Tomate Rojo (Jitomate)	Casa sombra	329,738	101
Tomate Rojo (Jitomate)	Invernadero	137,066	209
Tomate Rojo (Jitomate)	Macro túnel	7,12	15
Tomate Rojo (Jitomate)	Micro túnel	0,037	2
Tomate Rojo (Jitomate)	Techo sombra	5	1

En la **Figura 1.38** se muestra que los municipios con mayor superficie con agricultura protegida son: Villa de Arista con Casa Sombra, Villa de Guadalupe con casa sombra y Vanegas con Invernadero.

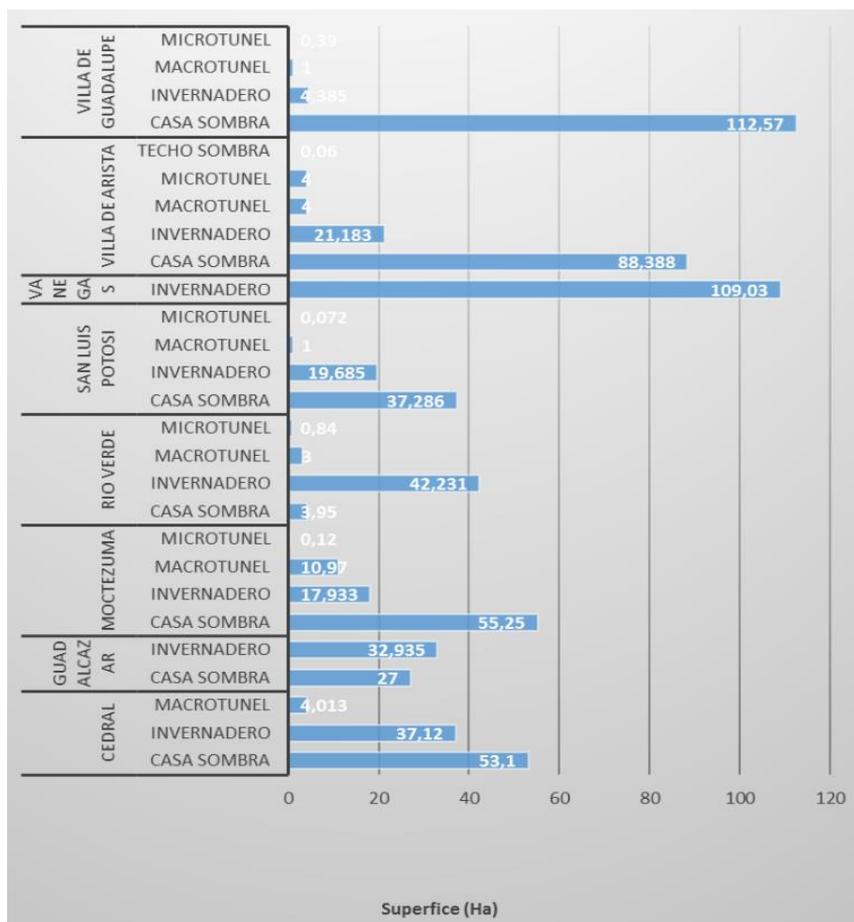


Figura 1.38. Distribución de la superficie dedicada la producción de cultivos por tipo de estructura en San Luis Potosí (SIAP, 2017)

#### 1.9.5. Principales características productivas de Sinaloa

El principal cultivo en el estado de Sinaloa es el jitomate, que se produce generalmente en Casa Sombra (**Figura 1.39**), seguido por los invernaderos y en algunas parcelas se utiliza el Techo Sombra y el Micro túnel (**Cuadro 1.75**).

Cuadro 1.75. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en el Estado de Sinaloa para el año 2014.

Superficie cubierta (Ha)	Activo	Total general
<b>AHOME</b>	<b>107,221</b>	<b>107,221</b>
Casa sombra	101,5	101,5
Invernadero	5,721	5,721
<b>CULIACÁN</b>	<b>1110,277</b>	<b>1110,277</b>
Casa sombra	678,88	678,88
Invernadero	431,397	431,397
<b>ELOTE</b>	<b>142,078</b>	<b>142,078</b>
Casa sombra	86,796	86,796
Invernadero	55,282	55,282
<b>GUASAVE</b>	<b>365,802</b>	<b>365,802</b>
Casa sombra	208,915	208,915
Invernadero	154,727	154,727
Techo sombra	2,16	2,16
<b>NAVALITO</b>	<b>388,946</b>	<b>388,946</b>
Casa sombra	349	349
Invernadero	39,896	39,896
Microtunel	0,05	0,05
<b>Total general</b>	<b>2114,324</b>	<b>2114,324</b>



Figura 1.39. Invernadero de Malla en multicapilla para producir pimiento morron en el Municipio de Culiacan Sinaloa.

Los principales municipios con agricultura protegida son: Navolato, Guasave, Elota, Culiacán y Ahome. De estos los más importantes son Culiacán y Guasave (Figura 1.40)

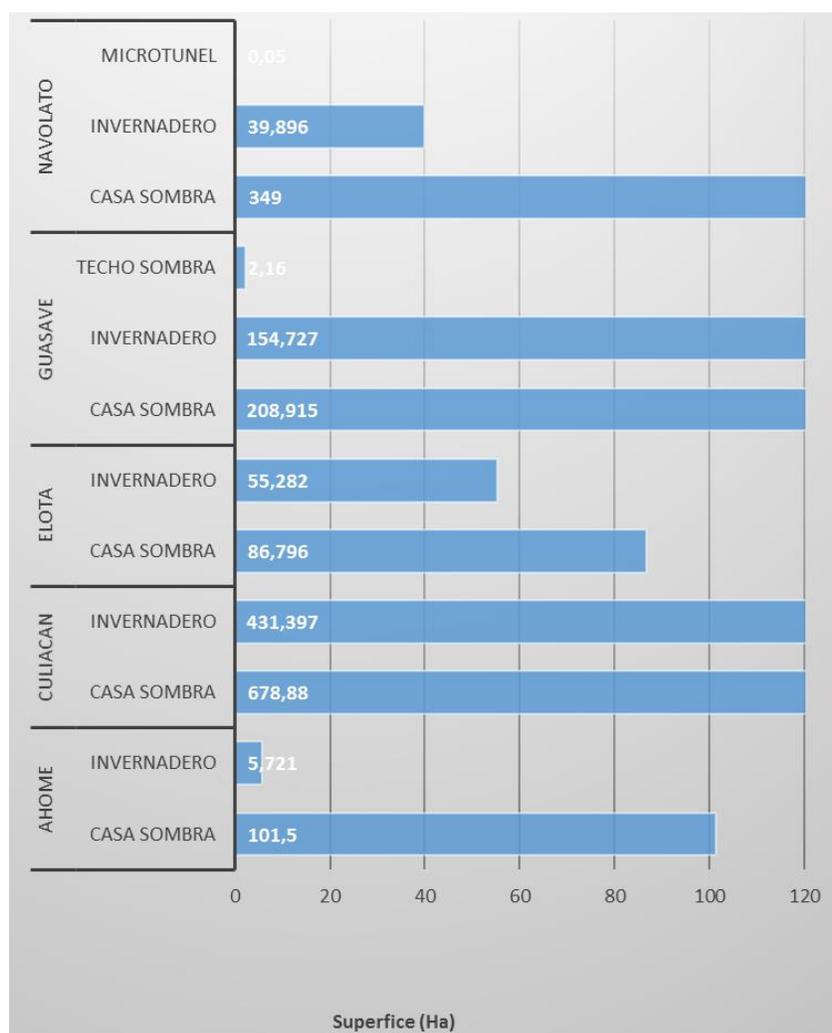


Figura 1.40. Distribución de superficie dedicada al cultivo protegido en Sinaloa por tipo (SIAP, 2017)

Cuadro 1.76. Superficie de agricultura protegida en Sinaloa.

Cultivo	Tipo de instalación	Superficie cosechada (Ha)	Instalaciones
Chile Morrón	Casa sombra	310,89	52
Chile Morrón	Invernadero	222,244	88
Tomate Rojo (Jitomate)	Casa sombra	559,053	97
Tomate Rojo (Jitomate)	Invernadero	166,919	180
Tomate Rojo (Jitomate)	Vivero	0,83	1

## 2. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

### 2.1. Procesamiento de información para establecer indicadores

La información de precipitación y temperatura obtenida de las series climáticas fue procesada con el fin de establecer indicadores para la caracterización del clima de México y de este modo hacer una relación con la producción de cultivos en invernadero.

#### 2.1.1. Precipitación

##### 2.1.1.1. Duración del periodo de lluvias

Para esta identificación se utiliza el criterio hidrológico que considera como inicio de la temporada, la fecha de la primera lluvia que genera escurrimiento. De acuerdo con (Íñiguez-Covarrubias, Ojeda-Bustamante, Díaz-Delgado, & Sifuentes-Ibarra, 2014; Ojeda, Iñiguez, Sifuentes, Ontiveros, & López, 2012) puede emplearse el método ID4F15 para la determinación de las fechas de inicio y terminación de lluvias, así como la duración de la temporada.

En el método ID4F15 (inicio días 04 final 15) el inicio de la estación se define cuando la precipitación acumulada en 4 días consecutivos es mayor que 20 mm y la terminación del periodo de lluvias ocurre cuando la precipitación acumulada después de 15 días consecutivos es menor a 20 mm.

Mediante la aplicación del método ID4F15 se determinaron las fechas de inicio y final de la temporada de lluvias para después calcular la duración del periodo de lluvias en las zonas de las estaciones climatológicas. El **Cuadro 2.1** muestra la duración del periodo de lluvias en una estación climatológica en el estado de San Luis Potosí. Se observa que la duración del periodo va desde 150 días hasta 250 días. En algunos años el periodo de lluvias se adelanta y en otros se atrasa. La duración promedio del periodo de lluvias obtenido con los datos recabados es de 139 días en la República Mexicana.

Cuadro 2.1. Periodo de lluvias durante el periodo 1981-2010 en la estación Altamira, San Luis Potosí.

Año		Periodo de la temporada de lluvias				Duración del periodo
		Inicio		Final		
		Día	Mes	Día	Mes	Días
1	1982	24	Abril	01	Noviembre	192
2	1988	04	Febrero	13	Octubre	252
3	1989	29	Enero	22	Septiembre	237
4	1991	18	Mayo	26	Diciembre	223
5	1994	15	Abril	17	Diciembre	247
6	1995	9	Junio	06	Octubre	120
7	1996	13	Mayo	12	Noviembre	184
8	1997	23	Marzo	18	Noviembre	241
9	1998	29	Junio	01	Diciembre	156

Año		Periodo de la temporada de lluvias				Duración del periodo
		Inicio		Final		
		Día	Mes	Día	Mes	Días
10	1999	16	Junio	27	Diciembre	195
11	2000	27	Abril	06	Diciembre	224
12	2002	01	Julio	06	Diciembre	159
13	2003	25	Junio	18	Octubre	116
14	2004	29	Marzo	16	Octubre	202
15	2005	14	Junio	30	Octubre	139
16	2006	18	Agosto	22	Diciembre	127
17	2007	17	Junio	30	Noviembre	167
18	2008	27	Abril	09	Noviembre	197
19	2009	21	Junio	21	Diciembre	184
20	2010	27	Enero	06	Octubre	253

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, periodo 1981-2010.

La temporada de lluvias es también conocida como periodo de lluvias o época de lluvias. Existen varios métodos para la determinación de la época de lluvias, entre las que destacan la técnica de las sumas acumuladas de las perturbaciones; el método de las pentadas y el método ID4F15 (Iñiguez, 2014).

El **Cuadro 2.2** muestra la temporada de lluvias determinada por el método ID4F15, que fue el empleado en este informe. En este caso se analiza la duración de la temporada de lluvias para una estación.

Cuadro 2.2. Temporada de lluvias en 24 años para la estación Acambay, Estado de México.

Año		Periodo de la temporada de lluvias				Duración del periodo
		Inicio		Final		
		Día	Mes	Día	Mes	Días
1	20	Junio	10	Octubre	113	
2	18	Junio	4	Noviembre	140	
3	4	Mayo	3	Diciembre	214	
4	27	Abril	14	Noviembre	202	
5	27	Abril	16	Octubre	173	
6	9	Junio	10	Octubre	124	
7	25	Junio	28	Septiembre	96	
8	13	Mayo	11	Octubre	152	
9	2	Junio	7	Octubre	128	
10	16	Junio	6	Diciembre	174	
11	27	Mayo	12	Octubre	139	
12	4	Mayo	9	Septiembre	129	

Año	Periodo de la temporada de lluvias				Duración del periodo
	Inicio		Final		
	Día	Mes	Día	Mes	Días
13	26	Junio	17	Septiembre	84
14	8	Mayo	13	Octubre	159
15	11	Mayo	1	Noviembre	175
16	9	Junio	13	Octubre	127
17	12	Mayo	16	Septiembre	128
18	6	Junio	30	Septiembre	117
19	8	Junio	6	Diciembre	182
20	19	Mayo	3	Diciembre	199

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, periodo 1981-2010.

En gran parte de la República Mexicana, el periodo de lluvias ocurre entre los meses de mayo a octubre, teniendo una duración aproximada de 150 días. Según el Servicio Meteorológico Nacional (2016) en el verano ocurre una disminución de la lluvia entre los meses de julio y agosto, a la cual se le conoce como canícula o sequía de medio verano.

#### 2.1.1.2. *Días secos (precipitación menor a 1 mm diario)*

La determinación de los periodos con días secos es útil para entender mejor el comportamiento de la precipitación. En este caso se consideran como días secos aquellos cuya precipitación es menor a 1 mm. La determinación de periodos secos se realizó para cada año del periodo de 24 años. Se consideraron como periodos consecutivos con días secos, aquellos que contenían más de 6 días consecutivos con precipitaciones menores a 1 mm. El **Cuadro 2.3** muestra la duración de los periodos secos en un año determinado.

Cuadro 2.3. Días secos para la estación Altamira, San Luis Potosí.

Año	Número de días secos totales	
1	1982	268
2	1988	274
3	1989	292
4	1991	271
5	1994	272
6	1995	284
7	1996	296
8	1997	281
9	1998	264
10	1999	291

Año		Número de días secos totales
11	2000	288
12	2002	290
13	2003	289
14	2004	277
15	2005	281
16	2006	303
17	2007	280
18	2008	277
19	2009	293
20	2010	273

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, periodo 1981-2010.

#### 2.1.1.3. Precipitaciones por arriba de los 6 mm

Las precipitaciones mayores a 6 mm diarios están relacionadas con la precipitación efectiva. La precipitación efectiva es una fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas. Depende de varios factores como la intensidad de la precipitación, la humedad del suelo, inclinación, etc. Se considera que las lluvias menores a 5 mm no añaden humedad a la reserva del suelo, por lo que una precipitación menos a 5 mm se considera no efectiva. En el **Cuadro 2.4** se muestra el número de días en los que la precipitación fue mayor a 6 mm en el periodo 1981-2010 para una estación climatológica.

Cuadro 2.4. Precipitación por arriba de los 6 mm en la estación Altamira, San Luis Potosí.

Año		Número de días con precipitación mayor a 6 mm	Año		Número de días con precipitación mayor a 6 mm
1	1982	62	11	2000	42
2	1988	46	12	2002	45
3	1989	38	13	2003	58
4	1991	58	14	2004	47
5	1994	55	15	2005	51
6	1995	53	16	2006	46
7	1996	44	17	2007	57
8	1997	46	18	2008	60
9	1998	58	19	2009	50
10	1999	42	20	2010	61

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, periodo 1981-2010.

La inclinación del terreno, el contenido de humedad del suelo y la velocidad de infiltración son factores que también están involucrados con la precipitación efectiva. (Brouwer & Heibloem, 1986) proponen las siguientes fórmulas para su aplicación en áreas con pendientes inferiores al 5% en función de la precipitación de un mes:

$$Pe = 0.8 P - 25 \text{ Si: } P > 75 \text{ mm/mes}$$

$$Pe = 0.6 P - 10 \text{ Si: } P < 75 \text{ mm/mes}$$

Donde: P = precipitación mensual (mm/mes) y Pe = precipitación efectiva (mm/mes).

Se considera que solamente un 75 % de la lluvia sobre los 5 mm puede considerarse efectiva. Para tal caso se emplea la siguiente expresión:

$$Pe = 0.75 * (\text{lluvia caída} - 5 \text{ mm})$$

La precipitación efectiva en climas húmedos o periodos del año en los que llueve sin interrupción durante varios días se obtiene sumando todos los volúmenes de precipitación, excepto cuando en un día llueve menos de 3 mm.

### 2.1.2. Temperatura

La temperatura ambiental es el parámetro climático más utilizado en el monitoreo ambiental de un invernadero (Hanan, 1990), tal vez por la facilidad de su medición con respecto a otros factores climáticos como la radiación solar o la humedad ambiental.

La temperatura del aire en un invernadero es consecuencia del balance de energía. En un invernadero cerrado sin calefacción, es siempre superior a la temperatura exterior durante el día, acusando un desfase en su evolución respecto a la radiación solar (Seeman, Chirkov, Lomas, & Primault, 1979). Asimismo, dependerá de la orientación y tamaño del invernadero, tipo de material de cerramiento y de la geometría de la cubierta.

La evolución de la temperatura del aire en invernadero describe una curva senosoidal, en función del tiempo, cuya evolución durante el día va desfasada respecto a la radiación solar, con injerencias, al igual que el aire libre, derivadas de la transpiración (Rosenberg et al., 1983). La temperatura es un factor determinante en el desarrollo fenológico de los cultivos, cada especie vegetal tiene definido un rango óptimo, que oscila entre los 10 y 26 ° C por lo que el objetivo del manejo en un invernadero es mantener este rango de tal manera que el cultivo se encuentre en óptimas condiciones por medio de un sistema de control climático que permita optimizar las necesidades energéticas (Ojeda-Bustamante, 2004).

La planta responde de manera negativa a temperaturas fuera de su rango óptimo que afectan el desarrollo anatómico y morfológico de algunos órganos, así como algunos procesos de

asimilación y transporte necesarios para un mejor rendimiento (López et al., 2000). Si la temperatura esta por abajo del limite el riesgo de enfermedades fungosas crece, se presenta el cierre de estomas y abortos florales. Análogamente, si la temperatura excede el límite máximo se incrementa la transpiración y con ello el riesgo de deshidratación, entre otros problemas fisiológicos como el deficiente cuajado de frutos.

En general, el problema de las altas temperaturas en diversas áreas donde las condiciones de radiación permiten estas elevadas temperaturas, puede mejorarse con la ventilación cenital, si la estructura del invernadero permite su adaptación, lo que no es fácil en una estructura como la de tipo parral (Brun & Lagier, 1984).

#### 2.1.2.1. *Temperatura máxima*

Las altas temperaturas ocasionan aumentos de los requerimientos de los cultivos (nutrientes, agua) para mantener un metabolismo en niveles adecuados. Dependiendo de la etapa fenológica del cultivo, el desarrollo puede acelerarse más que el crecimiento a medida que aumenta la temperatura.

Los daños que causan las altas temperaturas en los cultivos están asociados con el estrés hídrico. El mantener a los cultivos en condiciones de altas temperaturas requiere que el agua disponible sea suficiente que las plantas puedan transpirar libremente. Por arriba de los 50 °C comienza la interrupción de los procesos metabólicos y estas temperaturas poder ser alcanzadas en suelos muy calientes y secos.

La temperatura máxima fue obtenida del promedio de las temperaturas máximas anuales de cada estación que cumpliera con tener 24 o más años con datos completos para el periodo 1981-2010.

#### 2.1.2.2. *Temperatura mínima*

El descenso de la temperatura ambiental ocasiona que el desarrollo de los cultivos se haga más lento. Dependiendo de la etapa fenológica del cultivo, éste puede verse afectado en mayor o menor medida por las bajas temperaturas.

En el caso de cultivos en invernadero, las bajas temperaturas generan aumento de la demanda energética para mantener la temperatura en rangos aceptables dependiendo del cultivo. En los cultivos a cielo abierto, las temperaturas de 1.5 °C registradas a 1.5 m del suelo pueden ocasionar daños en los cultivos, ya que se estima que el suelo puede alcanzar los 0 °C.

La temperatura mínima fue obtenida del promedio de las temperaturas mínimas anuales de cada estación en el periodo 1981-2010, para las estaciones con datos de 24 años o más.

### 2.1.2.3. *Temperatura media*

La temperatura media fue obtenida de mediante la suma de las temperaturas máxima y mínima y su posterior división entre dos. El conjunto de las variables estudiadas puede ayudar a entender mejor las situaciones que pueden generarse durante la producción de un cultivo.

En el **Cuadro 2.5** se observa que en varias zonas del Estado de México la temperatura máxima no excede los 30 °C, sin embargo, se presentan temperaturas muy bajas que podrían ocasionar daños a los cultivos.

Cuadro 2.5. Resumen de las variables para el estado de Estado de México.

Estación	Latitud	Longitud	Temperatura máxima anual	Temperatura media anual	Temperatura mínima anual	Precipitación media anual
Acambay	19°57'24" N	099°50'45" W	21.8	13.5	5.2	765.6
Aculco	20°06'00" N	099°49'12" W	21.3	13.8	6.2	670.1
Amanalco De Becerra	19°15'18" N	100°01'22" W	22.6	14.5	6.4	1,140.00
Amecameca De Juarez	19°08'26" N	098°46'20" W	21.8	14.2	6.7	804.7
Atenco	19°32'38" N	098°54'46" W	25.8	16.7	7.5	565.2
Atotonilco	19°27'44" N	099°46'32" W	21.1	12.7	4.2	828
Calacoaya	19°32'03" N	099°14'22" W	24.5	16.9	9.3	865.6
Capulhuac	19°26'27" N	099°32'43" W	21.9	13.4	4.9	1,015.30
Coatepec Harinas	18°55'23" N	099°45'58" W	23.3	15.8	8.3	1,162.00
Coatepec De Los Olivos	19°23'05" N	098°50'46" W	23.9	16.2	8.6	640
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
Ixtlahuaca	19°34'08" N	099°46'01" W	23.4	14.6	5.8	753.1
Rancho Villa Verde	19°08'20" N	099°36'35" W	21.3	13.2	5.1	834.8
Agua Bendita	19°16'02" N	099°57'01" W	21.4	13.8	6.2	975.8

Estación	Latitud	Longitud	Temperatura máxima anual	Temperatura media anual	Temperatura mínima anual	Precipitación media anual
San Pablo Malacatepec	19°22'13" N	100°09'25" W	22	13.5	4.9	958.4
Lago Nabor Carrillo	19°28'20" N	098°59'30" W	24.4	15.6	6.8	558.5
E. T. A. 013 Jocotitlan	19°42'40" N	099°47'20" W	21.7	13.1	4.6	753.7
E. T. A. 026 Villa Victoria	19°27'22" N	100°04'10" W	20.6	13.4	6.2	788.3
La Albarrada	19°04'03" N	100°04'42" W	24.4	18.2	12.1	1,230.30
La Cañada	19°46'54" N	099°28'21" W	21.2	14.1	7	949.5
Monte De Peña	19°43'55" N	099°32'51" W	21.9	14.3	6.6	1,061.30

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Como un caso contrastante al anterior, en la República Mexicana pueden encontrarse regiones donde la temperatura mínima no representa un riesgo, sin embargo, las temperaturas máximas alcanzadas sobrepasan los 30 °C (**Cuadro 2.6**) pudiendo ocasionar estrés hídrico en los cultivos a cielo abierto, o aumentos en la demanda energética para mantener el cultivo en condiciones de temperatura aceptable dentro de un invernadero.

Cuadro 2.6. Resumen de las variables para el estado de San Luis Potosí.

Estación	Latitud	Longitud	Temperatura máxima anual	Temperatura media anual	Temperatura mínima anual	Precipitación media anual
Agua Buena (Smn)	21°51'09" N.	099°22'47" W.	30	24	17.9	1,701.70
Altamira	21°40'00" N.	098°58'24" W.	31.6	25.5	19.3	1,664.90
Aquismon	21°37'40" N.	099°00'57" W.	31.1	25.3	19.6	2,241.60
Armadillo De Los Infante	22°14'42" N.	100°39'19" W	26.9	18.7	10.5	584.6
Ballesmi	21°44'05" N.	098°57'00" W.	31.6	25.5	19.4	1,515.70
Cardenas (Dge)	22°00'15" N.	099°38'47" W.	26.7	20.2	13.6	555.6
Cedral	23°45'21" N.	100°43'36" W.	26.9	17.7	8.5	359.9

Estación	Latitud	Longitud	Temperatura máxima anual	Temperatura media anual	Temperatura mínima anual	Precipitación media anual
Cerritos	22°25'55" N.	100°16'51" W.	26.6	19.6	12.5	686.2
San Martin Chalchicuatla	21°22'22" N.	098°39'19" W.	28.6	23.2	17.7	1,408.90
Charcas (Dge)	23°07'34" N.	101°06'46" W.	21	13.9	6.8	442.9
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
La Libertad	22°24'43" N.	099°50'49" W.	29.1	20.6	12	167.3
San Antonio Del Mezquite	23°09'52" N.	101°53'09" W.	24.8	16.5	8.3	336.4
San Francisco De La Dicha	22°46'10" N.	100°53'14" W.	27.6	18.4	9.2	279.5
San Jose De Tapanco	21°46'05" N.	099°54'25" W.	29.2	22.3	15.4	506.7
San Rafael	23°01'18" N.	101°56'35" W.	23.8	15.8	7.4	346.4
Las Cuadros	22°15'22" N.	099°51'47" W.	30	20.6	11.1	322.7
El Toro	22°50'12" N.	101°29'30" W.	26.9	19.4	11.7	377.7
El Terrero	22°24'00" N.	100°53'12" W.	26.5	18.2	9.8	305.9
El Estribo	22°25'48" N.	099°18'24" W.	31.7	24.2	16.7	1,323.20
Tepemiche	21°29'30" N.	098°38'57" W.	30.8	24.6	18.4	1,081.10

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

## 2.2. Zonas climáticas en México

Una vez que se recopiló y procesó la información, se procedió a localizar las estaciones climatológicas en el territorio nacional (**Figura 2.1**). El método de interpolación empleado en la generación de los mapas de temperaturas, precipitación, riesgos y potenciales fue Spline con barreras.



Figura 2.1. Distribución de las estaciones climatológicas en la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Se recopiló la información de las estaciones climatológicas distribuidas en la República Mexicana, considerando aquellas que contaban con un mínimo de 24 años de datos. Se recabó la información de precipitación, evaporación, temperatura máxima y mínima.

Para un análisis más localizado se realizó la depuración de los datos de temperatura y precipitación para cinco estados de la República Mexicana: Estado de México, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí y Sinaloa.

## 2.3. Variables de interés

### 2.3.1. Temperatura

El clima en la república mexicana está definido por la latitud, el relieve y las características atmosféricas. El territorio nacional puede dividirse en dos partes, aquellas extensiones donde el clima es principalmente tropical y aquellas donde el clima es árido.

#### 2.3.1.1. *Temperatura mínima*

La distribución de las temperaturas en la República Mexicana está influenciada por factores como la altitud, latitud, nubosidad y humedad. La temperatura decrece con la altura, por lo que dos lugares con ubicados a la misma latitud pueden tener temperaturas diferentes, con el lugar más alto a temperaturas más bajas (**Figura 2.2**).

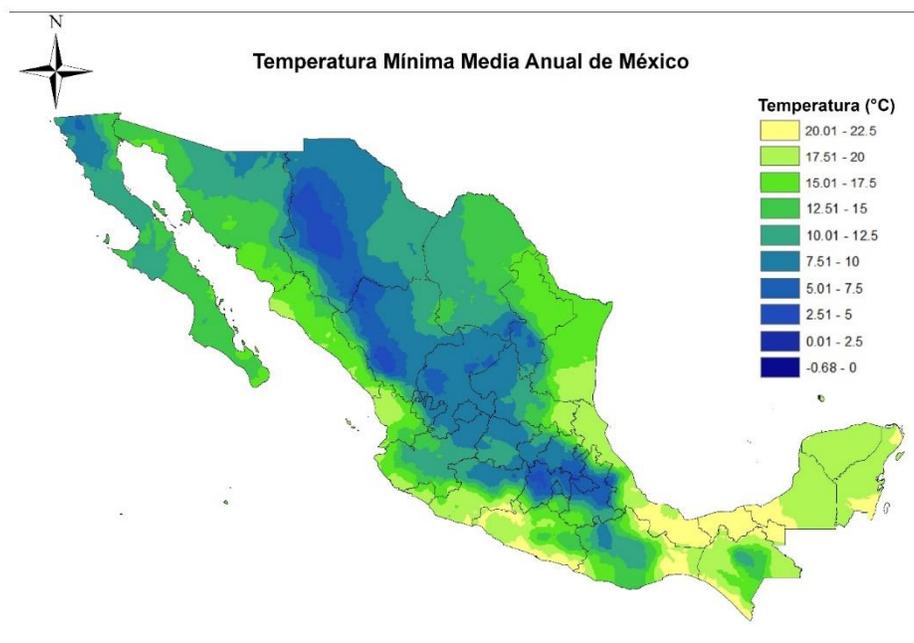


Figura 2.2. Temperatura mínima anual en la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

La intensidad de la insolación se ve disminuida con la latitud, y si todos los demás factores son iguales, la temperatura media en el hemisferio norte disminuye conforme se va aproximando hacia el norte.

La presencia de nubes en la atmósfera reduce el calentamiento del suelo, ya que las nubes interceptan la insolación. Si dos lugares están a la misma altura y latitud, será más caluroso aquel que tenga nubosidad escasa.

El vapor de agua en el aire restringe las pérdidas de calor haciendo que las temperaturas mínimas no bajen demasiado durante la noche. En las regiones lejanas de fuentes de humedad el aire seco se enfría durante la noche, mientras que en el día el aire se calienta a temperaturas elevadas.

Para el periodo 1981-2010 se observan promedios de temperatura mínima cercanas a 0 °C en la zona de Toluca. La mayor parte del territorio del estado de México, principalmente en el centro y este, presenta temperaturas mínimas entre 2.5 y 10 °C (**Figura 2.3**). Temperaturas mínimas superiores a 12.5 °C se observaron en el sur del estado, en las colindancias con el estado de Guerrero.

La ocurrencia de temperaturas mínimas inferiores a 5 °C en el estado de México puede provocar problemas en el crecimiento y desarrollo de cultivos en invernadero. Tales temperaturas pueden aumentar el uso de calefacción y por ende elevar los costos de producción de los cultivos en invernadero.

Las temperaturas mínimas inferiores a 5 grados se observan en los altos de jalisco y la sierra occidental (**Figura 2.4**), así como en el norte del estado. Las temperaturas mínimas superiores a 15 °C se observan principalmente en el este del estado y cercanas a la costa.

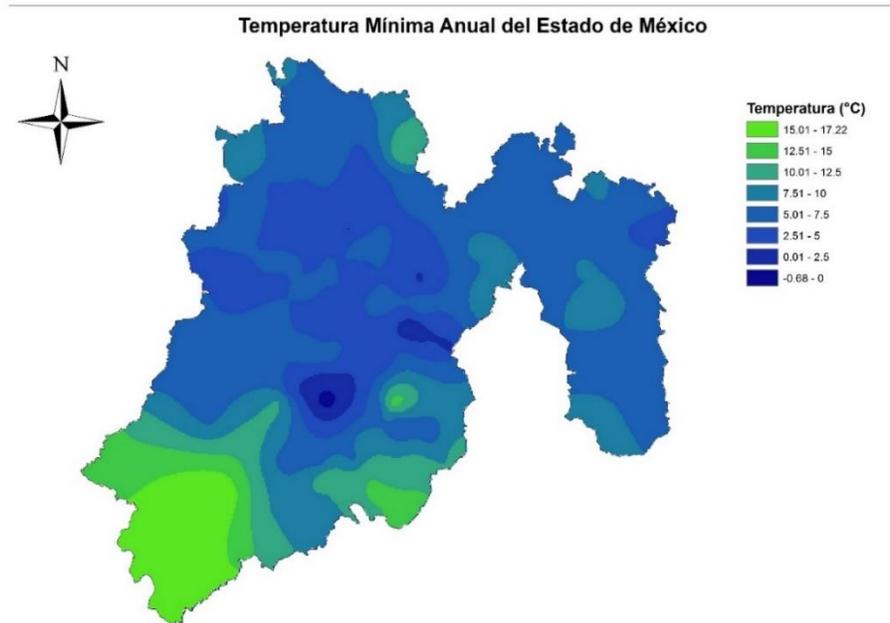


Figura 2.3. Temperatura mínima anual en el Estado de México.

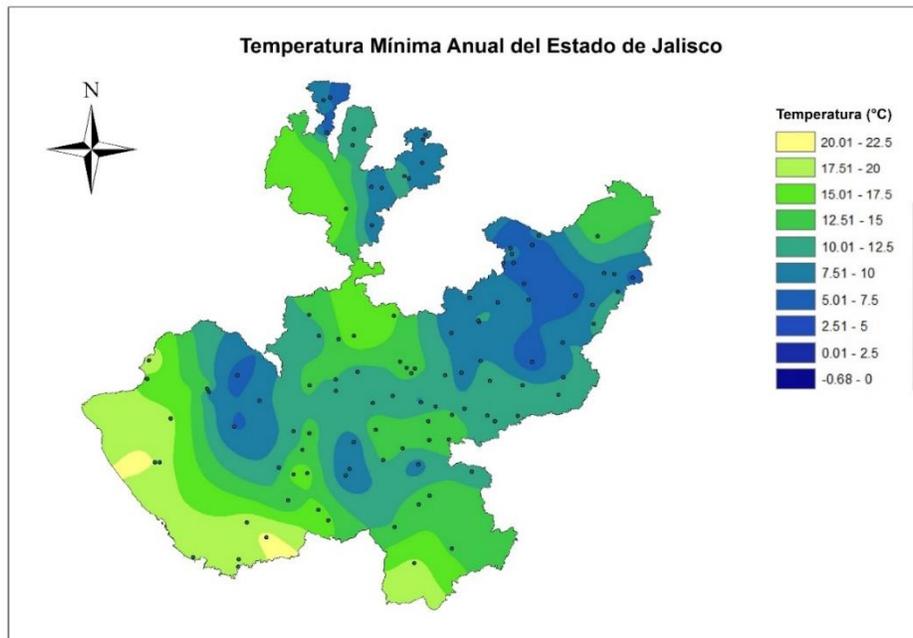


Figura 2.4. Temperatura mínima anual en el estado de Jalisco.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

En el centro del estado de Jalisco predominan las temperaturas mínimas entre 10 y 15 °C. Las regiones con temperaturas mínimas superiores a 10 °C son favorables para el cultivo de varias especies a cielo abierto y también para el cultivo en invernadero.

Temperaturas mínimas inferiores a 10 °C se observan en el norte del estado de Michoacán (**Figura 2.5**), en las colindancias con el estado de Guanajuato. En el centro del estado se observan temperaturas mínimas entre 10 y 17 °C, mientras que las temperaturas mínimas superiores a 20 °C se observan en las zonas cercanas a la costa. La mayor parte del estado de Michoacán presenta temperaturas mínimas promedio en el rango de 5 a 20 °C.

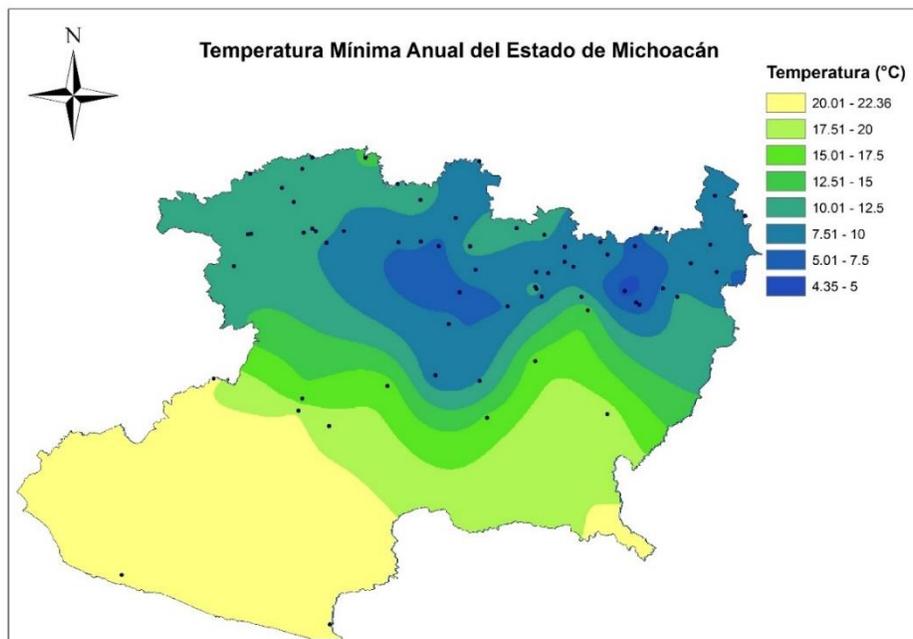


Figura 2.5. Temperatura mínima anual en el estado de Michoacán.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Las temperaturas mínimas inferiores a 10 °C se observan principalmente en el noreste del estado de San Luis Potosí, que corresponde a la región altiplano (**Figura 2.6**). En el centro del estado se observan temperaturas mínimas entre 10 y 15 °C. En el este del estado, correspondiente a la región huasteca, se tienen temperaturas mínimas superiores a 15 °C.

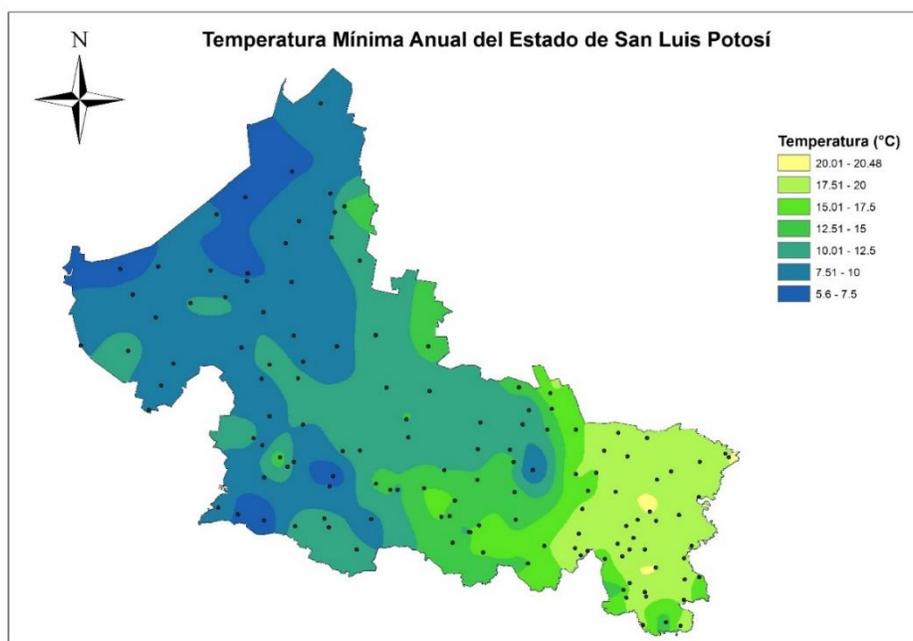


Figura 2.6. Temperatura mínima anual en el estado de San Luis Potosí.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

En la región del altiplano, donde se registran las temperaturas mínimas más bajas, los costos de producción de los cultivos en invernaderos pueden verse incrementados debido a la necesidad de implementar calefacción para mantener la temperatura dentro del rango óptimo para la producción de los cultivos.

Las temperaturas mínimas menores a 15 °C en el estado de Sinaloa se observaron principalmente en el norte, en las colindancias con el estado de Chihuahua. La mayor parte del estado presenta temperaturas mínimas en entre 15 y 20 °C. Las temperaturas mínimas superiores a 20 °C se observan en el norte del estado en la zona cercana a la costa.

En todo el estado de Sinaloa (**Figura 2.7**) no se presentan temperaturas mínimas inferiores a 10 °C, lo cual es propicio para el cultivo de diversas especies en invernadero sin tener que recurrir en gastos adicionales por el empleo de calefacción.

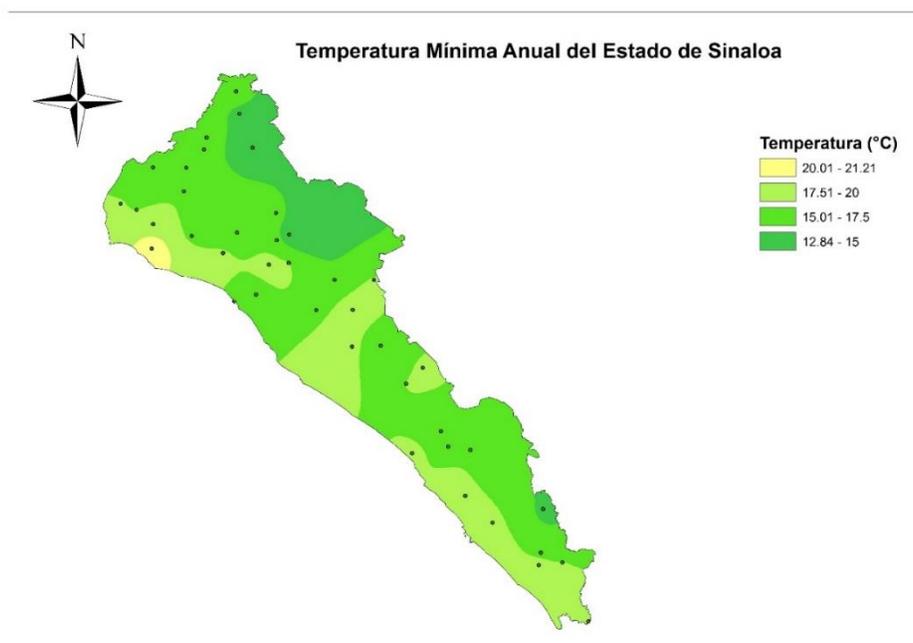


Figura 2.7. Temperatura mínima anual en el estado de Sinaloa.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

#### 2.3.1.2. *Días por debajo de 10 °C*

Durante el ciclo de producción de un cultivo es necesario que las condiciones ambientales permanezcan en un rango óptimo para asegurar una buena producción y rendimiento. La identificación de los días por debajo de 10 °C es útil para determinar qué zonas pueden ser más aptas que otras para la producción de un cultivo.

La cuantificación de los días con temperatura inferior a 10 °C fue realizada considerando el promedio de la temperatura mínima diaria en el periodo analizado. En el Estado de México (**Figura 2.8**) se observa que la mayor cantidad de días por debajo de 10 °C se encuentran en la parte central con más de 340, así como en el sureste del estado. Las zonas con la menor cantidad de días por debajo de 10 °C se encuentran en el sur del Estado de México, llegando a ser cero en las colindancias con el estado de Guerrero.

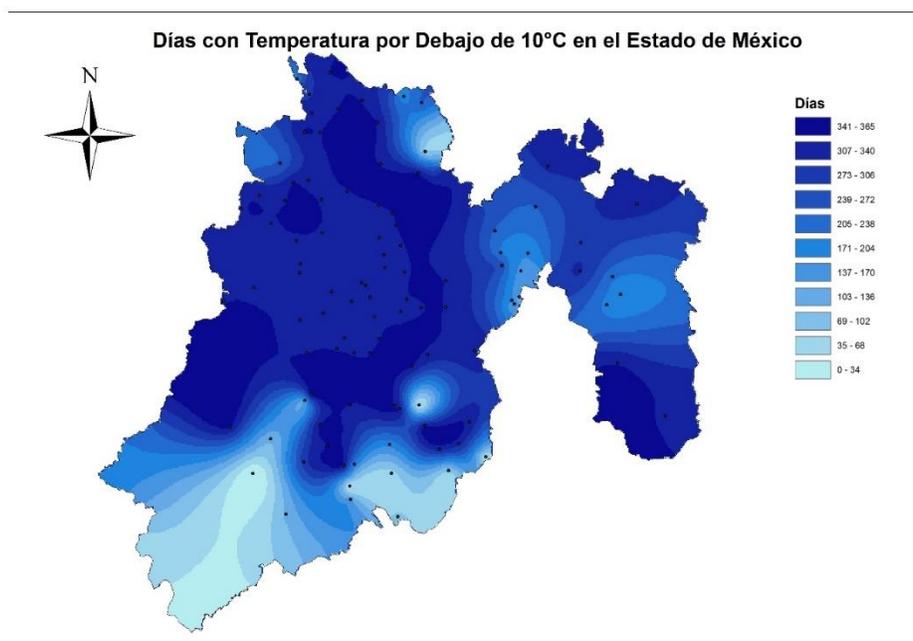


Figura 2.8. Días por debajo de 10 °C en el Estado de México.

La distribución de los días por debajo de 10 °C en el estado de Jalisco (**Figura 2.9**) presenta varias zonas con menos de 35 días principalmente cerca de las costas del estado, en el sur y en el este del estado. En la región de los altos de Jalisco se presenta la mayor cantidad de días por debajo de 10 °C, de hasta 200 días.

Gran parte del territorio del estado de Michoacán (**Figura 2.10**) presenta menos de 35 días por debajo de 10 °C, desde las zonas cercanas a la costa, la región de tierra caliente y la depresión del Balsas. La región de la sierra madre del sur en el estado de Michoacán no presentó estaciones con datos completos de temperatura. La mayor cantidad de días por debajo de 10 °C se encuentra en el norte del estado, en las regiones de las montañas occidentales, las mil cumbres y la región moreliana, con hasta 340 días.

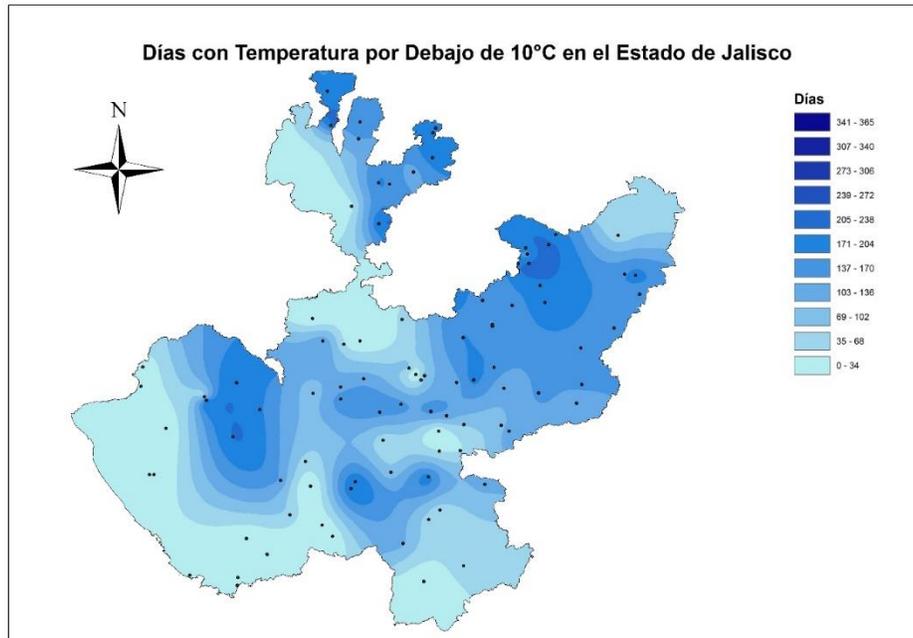


Figura 2.9 Días por debajo de 10 °C en el estado de Jalisco.

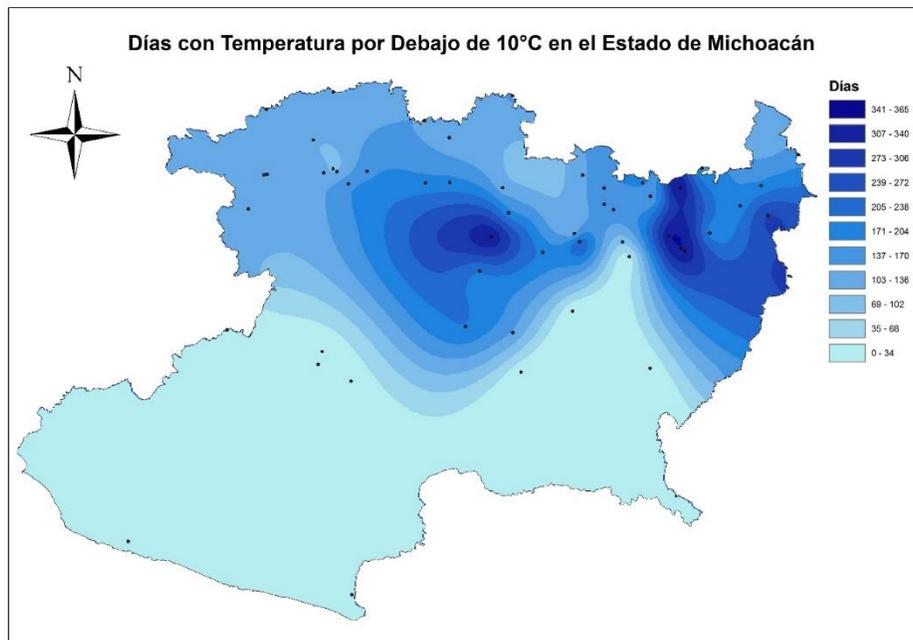


Figura 2.10. Días por debajo de 10 °C en el estado de Michoacán.

En el estado de San Luis Potosí (**Figura 2.11**) la región Huasteca es la que presenta la menor cantidad de días por debajo de 10 °C. La mayor cantidad de días por debajo de 10 °C se encuentra

en el norte de la región del altiplano, así como en una pequeña parte al este de la región media y en el sur de la región centro del estado, donde se pueden tener hasta 340 días.

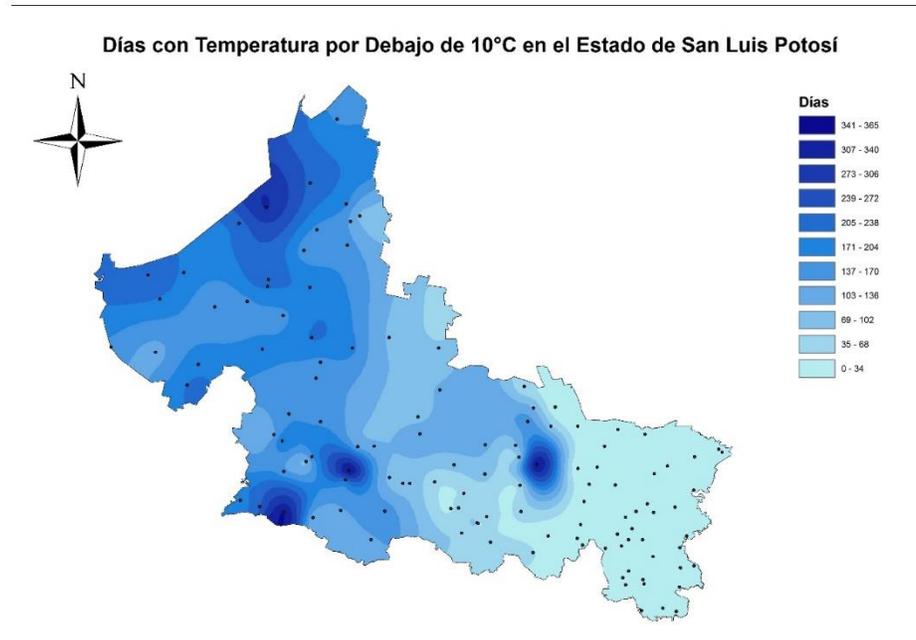


Figura 2.11. Días por debajo de 10 °C en el estado de San Luis Potosí.

En la mayor parte del estado de Sinaloa (**Figura 2.12**) los días por debajo de 10 °C son menos de 34, principalmente en la costa del estado, aunque en el municipio de angostura puede haber más de 60. No obstante en el norte del estado se pueden tener hasta 100 días con temperaturas inferiores a los 10 °C.

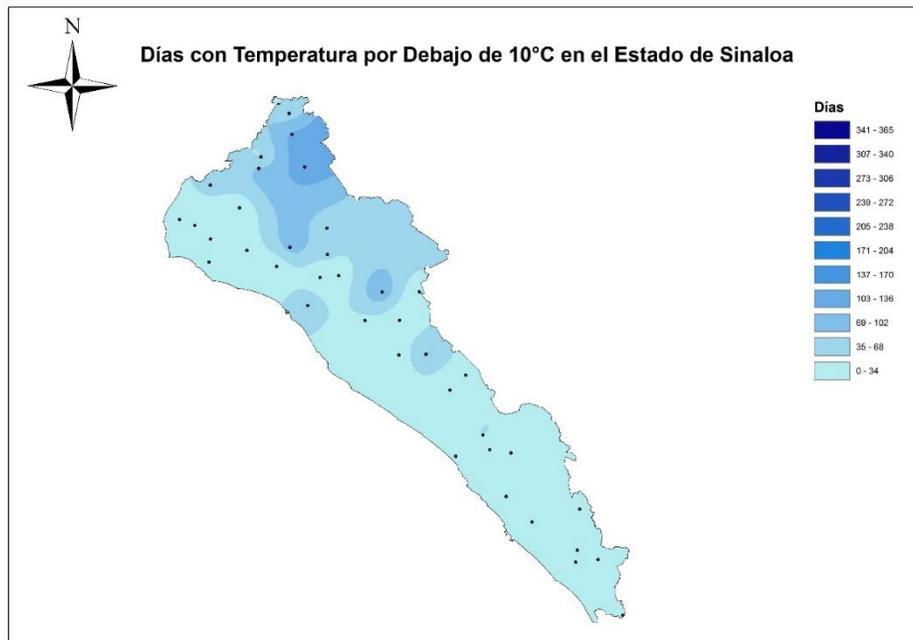


Figura 2.12. Días por debajo de 10 °C en el estado de Sinaloa.

### 2.3.1.3. *Temperatura máxima*

De manera general, puede decirse que en gran parte de la región central y sur de México la temperatura máxima ocurre antes del verano, puesto que durante la temporada de lluvias la insolación disminuye y por consiguiente también la temperatura se ve disminuida

Las temperaturas máximas, además de tener variabilidad en el territorio, ocurren en diferentes épocas del año. Los principales meses en los que ocurren las máximas temperaturas en la República Mexicana son desde marzo hasta agosto. Las regiones cercanas a las costas no rebasan los 35 °C de temperatura máxima (**Figura 2.13**).

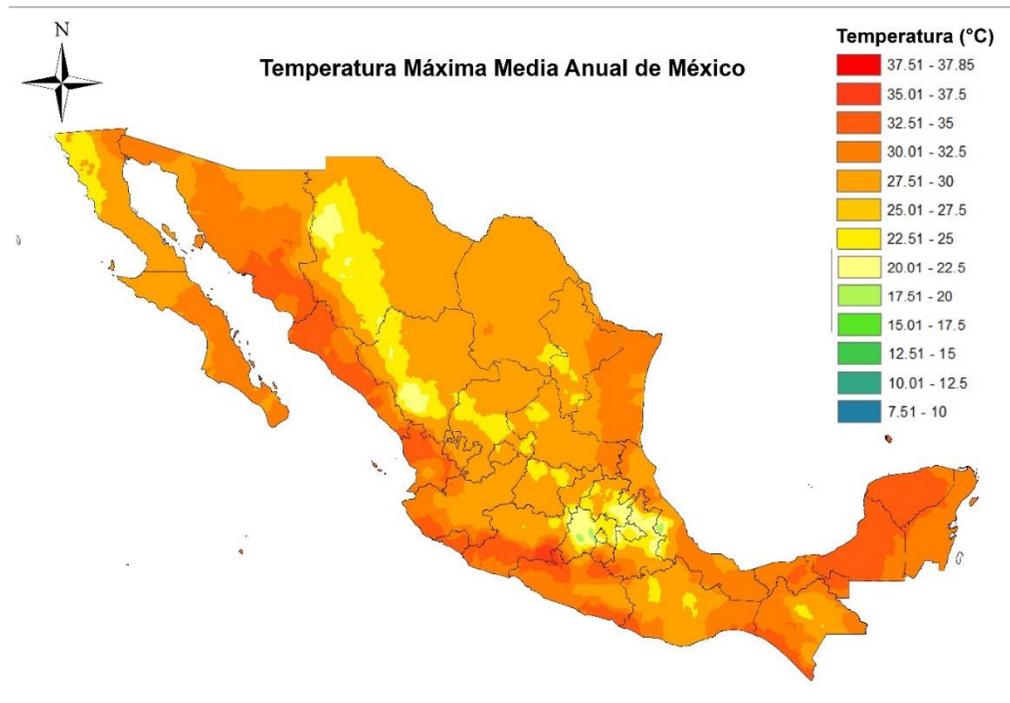


Figura 2.13. Temperatura máxima anual en la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Las temperaturas máximas superiores a 25 °C se encuentran en el sur del estado de México (**Figura 2.14**), en las colindancias con los estados de Guerrero y Morelos, así como en el norte del estado, en las colindancias con el estado de Hidalgo. Las temperaturas máximas inferiores a 10 °C se localizan en la zona de Toluca. En el centro del estado se presentan principalmente temperaturas máximas entre 15 y 25 °C. En las zonas del estado de México con temperaturas máximas promedio cercanas a los 30 °C pueden presentarse días en los que sea necesario emplear ventilación forzada para reducir la temperatura interior de los invernaderos y reducir el agobio de los cultivos por altas temperaturas.

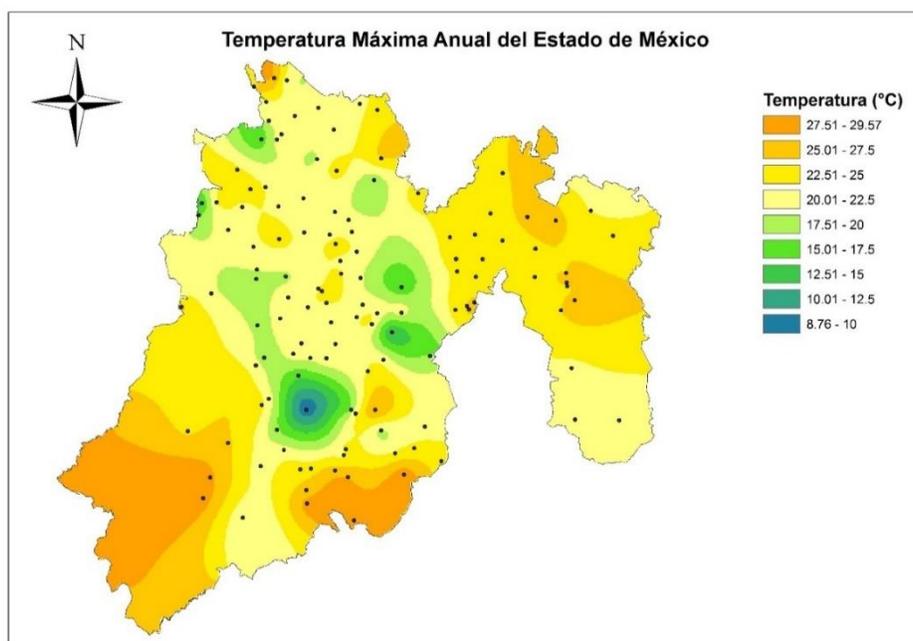


Figura 2.14. Temperatura máxima anual en el Estado de México.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Las temperaturas máximas superiores a 30 °C se observan en el norte del estado de Jalisco (**Figura 2.15**), llegando a superar los 37 °C. También en el sur del estado de Jalisco se registran temperaturas superiores a 32 °C en las colindancias del estado de Colima. En la mayor parte del estado, las temperaturas máximas observadas están entre 20 y 30 °C.

Las temperaturas máximas promedio se observan en el centro y sur del estado de Michoacán (**Figura 2.16**), en las colindancias con el estado de Guerrero y las zonas cercanas a la costa. En el norte del estado predominan las temperaturas máximas entre 21 y 25 °C.

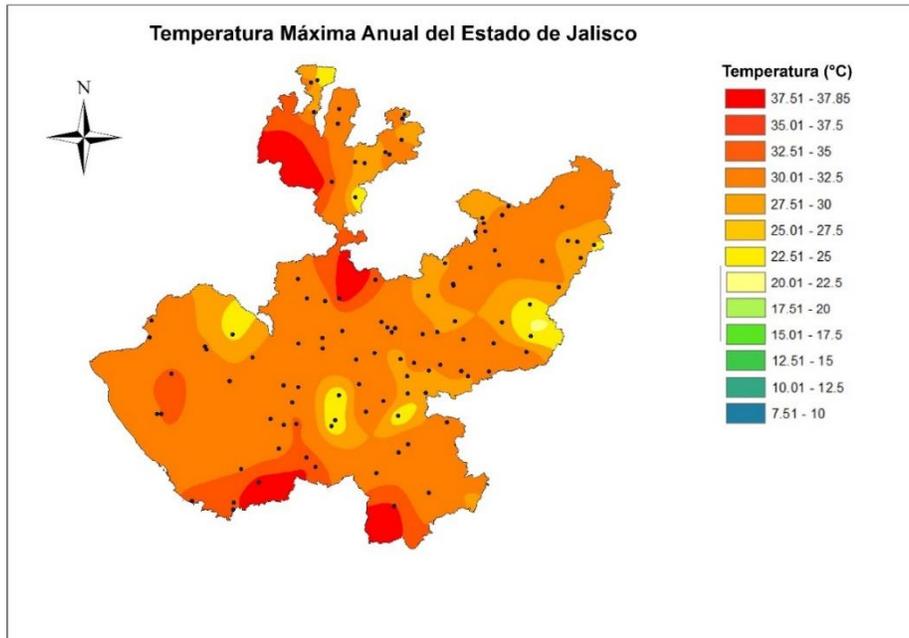


Figura 2.15. Temperatura máxima anual en el estado de Jalisco.

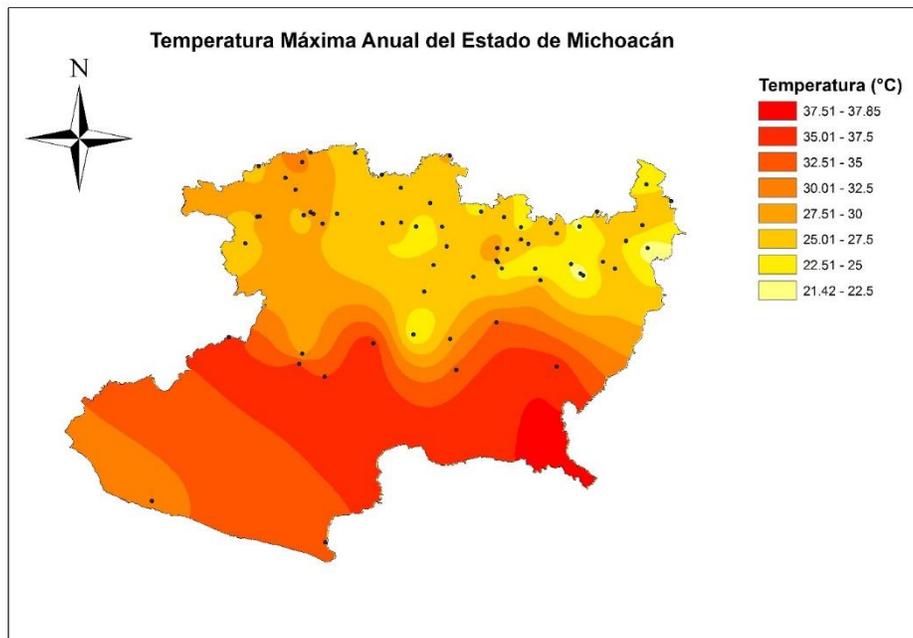


Figura 2.16. Temperatura máxima anual en el estado de Michoacán.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

En la región huasteca del estado de San Luis Potosí, se registran temperaturas máximas entre 27 y 33 °C, siendo esta la región más cálida del estado (**Figura 2.17**). También en la colindancia con

los estados de Tamaulipas y nuevo león se observan temperaturas superiores a 30 °C. En el centro del estado las temperaturas predominantes están entre 20 y 30 °C. En la región del altiplano, las temperaturas máximas están entre 20 y 30 °C. Las zonas donde las temperaturas máximas son superiores a 30 °C pueden requerir el uso de ventilación forzada para reducir la temperatura del invernadero y adecuarla a los rangos tolerables por el cultivo manejado en el interior.

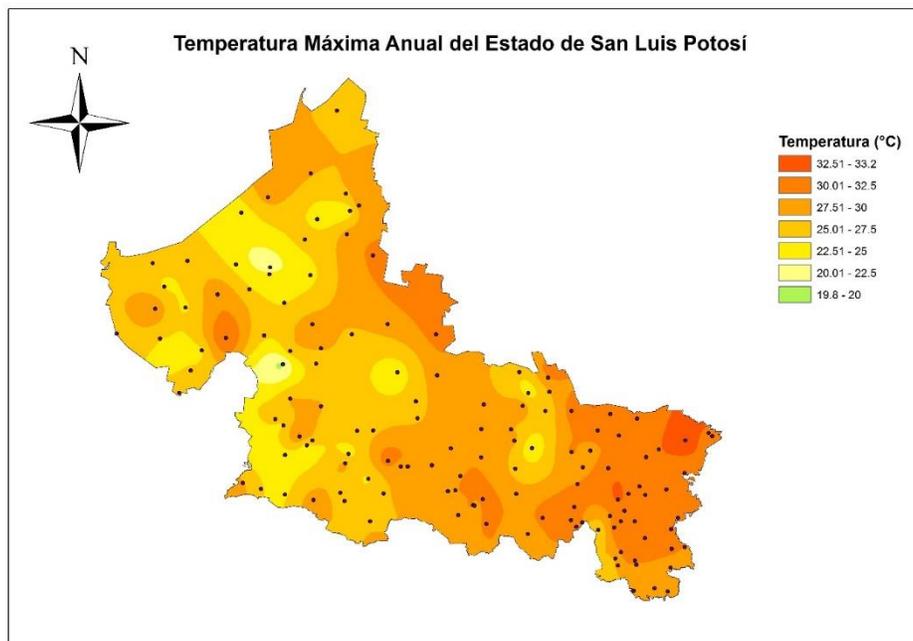


Figura 2.17. Temperatura máxima anual en el estado de San Luis Potosí.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

En la mayor parte del territorio del estado de Sinaloa las temperaturas máximas promedio van de 30 a 35 °C (**Figura 2.18**). En la parte sur del estado, en la colindancia con el estado de Durango las temperaturas máximas están entre los 22 y 30 °C. La incidencia de temperaturas máximas superiores a los 30 °C en el estado de Sinaloa puede generar aumentos en los costos de producción al incorporar ventilación forzada para reducir la temperatura interna del invernadero, o bien optar por el uso de estructuras con mejor ventilación que los invernaderos como pueden las casas sombra o los túneles.

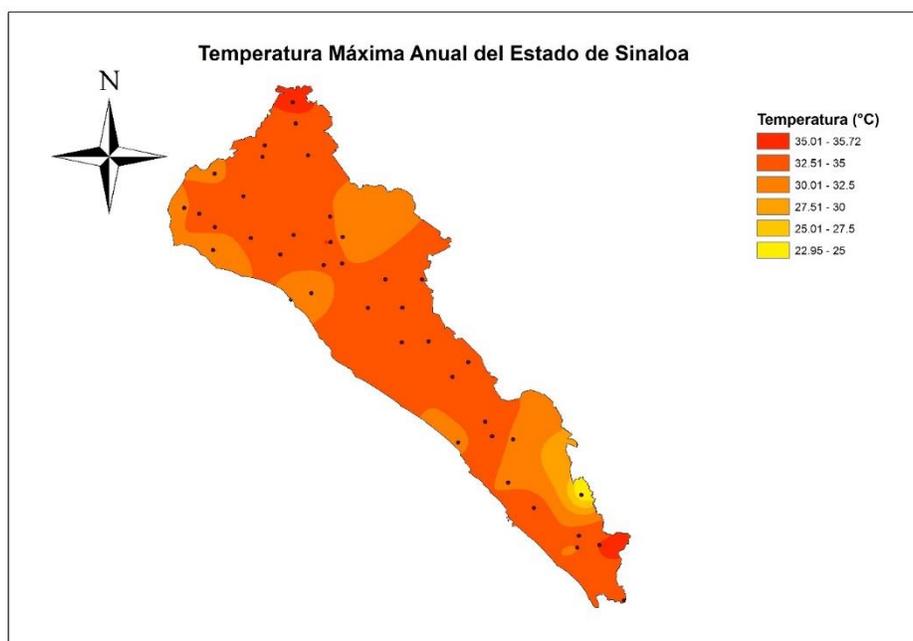


Figura 2.18. Temperatura máxima anual en el estado de Sinaloa.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

#### 2.3.1.4. *Días por arriba de 30 °C*

Las altas temperaturas ambientales pueden ocasionar que los cultivos aumenten sus necesidades de agua y además provocar estrés en las plantas. Esto se ve reflejado en la disminución del rendimiento. El conteo de los días con temperaturas mayores a 30 °C ayuda a identificar las zonas en las que el rendimiento de los cultivos puede ser menor al esperado. Para el cálculo de esta variable se obtuvo el promedio de la temperatura máxima diaria de cada estación que presentó 24 o más años con datos.

En la mayor parte del territorio del Estado de México (**Figura 2.19**), el número de días con temperaturas superiores a los 30 °C está entre 0 y 34. En la parte sur del estado el número de días por arriba de 30 °C llega hasta 130 en las colindancias con los estados de Guerrero y Morelos.

En el estado de Jalisco, la mayor cantidad de días con temperaturas superiores a los 30 °C se encuentra en la parte sur del estado y la costa (**Figura 2.20**), llegando a ocurrir hasta 340 días por arriba de 30 °C. También en la parte noreste del estado pueden ocurrir hasta 340. En el centro del estado la cantidad de días con temperaturas altas está entre los 100 y 200. Mientras que la menor cantidad de estos días se encuentra en la región de los altos de Jalisco, en los municipios de Arandas y Jesús María, con menos de 34 días con temperatura por arriba de 30 °C.

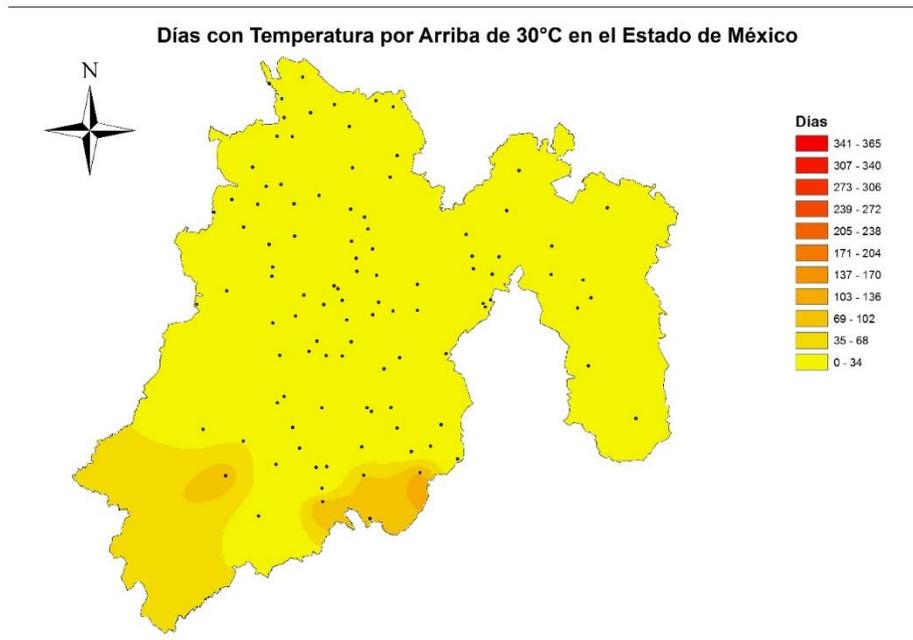


Figura 2.19. Días por arriba de 30 °C en el Estado de México.

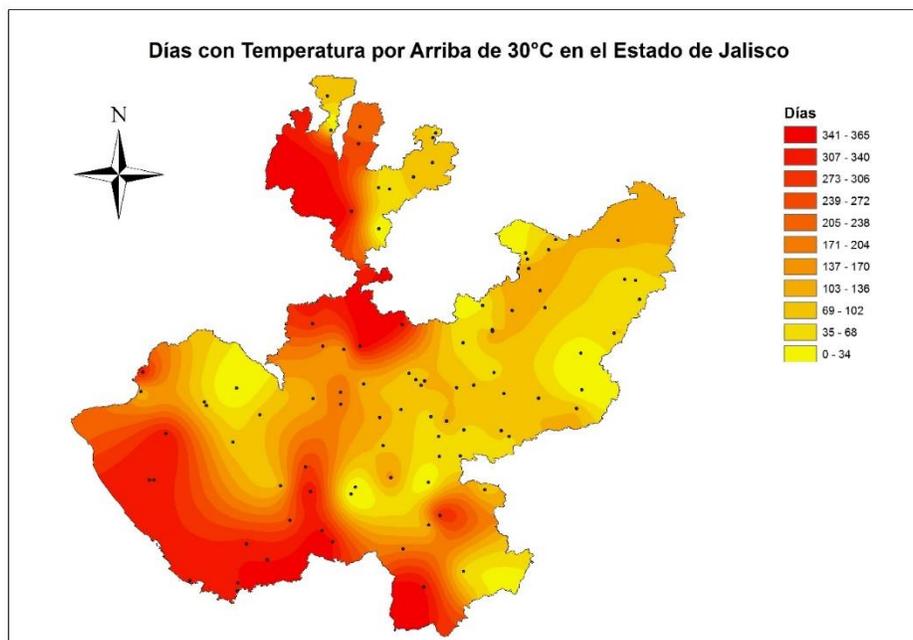


Figura 2.20. Días por arriba de 30 °C en el estado de Jalisco.

El mayor número de días con temperaturas superiores a los 30 °C en el estado de Michoacán (**Figura 2.21**) se encuentran en la región del Pacífico y Bajos y en la región de Tierra Caliente de este estado. En estas regiones pueden contarse más de 340 días por arriba de 30 °C. En el centro

norte y noreste del estado se tiene la menor cantidad de días por arriba de 30 °C, entre 0 y 34, que corresponde a zonas montañosas. En los valles de Zamora y parte de las Montañas Occidentales, el número de días con temperaturas altas está entre los 35 y 102.

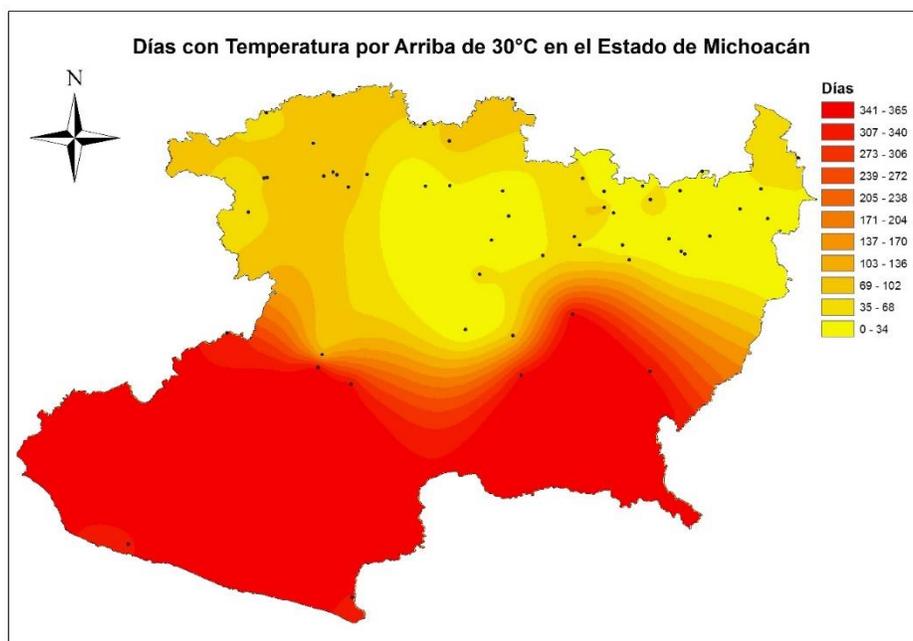


Figura 2.21. Días por arriba de 30 °C en el estado de Michoacán.

En el estado de San Luis Potosí (**Figura 2.22**) la región huasteca es la que presenta la mayor cantidad de días con temperaturas máximas superiores a 30 °C, entre 171 y 306. En la parte central del estado la cantidad de días por arriba de 30 °C varía de 0 hasta 200. La región del altiplano en el estado de San Luis Potosí presenta un máximo de 100 días por arriba de 30, aunque en el oeste del altiplano el número de días está entre 0 y 34. En la región centro de San Luis Potosí se tienen principalmente entre 0 y 34 días por arriba de 30, aunque en algunas partes se pueden tener hasta 102.

En la mayor parte del estado de Sinaloa (**Figura 2.23**) los días con temperaturas superiores a 30 °C son entre 200 y 340. También se observa que la región con el menor número de días por arriba de 30 °C se encuentra en el sur del estado, con 0 hasta 68 días. Las partes con mayor número de días con temperaturas altas se encuentran en el norte del estado, pudiendo ocurrir más de 340.

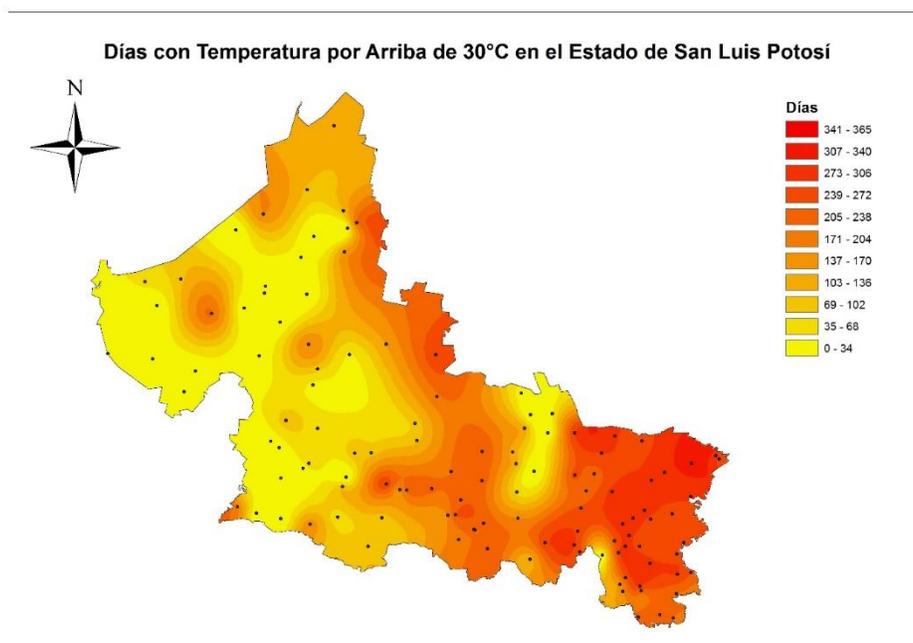


Figura 2.22. Días por arriba de 30 °C en el estado de San Luis Potosí.

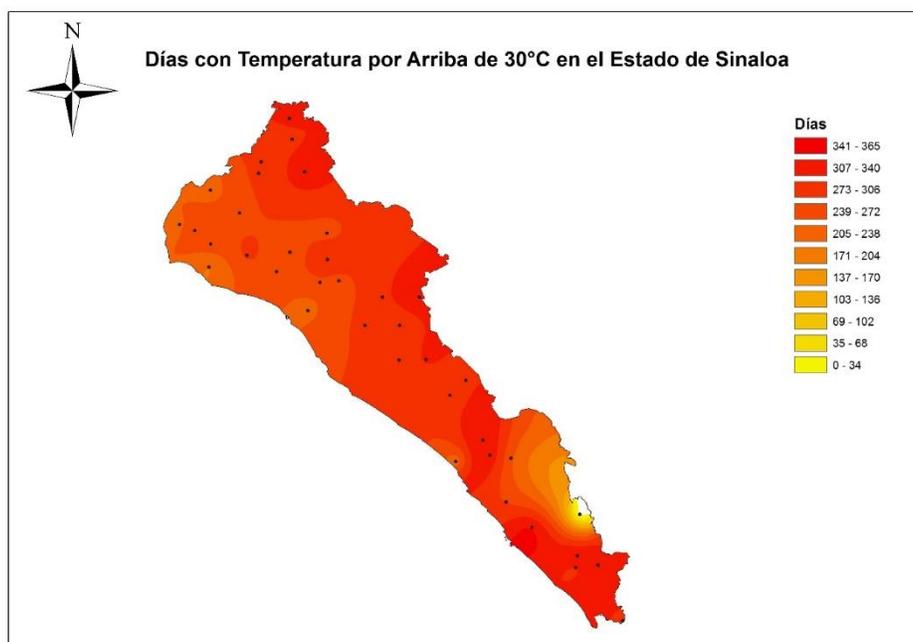


Figura 2.23. Días por arriba de 30 °C en el estado de Sinaloa.

### 2.3.1.5. *Temperatura media*

De acuerdo con la temperatura media (**Figura 2.24**) se pueden clasificar varias regiones como sigue:

- En el norte del país las temperaturas son más elevadas, aunque cerca de las zonas montañosas hay menos afectación por las altas temperaturas.
- En el centro del país las temperaturas medias son llevaderas, aunque en las zonas más altas comienzan a predominar las bajas temperaturas.
- La temperatura del sur del país es cálida, con temperaturas medias anuales superiores a los 25 °C.

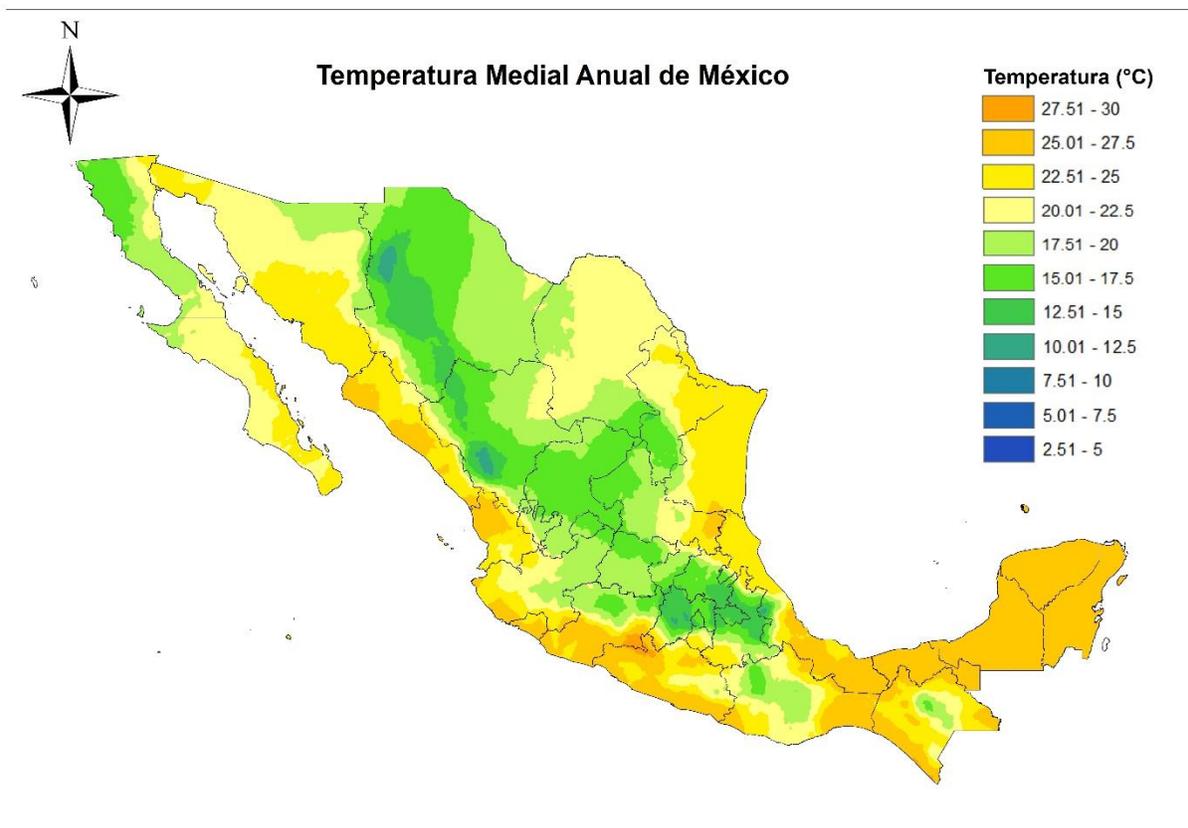


Figura 2.24. Temperatura media anual en la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Los promedios de temperatura media más altos se observaron principalmente en las costas del pacífico desde Baja California y Sinaloa hasta Chiapas, así como el sur de Veracruz y Tabasco y toda la península de Yucatán.

En contraparte, los promedios más bajos de temperatura media ocurrieron en el estado de Chihuahua y Durango, con temperaturas entre 11 y 12.5 °C. La región central de la República Mexicana (Estado de México, Puebla, Tlaxcala e Hidalgo) también presenta temperaturas media bajas, del orden de los 12-15 °C.

Las temperaturas medias promedio más altas en el Estado de México están entre los 17 y 23 °C, en la parte sur del estado (**Figura 2.25**). De manera similar con la temperatura mínima, la temperatura media más baja se encuentra en la zona de Toluca, con magnitudes entre 4 y 10 °C. El centro del estado, excluyendo la zona de Toluca, presenta temperaturas medias promedio entre 10 y 20 °C. El este del país presenta temperaturas medias entre 12 y 15 °C.

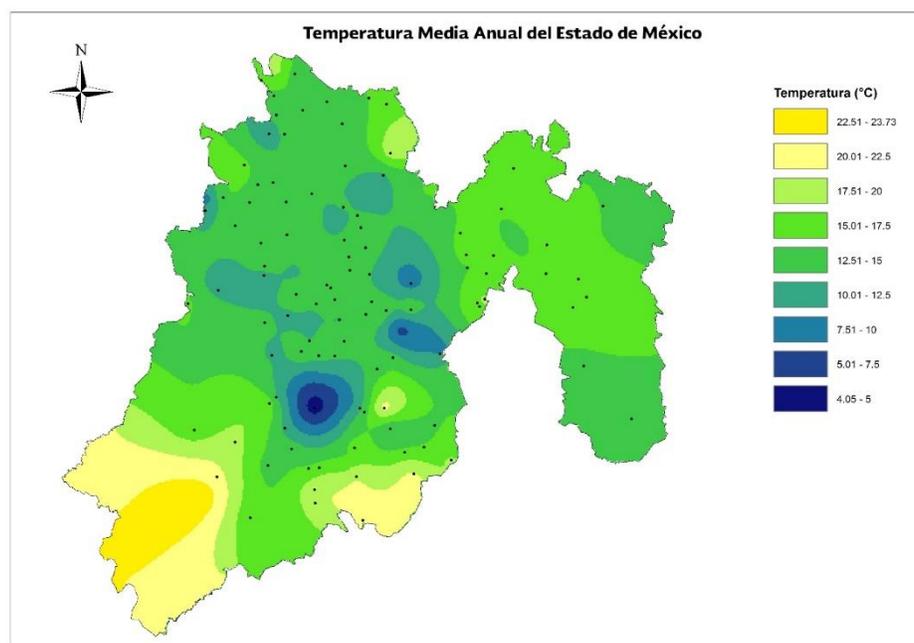


Figura 2.25. Temperatura media anual en el Estado de México.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Las temperaturas medias anuales promedio en el centro del estado de Jalisco (**Figura 2.26**) se encuentran en el rango de 15 a 20 °C. Este rango de temperaturas también se presenta en los altos de Jalisco. Las temperaturas medias superiores a 25 °C se observan en el norte y las costas del estado, así como en la zona colindante con el estado de Colima.

Las temperaturas medias anuales promedio en el norte de estado de Michoacán (**Figura 2.27**) se encuentran entre 13 y 20 °C, mientras que en el sur del estado se observan temperaturas entre 22 y 29 °C.

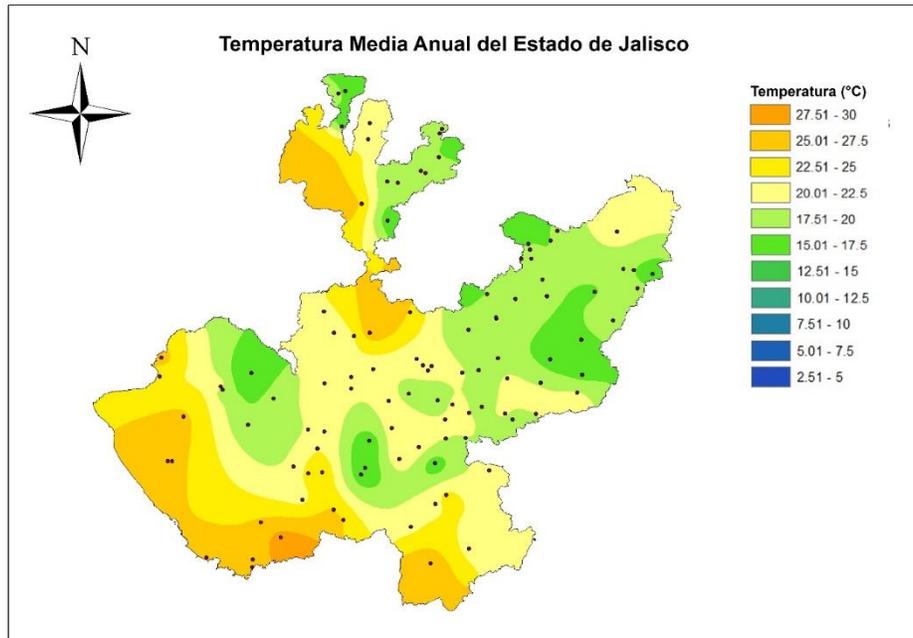


Figura 2.26. Temperatura media anual en el estado de Jalisco.

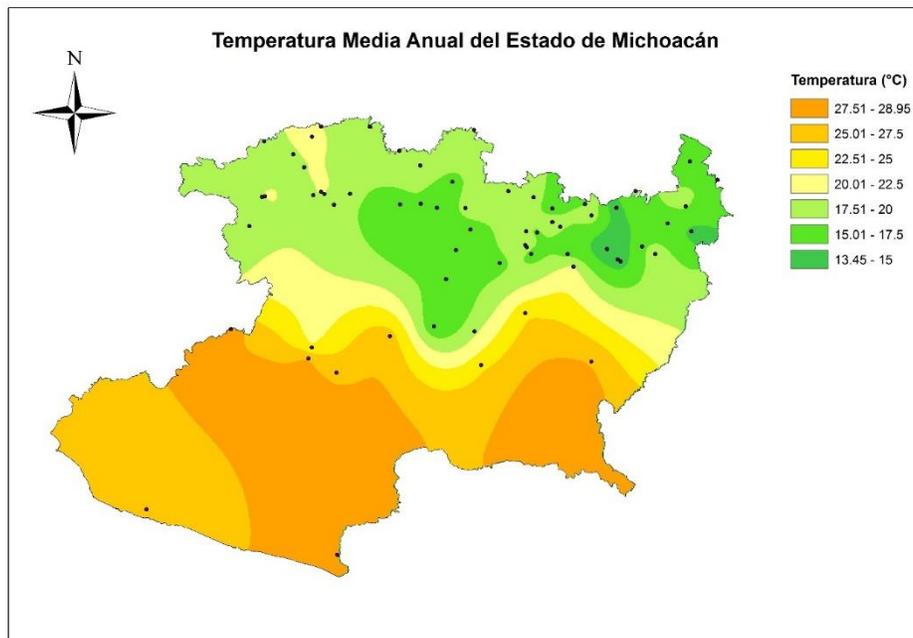


Figura 2.27. Temperatura media anual en el estado de Michoacán.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Las temperaturas medias anuales más bajas (entre 14 y 17 °C) se encuentran en la región del altiplano del estado de San Luis Potosí (**Figura 2.28**), mientras que las temperaturas medias más

altas (entre 26 y 26 °C) se observan en la región de la huasteca potosina. La parte central del estado presenta temperaturas medias entre los 15 y 22 °C, a excepción de una pequeña zona en la que las temperaturas medias pueden alcanzar temperaturas superiores a los 22 °C.

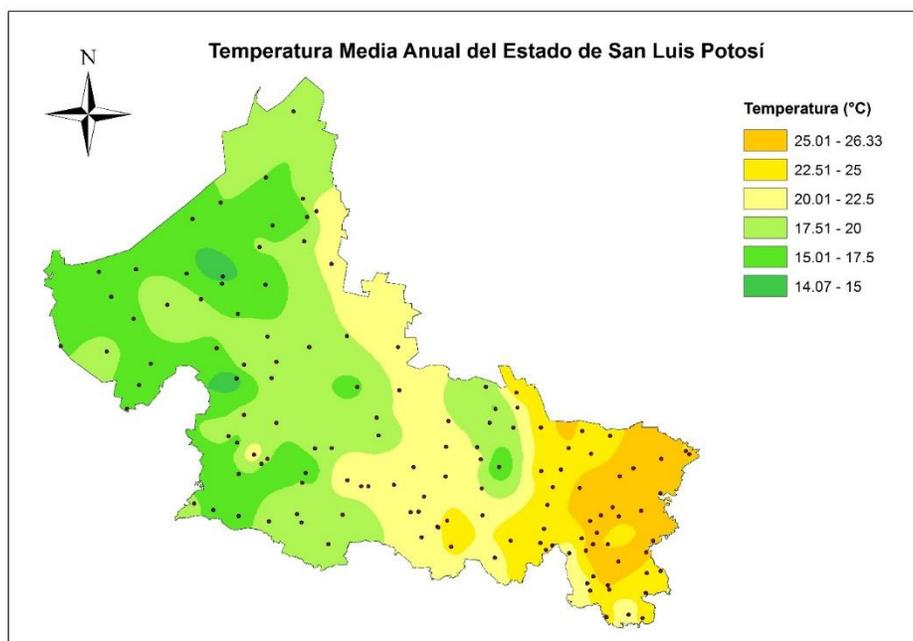


Figura 2.28. Temperatura media anual en el estado de San Luis Potosí.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Las temperaturas medias en el estado de Sinaloa (**Figura 2.29**) se encuentran en el rango de 18 a 26.5 °C. Las zonas con temperaturas medias superiores a 25 °C se encuentran principalmente cerca de la costa. La zona norte presenta principalmente temperaturas en el rango de 20 a 25 °C en las regiones alejadas de la costa. La temperatura media más baja se observa en la zona sur, con temperaturas entre los 18.5 y 20 °C.

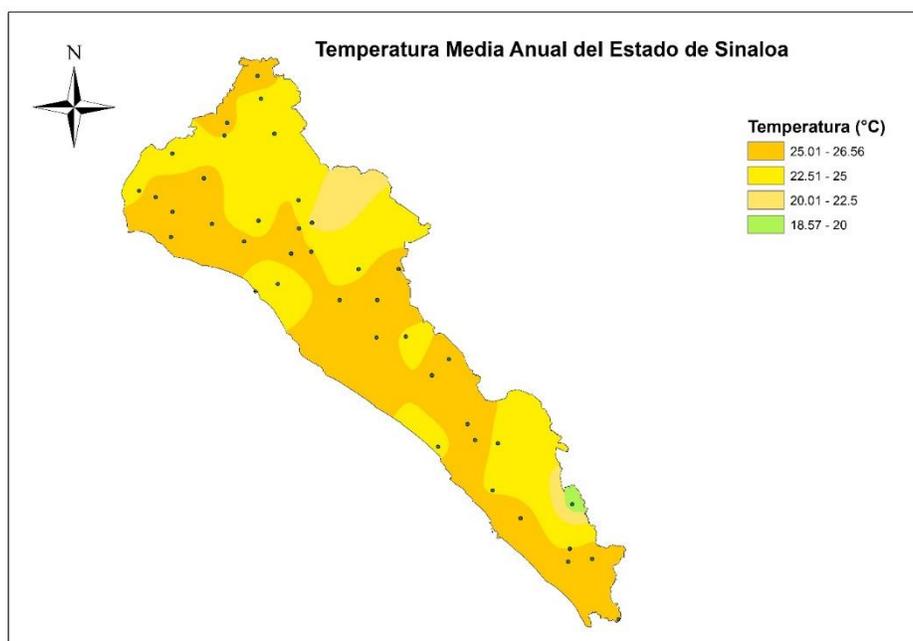


Figura 2.29. Temperatura media anual en el estado de Sinaloa.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

También se consideró tomar el promedio de la temperatura media diaria para la contar el número de días con temperaturas inferiores a 10 °C. En el **Cuadro 2.7** se muestra el promedio del número de días en los cuales la temperatura media estuvo por debajo de 10 °C en el Estado de México. Se observa que se reduce la cantidad de estaciones con días por debajo de 10 °C, sin embargo, en algunas se presenta temperaturas medias por debajo de 10 °C con más de 40 días, siendo la estación 15062 (Nevado de Toluca) la que presenta la mayor cantidad con 365 días.

Cuadro 2.7. Días por debajo de 10 °C en el Estado de México, considerando la temperatura media.

Clave estación	de	Días por debajo de 10 °C	Clave estación	de	Días por debajo de 10 °C	Clave estación	de	Días por debajo de 10 °C
15002		0	15088		9	15240		83
15008		0	15089		5	15241		0
15010		73	15093		1	15244		86
15014		60	15098		0	15245		3
15016		0	15103		0	15248		0
15020		4	15104		0	15251		74
15022		0	15108		0	15255		0
15024		68	15115		0	15256		0
15025		43	15117		0	15259		0
15028		0	15119		2	15260		1
15029		6	15122		0	15261		15

Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C
15037	0	15126	61	15264	0
15038	25	15127	0	15266	35
15041	0	15128	0	15267	0
15045	154	15134	0	15270	0
15047	0	15145	0	15272	0
15051	106	15160	50	15282	79
15055	0	15170	0	15285	0
15057	0	15173	0	15287	0
15058	0	15174	10	15295	0
15059	0	15185	10	15296	0
15062	365	15187	52	15298	0
15063	61	15189	33	15299	0
15064	0	15190	0	15301	0
15066	82	15197	0	15305	0
15069	2	15199	2	15308	0
15070	44	15201	27	15315	33
15071	71	15203	23	15317	1
15073	0	15217	0	15328	0
15074	0	15223	0	15333	1
15075	0	15225	0	15341	0
15076	47	15231	203	15350	0
15078	21	15233	0	15353	0
15083	0	15236	0		
15085	46	15238	4		
15086	6	15239	29		

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, periodo 1981-2010.

Al considerar el promedio de temperatura media diaria para cuantificar los días con temperaturas inferiores a 10 °C en el estado de San Luis Potosí, se observa que en la gran mayoría de las estaciones del estado no se presentan bajas temperaturas (**Cuadro 2.8**). Únicamente cinco estaciones presentan días con temperaturas inferiores a 10 °C, siendo la 24160 (Coyotillos) la que presenta mayor cantidad, con 49 días.

Cuadro 2.8. Días por debajo de 10 °C en el estado de San Luis Potosí.

Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C
24002	0	24051	0	24100	0	24173	0
24003	0	24052	0	24101	0	24174	0

Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C	Clave de estación	Días por debajo de 10 °C
24004	0	24053	0	24103	0	24175	0
24005	0	24054	0	24105	0	24176	0
24006	0	24055	0	24106	0	24177	0
24007	3	24057	0	24107	0	24179	0
24008	0	24059	0	24108	0	24180	0
24009	0	24060	0	24110	0	24182	0
24011	0	24061	0	24111	0	24186	0
24013	0	24063	0	24113	0	24188	0
24014	0	24064	0	24114	0	24189	7
24015	0	24066	0	24122	0	24191	0
24016	0	24067	0	24125	0	24192	0
24017	0	24068	0	24133	0	24193	0
24020	0	24069	0	24136	0	24195	0
24022	0	24071	0	24137	0	24197	0
24024	0	24072	0	24139	0	24200	0
24025	0	24073	0	24142	0		
24026	0	24074	0	24144	0		
24027	0	24076	0	24145	7		
24028	0	24077	0	24146	3		
24031	0	24078	0	24148	0		
24033	0	24081	0	24149	0		
24035	0	24082	0	24150	0		
24036	0	24084	0	24151	0		
24038	0	24085	0	24152	0		
24039	0	24086	0	24156	0		
24040	0	24087	0	24157	0		
24042	0	24088	0	24160	49		
24043	0	24091	0	24163	0		
24045	0	24092	0	24164	0		
24046	0	24093	0	24165	0		
24047	0	24094	0	24168	0		
24048	0	24095	0	24170	0		
24049	0	24097	0	24171	0		
24050	0	24098	0	24172	0		

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, periodo 1981-2010

Asimismo, se consideró la temperatura media para contar el número de días con temperaturas superiores a 30 °C. Se obtuvo el promedio de la temperatura media diaria de cada estación en el periodo 1981-2010 para el Estado de México y San Luis Potosí, sin embargo, el Estado de México

no presentó temperaturas medias superiores a 30 °C. El **Cuadro 2.9** muestra el número de días con temperaturas superiores a los 30 °C para las estaciones del estado de San Luis Potosí. Se observa que la mayoría de las estaciones no presenta días por arriba de 30 °C, no obstante, 20 estaciones si presentan, siendo la estación 24088 (Tantizohuiche) la que tiene mayor cantidad (40).

Cuadro 2.9. Días por arriba de 30 °C en el estado de San Luis Potosí.

Clave de estación	Días por arriba de 30 °C	Clave de estación	Días por arriba de 30 °C	Clave de estación	Días por arriba de 30 °C	Clave de estación	Días por arriba de 30 °C
24002	8	24051	0	24100	0	24173	0
24003	14	24052	0	24101	0	24174	0
24004	0	24053	0	24103	0	24175	0
24005	19	24054	0	24105	0	24176	0
24006	0	24055	0	24106	0	24177	0
24007	0	24057	0	24107	0	24179	0
24008	0	24059	0	24108	4	24180	0
24009	0	24060	0	24110	0	24182	9
24011	0	24061	0	24111	0	24186	0
24013	0	24063	0	24113	5	24188	0
24014	0	24064	0	24114	0	24189	0
24015	4	24066	0	24122	0	24191	0
24016	0	24067	0	24125	0	24192	0
24017	56	24068	0	24133	5	24193	0
24020	3	24069	0	24136	0	24195	0
24022	0	24071	0	24137	2	24197	0
24024	0	24072	0	24139	18	24200	0
24025	24	24073	0	24142	0		
24026	8	24074	0	24144	0		
24027	0	24076	20	24145	0		
24028	13	24077	0	24146	0		
24031	0	24078	0	24148	0		
24033	0	24081	0	24149	29		
24035	0	24082	0	24150	0		
24036	20	24084	0	24151	0		
24038	0	24085	8	24152	0		
24039	0	24086	0	24156	1		
24040	0	24087	1	24157	0		
24042	0	24088	40	24160	0		
24043	0	24091	0	24163	0		
24045	0	24092	0	24164	0		

Clave de estación	Días por arriba de 30 °C	Clave de estación	Días por arriba de 30 °C	Clave de estación	Días por arriba de 30 °C	Clave de estación	Días por arriba de 30 °C
24046	0	24093	0	24165	0		
24047	0	24094	0	24168	0		
24048	0	24095	5	24170	0		
24049	0	24097	0	24171	0		
24050	0	24098	0	24172	0		

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, periodo 1981-2010.

### 2.3.2. Precipitación

La lluvia es un elemento que tiene variaciones de acuerdo con las regiones del país, por lo que en México pueden presentarse zonas con gran humedad y zonas secas (**Figura 2.30**).

De acuerdo con la cantidad de lluvia, se pueden clasificar varias regiones como sigue:

- El norte del país se describe como una región árida, ya que la precipitación anual es menor a los 400 mm. En las regiones cercanas a sitios montañosos el grado de aridez se da en menor grado.
- En el centro del país las precipitaciones anuales se encuentran entre los 600 y 1300 mm
- La parte sur de la República Mexicana se caracteriza por ser la más húmeda, ya que se presentan precipitaciones por arriba de los 2,000 milímetros anuales.

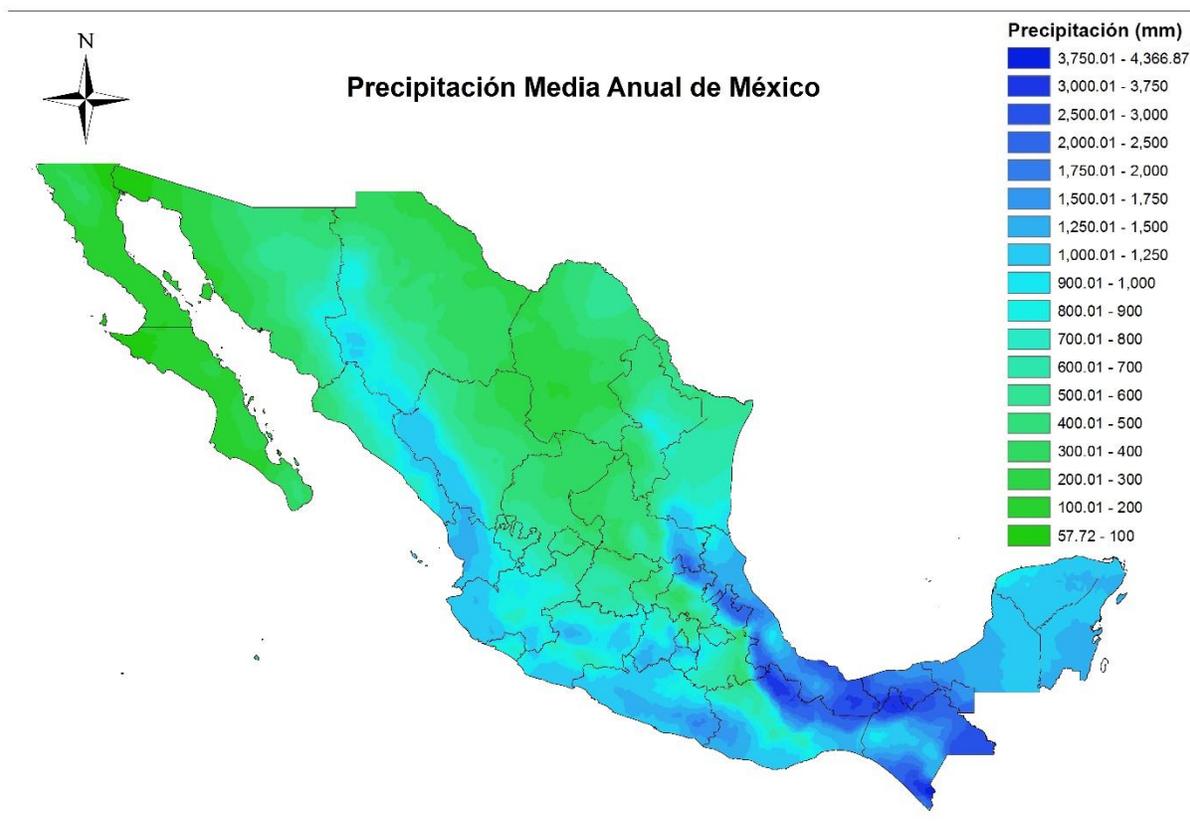


Figura 2.30. Variación de la precipitación media anual en la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

En el Estado de México, la precipitación media anual varía de 500 a 2000 mm (**Figura 2.31**). La zona con la menor precipitación (500 mm) se encuentra en el noreste este del estado, principalmente en las colindancias con los estados de Hidalgo y Tlaxcala. La mayor precipitación ocurre en el sur del estado, en las colindancias con el estado de Guerrero y en la región de Valle de Bravo, donde pueden precipitar hasta 2000 mm. En el centro del estado la precipitación varía de 600 a 1500 mm.

La precipitación media anual en el estado de Jalisco (**Figura 2.32**) varía de 400 a 2000 mm. En el norte del estado, así como en la región de los altos de Jalisco y una parte del centro, se presentan las precipitaciones más bajas, entre los 400 y 600 mm. En el sur del estado ocurren precipitaciones entre los 800 y 1250 mm. La mayor precipitación se presenta en la región cercana a la costa, donde llueve desde 900 hasta 2000 mm.

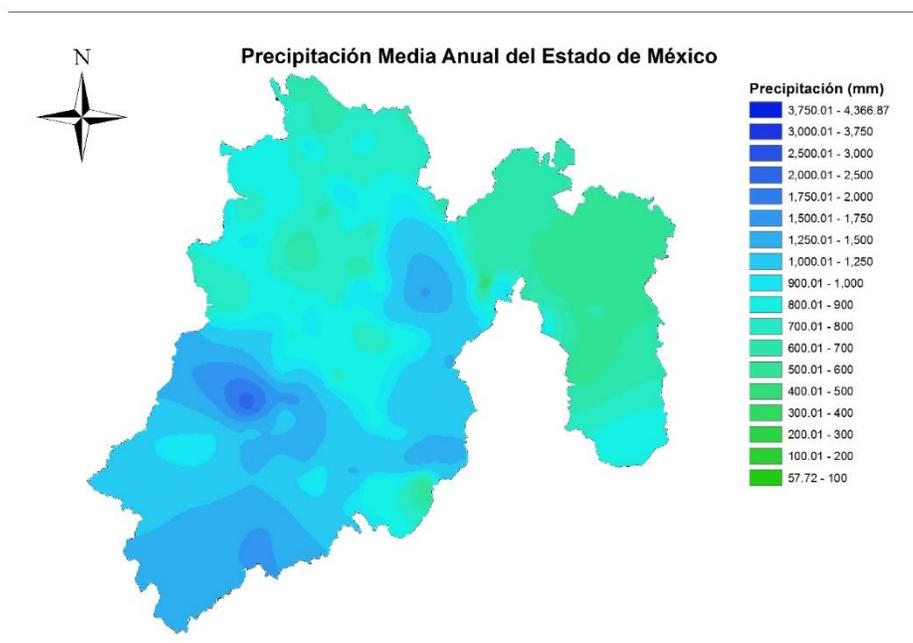


Figura 2.31. Precipitación media anual en el Estado de México.

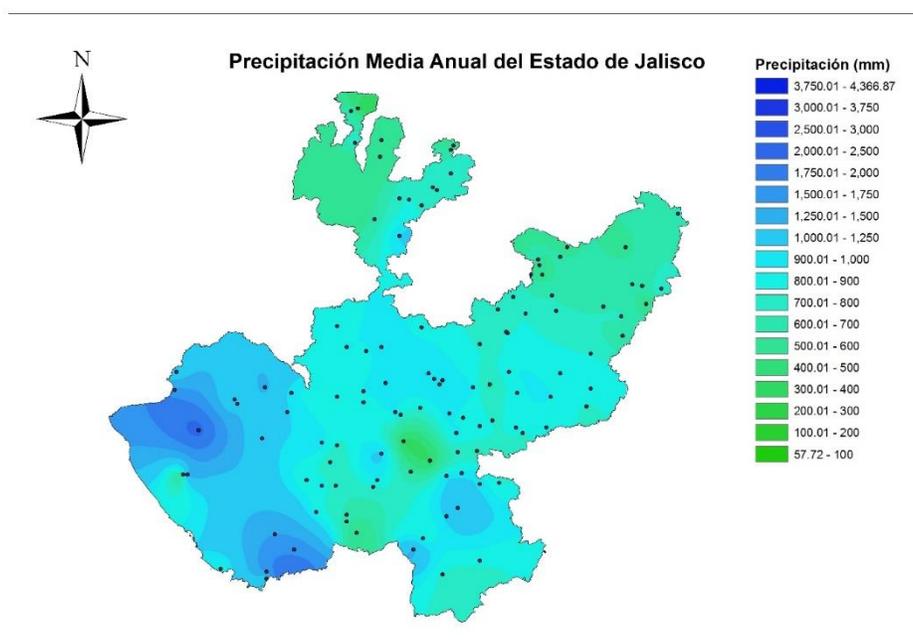


Figura 2.32. Precipitación media anual en el estado de Jalisco.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

En el estado de Michoacán (**Figura 2.33**) la mayor precipitación ocurre en la región de Mil Cumbres y una parte de la costa en la colindancia con el estado de Guerrero, donde la precipitación puede alcanzar los 1500 mm. Las zonas con menor precipitación se encuentran en el norte del estado, donde la precipitación mínima es de 500 mm al año.

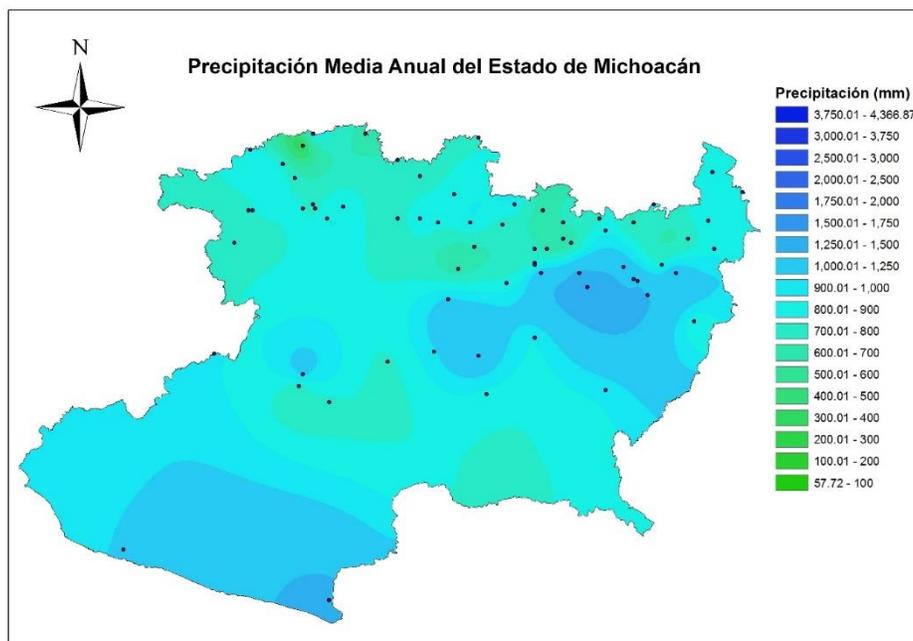


Figura 2.33. Precipitación media anual en el estado de Michoacán.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

El estado de San Luis Potosí presenta dos regiones contrastantes muy definidas donde la precipitación en la región más seca va de 50 a 800 mm y en la región más lluviosa ocurren de 900 a 3750 mm (**Figura 2.34**). La parte más seca del estado corresponde a la región media donde la menor precipitación es de 50 mm. Mientras que la parte más lluviosa se presenta en la Huasteca potosina, donde la precipitación puede alcanzar los 3750 mm.

La precipitación en el estado de Sinaloa (**Figura 2.35**) varía de 300 a 1250 mm, siendo la costa norte del estado la que presenta la menor precipitación. En el este y sur del estado, se presenta la mayor cantidad de lluvia, pudiendo llegar a los 1250 mm.

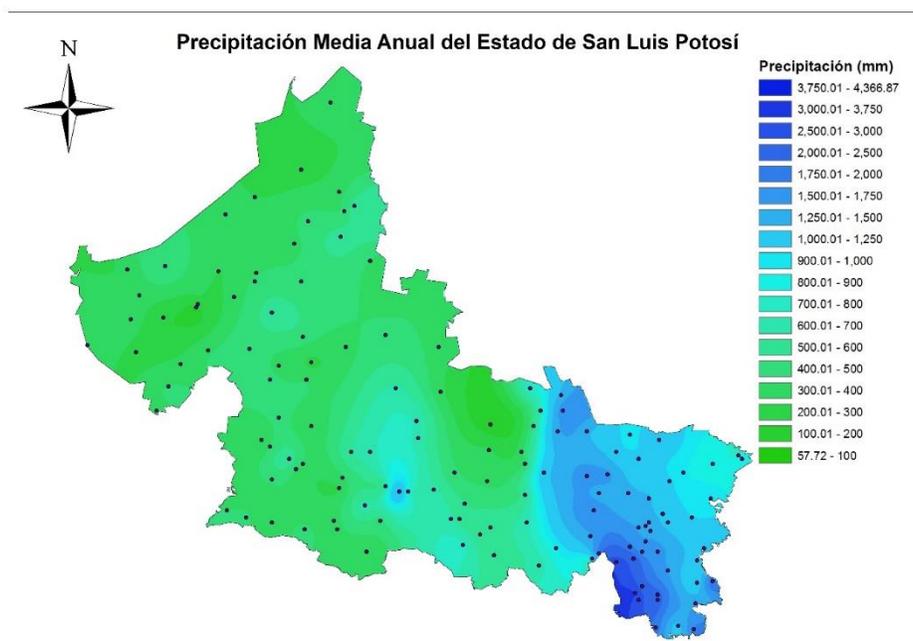


Figura 2.34. Precipitación media anual en el estado de San Luis Potosí.

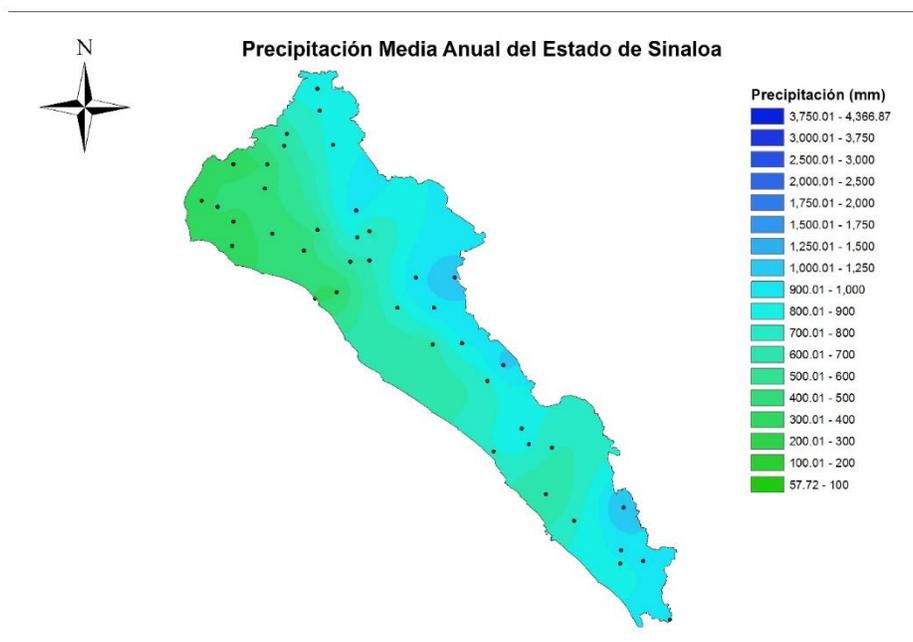


Figura 2.35. Precipitación media anual en el estado de Sinaloa.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

### 2.3.3. Viento

Los factores del clima asociados a la producción de cultivos en invernadero fueron descritos en los apartados anteriores (precipitación, temperatura máxima, mínima y promedio), sin embargo, las características del viento serán mencionadas en este apartado.

La información de la velocidad del viento fue tomada del reporte de estaciones del Laboratorio Nacional de modelaje y Sensores Remotos del INIFAP. Se consideraron los datos de la última lectura de cada estación ya que es la información reportada en el sitio de internet. En el **Cuadro 2.10** se muestran los resultados de la velocidad del viento en un estado de la república.

Cuadro 2.10. Velocidad y dirección del viento en el Estado de México.

Estación	Municipio	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento
CEVAMEX	Texcoco	2	178 °
			Sur
Coexapa	Xalatlaco	2	157 °
			Sureste
El Hospital	Villa Victoria	3	87 °
			Este
El Islote	Villa Guerrero	0	72 °
			Este
El Jacal	Temascalcingo	4	174 °
			Sur
El Mogote	Aculco	10	132 °
			Sureste
Fundación Sánchez Colín	Temascaltepec	1	112 °
			Este
La Asunción	Rayón Santa	1	76 °
			Este
La Concha	Ixtlahuaca	7	158 °
			Sureste
La Estancia	Zumpango	7	53 °
			Noreste
La Laguna	Acambay	4	94 °
			Este
La Providencia	Calimaya	0	178 °
			Sur
Loma de Juárez	Villa de Allende	4	3 °
			Norte
Mataxhi	Jilotepec	6	101 °
			Este
Ocampo	Timilpan	5	100 °

Estación	Municipio	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento
			Este
Paraje La Bomba	Lerma	4	212 °
			Suroeste
Pirámides	San Martín de las Pirámides	6	59 °
			Noreste
Rancho Ayacahuite	Ocuilan	4	147 °
			Sureste
Rancho los Cedros	Juchitepec	3	201 °
			Sur
San Antonio	Jilotepec	10	106 °
			Este
San José del Rincón	San Felipe del Progreso	5	103 °
			Este
San José del Río	Ixtlahuaca	3	2 °
			Norte
Santiago Casandeje	El Oro	3	198 °
			Sur
Temazcaltepec	Temascaltepec	1	118 °
			Sureste
Tiacaque	Jocotitlán	6	33 °
			Noreste

Fuente: INIFAP, 2017.

En la **Figura 2.36** se observa que las mayores velocidades del viento (superiores a los 3 km/h) ocurren en el norte y sureste del país. Las costas del pacífico sur presentan velocidades del viento menores a los 2 km/h.

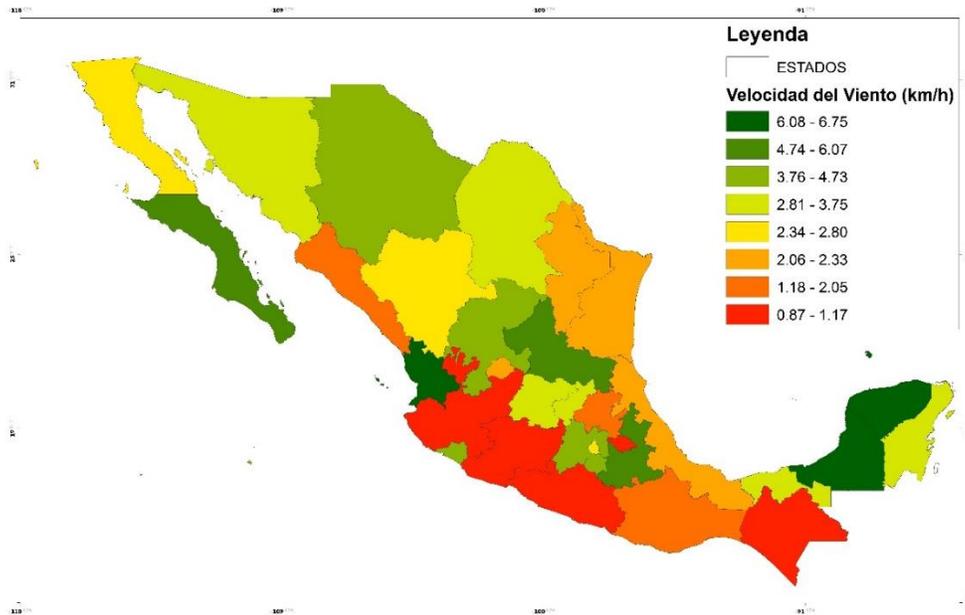


Figura 2.36. Velocidad del viento promedio en los estados de la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

La rosa de los vientos en el estado de México (**Figura 2.37**) muestra que la dirección del viento es muy variable, sin embargo, la dirección oeste no se presenta con mucha frecuencia. En el caso de San Luis Potosí (**Figura 2.38**) las direcciones predominantes son al sureste y suroeste.

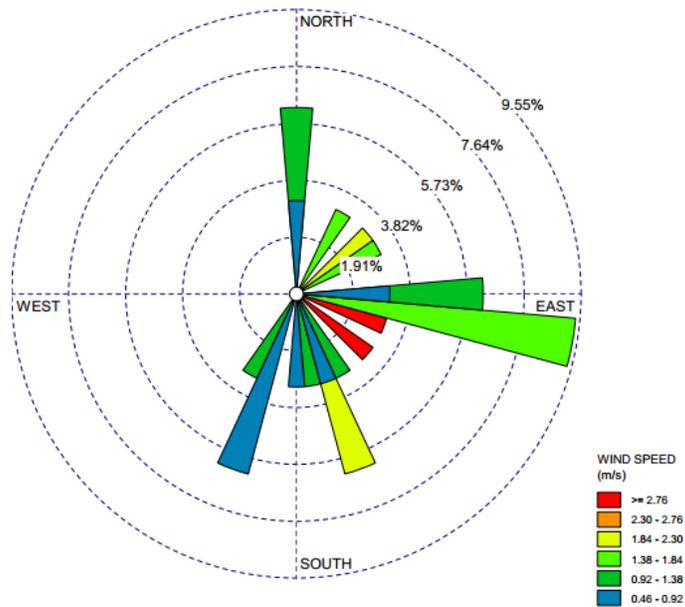


Figura 2.37. Rosa de los vientos para el Estado de México.

Fuente: Elaboración propia con datos del INIFAP, 2017.

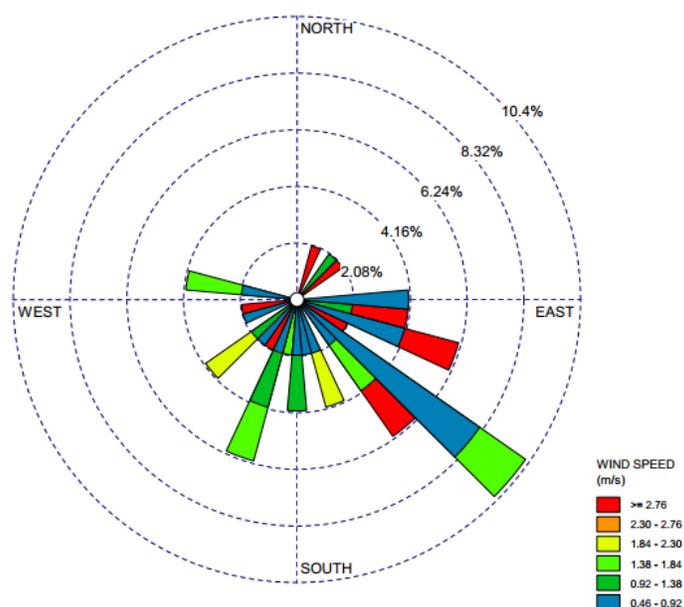


Figura 2.38. Rosa de los vientos para el estado de San Luis Potosí.

Fuente: Elaboración propia con datos del INIFAP, 2017.

## 2.4. Definición de indicadores

### 2.4.1. Captación de agua de lluvia

En este contexto se pone énfasis de respuesta a la limitante del recurso hídrico mediante suministro de agua de lluvia como fuente alterna de abastecimiento para el riego. Se estableció un coeficiente de escorrentía asociado al material de la superficie techada de la AP. Para un evento o periodo de lluvia en una cuenca o área de captación determinada, este coeficiente de escorrentía superficial ( $C_e$ ) expresa la relación (proporción o porcentaje) entre la magnitud de escorrentía y una determinada magnitud de lluvia (ambas expresadas en mm de lámina de agua), véase la siguiente expresión:

$$C_e = (\text{Escorrentia}(\text{mm})) / (\text{Lluvia}(\text{mm})) \quad (1)$$

Existen bastantes factores interrelacionados en un evento de lluvia que este coeficiente de escorrentía no resulta constante frente a una misma cantidad de lluvia y en la misma cuenca. Por ejemplo, una cuenca probablemente generará más escorrentía si ocurre una tormenta de mayor intensidad y menor duración que cuando ocurre una de menor intensidad y mayor duración, aunque la lluvia total (mm) sea la misma y se mantengan iguales todos los otros factores (Critchley, Siegert, Chapman, & Finkel, 1996).

También puede haber sectores con estructuras que afectan el desarrollo de la escorrentía, como partes impermeables y depresiones que almacenan agua. Cuanto mayor es la dimensión de la cuenca, mayor es la probabilidad de que la precipitación no sea uniforme territorialmente y que no ocurra lluvia en algunos sectores de la misma.

A continuación, se presentan tabulados los valores de referencia para el coeficiente de escorrentía (**Cuadro 2.11**) en diferentes tipos de superficies y coberturas (Adaptado de Chow, Maidment, and Mays (1988); Silva et al. (1984) citado por (Brito, Silva, Porto, Amorim, & Leite, 2007).

Cuadro 2.11. Coeficiente de escurrimiento para diferentes superficies de captación.

Tipos de superficie o coberturas del área de captación	Coeficiente de escorrentía (C)
Lámina plástica de polietileno	0,90
Mortero (mezcla de cemento y arena)	0,88
Asfalto	0,88
Tejas de arcilla recocida	0,75
Manta plástica + grava	0,70
Suelo de textura fina (arcilloso), emparejado con lámina	0,55
Suelo de textura fina (arcilloso), en barbecho	0,24
Suelo de textura gruesa (arenoso)	0,20
Pasto buñel ( <i>Cenchrus ciliaris</i> )	0,15
Áreas cultivadas	0,08 – 0,41
Pastos	0,12 – 0,62
Techos	0,75 – 0,95
Hormigón	0,70 – 0,95

Fuente: FAO (2013).

En el caso que nos ocupa (agricultura protegida) se adopta un valor de 0.90. Por la magnitud de superficie se considera un valor estable para toda el área de captación. Para fines de investigación es importante resaltar la necesidad de obtener coeficientes de escorrentía para los diferentes tipos de materiales y superficies de la agricultura protegida en México (Gómez, L. 2017).

La variabilidad de la información entre valores promedios de la precipitación (mensual y por año) está asociado al coeficiente de variación ( $C_v$ ). Este coeficiente es resultado de dividir la desviación estándar entre el promedio, en tanto del conjunto de datos de precipitación es necesario conocer y calcular las siguientes variables:

- Promedio
- Varianza
- Desviación estándar

El promedio,  $\mu$  es la suma del conjunto de datos entre el número total del conjunto de datos.

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (X)$$

Donde

$x_i$  = Valor del conjunto de datos, pe, precipitación mensual.

$\mu$  = media del conjunto de datos

$n$  = total del conjunto de datos

La Varianza (cuadrado de la desviación estándar),  $\sigma^2$  se define como la media de las diferencias con la media elevadas al cuadrado. La varianza es una medida de dispersión que calcula las desviaciones respecto a la media de una distribución estadística (conjunto de datos).

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{n} \quad (X)$$

Donde

$\sigma^2$  = Varianza

La desviación estándar,  $S$  representa la magnitud de la dispersión de las variables dentro de un intervalo de razón. Para su cálculo se obtiene la raíz cuadrada de la varianza.

$$S = \sqrt{\sigma^2} = \sigma \quad (4)$$

Donde:

$S$  = Desviación estándar

El coeficiente de variación es el resultado de dividir la desviación estándar entre el promedio del conjunto de datos.

$$C_v = \frac{S}{\mu} \quad (5)$$

El objetivo de considerar este coeficiente de variación es validar la confiabilidad de utilizar valores promedios de precipitación entre periodos de análisis, por ejemplo, las normales climatológicas o periodos de 20 y 24 años.

#### 2.4.2. Rendimientos

Las inferencias sobre el rendimiento de un cultivo pueden lograrse mediante el análisis de las variables climáticas de precipitación y temperatura relacionadas con las etapas fenológicas del cultivo y determinando las acciones directas o indirectas que tienen dichos factores en el desarrollo de la planta (SIAP, 2017b).

De acuerdo con el SIAP, la producción acumulada de tomate rojo en el país a septiembre fue de 2 millones 100 mil toneladas, lo que representa 16.3% de incremento respecto de la obtenida el año previo. A nivel, nacional tres entidades concentran alrededor de 52% de la producción nacional (**Cuadro 2.12**), Sinaloa que se mantienen como el principal productor aporta 35% del total, seguida por San Luis Potosí, que produce 10%, y Zacatecas que genera 7 por ciento (SIAP-SAGARPA, 2017).

Cuadro 2.12. Producción de tomate rojo, años agrícolas 2016-2017. Avance a septiembre de 2017 (Miles de toneladas)

Estado	Producción acumulada a septiembre (miles de ton)		Variación %anual	Participación %2017
	2016	2017		
	1,805.80	2,100.10	16.3	100
Sinaloa	551.1	744.8	35.2	35.5
San Luis Potosí	179.8	201.1	11.8	9.6
Zacatecas	132.4	140.1	5.8	6.7
Sonora	95.5	109.6	14.8	5.2
Baja California Sur	78.2	80.1	2.4	3.8
Queretaro	64.3	77.7	20.7	3.7
Oaxaca	56.9	73.7	29.5	3.5
Michoacan	83.1	71.6	-13.8	3.4
Jalisco	78.4	70.6	-10	3.4
Baja California	95.2	68.8	-27.7	3.3
Coahuila	67.9	64.8	-4.5	3.1
México	47.9	58.1	21.3	2.8
Resto	275.1	339	23.3	16.1

Fuente: Boletín mensual de la producción (SIAP-SAGARPA, 2017).

Con la producción en invernadero se logra proporcionar a la planta las condiciones adecuadas para el crecimiento y desarrollo, lo que repercute en un aumento del rendimiento y calidad del fruto. En invernadero de alta tecnología se pueden obtener rendimientos promedio de 342 toneladas por hectárea, mientras que, en invernaderos tipo parral, pueden obtenerse 48 cortes que corresponden a 8 cortes por mes, obteniéndose un rendimiento total de 244.8 ton/ha (Navarro-Urbina, 2011).

Por otra parte, según (Cockshull, 1988) durante la fase productiva el rendimiento del tomate es proporcional a la integral de radiación solar correspondiendo aproximadamente una pérdida del uno por ciento de la producción a una disminución de cada uno por ciento de la radiación disponible.

Los rendimientos también dependen de la concentración de CO<sub>2</sub> y de la temperatura del aire. En verano los altos niveles de radiación pueden afectar negativamente los rendimientos en áreas geográficas de alta radiación lo cual puede obligar a la necesidad de realizar sombreado de los cultivos. Por el contrario, en períodos de baja radiación, la luz artificial puede ser un recurso técnico aceptable para aumentar los rendimientos (Iglesias, 2015).

Se recomienda una densidad de plantas de jitomate por metro cuadrado bajo invernadero del orden de dos a cuatro. En la **Figura 2.39** se delimitan cuatro intervalos: en el I y II ocurren aumentos crecientes de rendimiento al aumentar la densidad (de una a tres o cuatro plantas por

metro cuadrado); en el intervalo III la producción ya no crece, pero se logra una mayor precocidad en la cosecha (tres a cinco plantas por metro cuadrado). En el intervalo IV la alta densidad de plantas genera competencia por luz, además prosperan las plagas y enfermedades, el rendimiento y calidad de frutos decrecen (más de seis plantas por metro cuadrado) (Zamudio-González & Flores-López).

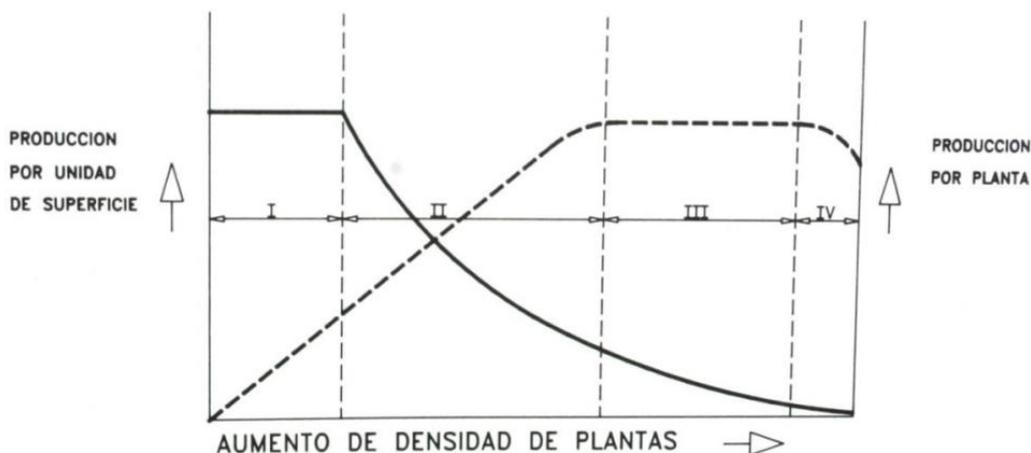


Figura 2.39. Densidad de planta de jitomate por metro cuadrado y rendimiento.

Con un manejo correcto de la densidad de plantas en el invernadero, aunado al correcto uso de las instalaciones se pueden lograr excelentes rendimientos. La superficie cosechada y el número de instalaciones puede ser un buen indicador para determinar la productividad de una zona. En el **Cuadro 2.13** se muestra la superficie de agricultura protegida y el tipo de instalaciones que la comprenden, para el estado de San Luis Potosí. Se observa que la principal estructura utilizada en este estado (por superficie cosechada) es la Casa sombra, representando el 68.8% de la superficie cosechada total de agricultura protegida en el estado.

Cuadro 2.13. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en San Luis potosí para el año 2014.

Tipo de instalación	Suma de Superficie cosechada al momento de la visita (Ha)	Suma de Num. de Instalaciones
Casa sombra	329.738	101
Invernadero	137.066	209
Macrotunel	7.12	15
Microtunel	0.037	2
Techo sombra	5	1

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.

Así mismo, para el Estado de México, se muestra la superficie cosechada, el tipo y número de instalaciones (**Cuadro 2.14**). Se observa que en este estado la principal estructura de agricultura protegida empleada en la producción de jitomate es el invernadero, representando más del 95% de la superficie total de agricultura protegida en el estado.

Cuadro 2.14. Superficie de agricultura protegida para cultivo de jitomate en el Estado de México para el año 2014.

Tipo de instalación	Suma de Superficie cosechada al momento de la visita (Ha)	Suma de Núm. de Instalaciones
Invernadero	96.47	864
Macrotunel	3.881	182
Microtunel	0.936	13
Pabellón	0.02	1
Techo sombra	0.157	4
Vivero	0.05	1

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, 2017.

De acuerdo con (Ponce-Cruz, 2017), la tecnología de la agricultura protegida en México se sitúa entre baja, media y alta. El 79 % de la superficie cultivada en agricultura protegida es de media-alta tecnología, mientras que el 17% tiene tecnología media y un 5% presenta baja tecnología.

Los rendimientos de jitomate en invernaderos de baja tecnología son cercanos a las 120 toneladas por hectárea (t/ha), mientras que en los de tecnología media el rendimiento oscila entre las 200 a 250 t/ha y con alta tecnología se pueden obtener hasta 600 t/ha.

En el **Cuadro 2.15** se muestran los rendimientos de tomate bola en invernadero para todos los estados de la república donde se realiza agricultura protegida. Se observan rendimientos muy bajos en los estados de Baja California y Baja California Sur, mientras que, en los estados de Zacatecas, Estado de México y Coahuila se tienen rendimientos superiores a las 200 ton/ha.

Cuadro 2.15. Producción agrícola de tomate bola en invernadero por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California	16.25	16.25	1,411.06	86.83	19,841.62	27,997.72
Baja California Sur	20	17	876.86	51.58	8,410.29	7,374.65
Chihuahua	0.59	0.42	38	90.48	11,464.74	435.66

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Coahuila	3	3	606.46	202.15	8,174.20	4,957.33
Colima	1.79	1.79	274.23	153.2	4,380.00	1,201.13
Guanajuato	111.93	111.93	20,208.44	180.54	4,442.73	89,780.71
Hidalgo	1	1	186	186	6,831.72	1,270.70
Jalisco	207	207	20,613.42	99.58	10,015.26	206,448.84
México	84.75	84.75	34,311.25	404.85	6,099.58	209,284.23
Nuevo León	2	2	344	172	6,000.00	2,064.00
Sinaloa	788	788	106,104.55	134.65	3,680.04	390,469.48
Sonora	177	177	35,091.00	198.25	4,414.78	154,918.87
Zacatecas	37.7	37.7	12,272.56	325.53	11,105.73	136,295.78
	<b>1,451.01</b>	<b>1,447.84</b>	<b>232,337.83</b>	<b>160.47</b>	<b>5,304.77</b>	<b>1,232,499.09</b>

Fuente: SIAP (2017a).

Respecto a la producción en malla sombra, se observa que los rendimientos son ligeramente inferiores a los obtenidos en invernadero. De los estados que presentan estructuras de malla sombra (**Cuadro 2.16**), se observa que Sonora presenta mayores rendimientos, sin embargo, es Sinaloa es estado con mayor producción.

Cuadro 2.16. Producción agrícola de tomate bola en malla sombra por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California Sur	30	30	2,130.36	71.01	7,057.29	15,034.56
Sinaloa	1,138.50	1,138.50	121,764.50	106.95	3,684.17	448,601.09
Sonora	52.46	52.46	10,608.66	202.22	8,902.93	94,448.14
Zacatecas	22	22	3,140.00	142.73	4,554.36	14,300.68
	<b>1,242.96</b>	<b>1,242.96</b>	<b>137,643.52</b>	<b>110.74</b>	<b>4,158.46</b>	<b>572,384.47</b>

Fuente: SIAP (2017a).

La producción de tomate saladette es mayor a la de tomate bola, sin embargo, el rendimiento de ambas variedades es similar. La diferencia en la producción de estas dos variedades se debe a que el tomate saladette tiene mayor superficie sembrada y cosechada (Cuadro 2.17).

Cuadro 2.17. Producción agrícola de tomate saladette en invernadero por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California	18.75	18.75	1,780.00	94.93	15,593.15	27,755.80
Baja California Sur	3.16	3.16	214.88	68	6,900.00	1,482.67
Chiapas	45	45	3,150.00	70	6,722.22	21,175.00
Chihuahua	4	4	507.5	126.88	9,721.00	4,933.41
Ciudad de México / D.F.	1.5	1.5	126.05	84.03	8,150.08	1,027.32
Coahuila	444	444	63,038.41	141.98	6,415.05	404,394.39
Colima	142.14	142.14	14,760.46	103.84	6,169.63	91,066.56
Durango	73.89	73.89	10,705.16	144.88	8,121.76	86,944.70
Guanajuato	294.71	294.71	42,625.27	144.64	4,518.99	192,623.24
Guerrero	149.62	149.62	3,277.34	21.9	7,176.22	23,518.92
Hidalgo	143.93	143.93	25,847.46	179.58	6,571.98	169,869.08
Jalisco	458.98	458.98	55,242.44	120.36	7,957.77	439,606.70
Michoacán	120	120	17,331.00	144.42	5,468.11	94,767.82
Morelos	130.4	130.4	30,854.10	236.61	7,185.04	221,688.01
México	159.14	159.14	25,396.49	159.59	8,656.48	219,844.17
Nayarit	55	55	13,743.22	249.88	5,185.35	71,263.34
Nuevo León	93	93	22,756.00	244.69	8,400.49	191,161.62
Oaxaca	384.79	384.79	84,376.46	219.28	7,335.36	618,931.52
Puebla	575.52	575.52	111,382.17	193.53	6,480.94	721,861.51
Querétaro	154.68	154.68	82,107.55	530.82	6,046.46	496,460.24
Quintana Roo	7.24	6.24	380.01	60.9	10,456.05	3,973.40
San Luis Potosí	240.5	240.5	47,177.70	196.16	7,366.51	347,535.00
Sinaloa	267	267	34,323.96	128.55	4,863.58	166,937.43
Sonora	120.26	120.26	24,703.74	205.42	5,911.29	146,030.90
Tamaulipas	100	100	9,000.00	90	11,511.11	103,600.00
Tlaxcala	23	23	3,910.00	170	10,000.00	39,100.00
Yucatán	0.92	0.92	31.14	33.85	5,967.57	185.83
Zacatecas	203.07	193.07	34,420.86	178.28	7,374.62	253,840.91
	4,414.20	4,403.20	763,169.37	173.32	6,763.35	5,161,579.50

Fuente: SIAP (2017a).

El tomate saladette también se produce de manera significativa bajo malla sombra (Cuadro 2.18). El estado con mayor superficie sembrada y cosecha de tomate saladette en malla sombra es Sinaloa, con más de 1600 hectáreas.

Cuadro 2.18. Producción agrícola de tomate saladette en malla sombra por estado.

Ubicación	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	PMR	Valor Producción
	(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
Baja California Sur	730.25	730.25	54,358.00	74.44	8,481.47	461,035.93
Chiapas	138.65	138.65	9,107.75	65.69	6,648.67	60,554.45
Chihuahua	16	16	1,920.00	120	8,500.00	16,320.00
Coahuila	160	160	27,057.40	169.11	7,145.00	193,325.12
Durango	75	75	12,765.00	170.2	7,737.29	98,766.51
Guanajuato	7.3	7.3	1,058.50	145	4,035.00	4,271.05
Guerrero	1.19	1.19	22.18	18.64	7,387.01	163.84
Jalisco	20	20	1,047.20	52.36	8,299.57	8,691.31
Nuevo León	1	1	174	174	5,162.07	898.2
San Luis Potosí	192	192	36,260.00	188.85	6,856.54	248,618.17
Sinaloa	1,602.50	1,602.50	150,935.78	94.19	3,998.35	603,494.58
Sonora	288	280.5	32,168.53	114.68	5,857.11	188,414.46
Yucatán	0.36	0.36	6	16.67	7,500.00	45
Zacatecas	19	19	2,670.00	140.53	6,819.83	18,208.95
	<b>3,251.25</b>	<b>3,243.75</b>	<b>329,550.34</b>	<b>101.6</b>	<b>5,773.95</b>	<b>1,902,807.57</b>

Fuente: SIAP (2017a).

## 2.5. Usos potenciales

La capacidad de producción en las zonas agrícolas está determinada por las condiciones del clima, suelo, fisiografía uso y manejo de tierras. Actualmente la optimización del uso de la tierra se ha vuelto más necesaria dado el incremento de la población y su expansión territorial. Al clasificar la tierra conforme al potencial para diferentes tipos de utilización puede satisfacer la demanda cada vez mayor de intensificación de cultivos y la bonificación de nuevas tierras sin perjuicio para el medio ambiente (FAO, 1985) citado por (Sotelo, González, Cruz, Martínez, & Flores, 2012).

Sotelo et al. (2012) menciona que la zonificación de cultivos con el uso de SIG y programas de cómputo se ha desarrollado con la aplicación de estos sistemas en la generación de modelos de

bases de datos de clima y suelo. La utilidad de estos programas se debe a la rapidez con la que se elaboran los mapas de adaptabilidad reduciendo el tiempo de obtención de resultados.

Los sistemas de información geográfica (SIG) han facilitado los estudios de potencial productivo de cultivos. En tiempos anteriores la elaboración de los mapas de potencial productivo de cultivos se hacía manualmente, requiriendo la participación de varias personas para su realización y varias semanas de trabajo. Con el empleo de los SIG, este proceso se reduce a uno o dos días y los mapas obtenidos son de mayor precisión.

“La zonificación agroecológica es la división de la superficie de la tierra en unidades más pequeñas, con características lo más similares u homogéneas posibles, en relación con su aptitud y producción potencial” (Díaz et al., 2012). Los elementos esenciales para la determinación de una zona agroecológica son: el periodo de crecimiento, la temperatura y el suelo (FAO, 1997).

Con la zonificación agroecológica se puede implementar una agricultura productiva, que conlleve menores riesgos y que no afecte al ambiente. Esto se debe a que la producción de un cultivo en condiciones ambientales favorables reduce los costos de producción y además incrementa el rendimiento y la calidad de los productos agrícolas (Ruiz et al., 1999).

Las metodologías para la identificación del potencial productivo son escasas y están basadas en los requerimientos de clima, suelo y fisiografía para la delimitación del potencial de las especies vegetales.

Se han realizado estudios de aptitud agroecológica a nivel nacional (Ortiz, 1987) y se han propuesto metodologías para la identificación y delimitación de provincias agronómicas para cultivos básicos, considerando ésta última la precipitación, evaporación y profundidad del suelo (Turrent, 2009).

#### 2.5.1. Potencial climático

La temperatura afecta al desarrollo del cultivo en todas sus fases de crecimiento. Los procesos fisiológicos de las plantas se aceleran a medida que la temperatura aumenta dentro de un rango óptimo de temperaturas. Además, es más sencillo contrarrestar los efectos negativos de las altas temperaturas con un buen manejo del cultivo que los causados por bajas temperaturas o heladas.

Para el potencial climático se consideró como superficie potencial aquellas zonas en las que la temperatura máxima anual fuera inferior a 30 °C y superior a 10 °C de temperatura mínima. La **Figura 2.40** muestra la superficie potencial para el cultivo de jitomate considerando únicamente la temperatura, el color verde representa las zonas potencialmente aptas.



Figura 2.40. Potencial debido a temperaturas en la República Mexicana.

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

La zonificación agrícola es un apoyo fundamental en la planeación agropecuaria, en la cual se delimitan zonas geográficas aptas para el desarrollo de cultivos (Romo & Arteaga, 1983). En la determinación del potencial productivo se han realizado modelados de diferentes requerimientos de los cultivos en cuanto a clima, suelo, altura y pendiente (Sotelo et al., 2012) y se han considerado cultivos representativos de los estados o lo que presentan mayor demanda.

#### 2.5.2. Potencial hídrico

Las necesidades hídricas de los cultivos dependen de varios factores como las condiciones climáticas, estado fenológico, tipo de sustrato, etc. Uno de los factores más importantes para determinar el consumo de agua por parte de los cultivos es el grado de transpiración. Por tal motivo, se han desarrollado ecuaciones para predecir las necesidades hídricas de los cultivos (Alarcón & Egea, 2000).

Con el riego se debe aplicar la cantidad justa para cubrir el consumo de agua del cultivo. Un exceso de agua de riego supone el lavado de fertilizantes, y en el caso de suelos arcillosos puede provocar asfixia radicular por falta de aireación de las raíces. Una aportación de agua inferior al consumo de agua del cultivo puede llegar a provocar déficit hídrico y por tanto una reducción de la producción.

El consumo de agua de los cultivos bajo invernadero se calcular a partir de datos climáticos de:

- Radiación solar
- Temperatura

Para un mismo estado de desarrollo, el consumo agua de un cultivo es mayor en primavera que en invierno debido a que la radiación solar también es mayor.

La temperatura influye en el ritmo de desarrollo del cultivo, y por tanto en el ritmo de consumo de agua. Por ejemplo, un cultivo de melón cuando se trasplanta en enero tiene un crecimiento más lento que cuando el trasplante se realiza en marzo, debido a las bajas temperaturas que se registran durante los meses de enero y febrero. Así, el consumo de agua, para el melón trasplantado en enero, es de aproximadamente 0,5 litros/m<sup>2</sup> día durante un período de dos meses, mientras que para el melón trasplantado en marzo este período es tan sólo de un mes (Cajamar, 2005).

Se ha planteado la necesidad de establecer la factibilidad de que un cultivo sea hídricamente sustentable tomando en cuenta el agua de lluvia que sería necesaria para su operación, sin requerir el aporte de otras fuentes o reservas acuíferas que afecten las necesarias en otras actividades, presentes o futuras (Leal-Iga, 2015).

Leal-Iga (2015) estableció la factibilidad en sustentabilidad hídrica (FHS) para invernaderos, que consiste en calcular el área de captación de agua de lluvia que se requiere para operar una hectárea de invernadero con cultivo de jitomate (ha/ha). La Ecuación X representa el modelo para el cálculo de la FHS:

$$FHS = \frac{A_{R/ha}}{A_{presip} \beta} \quad (X)$$

Donde FHS es la factibilidad en sustentabilidad hídrica, ha/ha;  $A_{R/ha}$  es el agua requerida para cultivar el tomate, m<sup>3</sup>/ha/año;  $A_{presip}$  la precipitación promedio anual y  $\beta$  la constante de conversión de unidades = 10 (de mm de lluvia por hectárea a m<sup>3</sup>).

El agua requerida para cultivar tomate en invernaderos se calcula mediante la Ecuación X

$$A_{R/ha} = T_D T_{Ri} \eta \quad (X)$$

Donde  $T_D$  es la densidad de cultivo de tomate (plantas/m<sup>2</sup>),  $T_{Ri}$  es el riego, L/día/p;  $\eta$  es la constante de conversión de unidades = 3650 (de m<sup>2</sup> a ha, litro a m<sup>3</sup> y día a año).

De esta forma, un valor de FHS=1 indica que se requiere un área de captación de una hectárea para que sea factible sostener hídricamente la operación de una hectárea de cultivo de tomate en invernadero. Valores de FHS superiores a 1 indican mayores dificultades para sostener hídricamente una hectárea de jitomate en invernadero.

Para calcular la FHS del cultivo de jitomate considerando una densidad de cultivo de 4 plantas/m<sup>2</sup>, se emplearon diferentes cantidades de riego ( $T_{Ri}$ ) en el rango de 0.2 a 2.0 litros/día/planta considerando diferentes valores de precipitación que ocurren en la república mexicana. El **Cuadro 2.19** es de doble entrada, representando el valor de FHS al combinar una precipitación determinada con una cantidad de riego para el cultivo de tomate con la densidad de cultivo mencionada.

Cuadro 2.19. FHS para diferentes cantidades de riego y precipitación.

Precipitación (mm)	Tri (L/día/p)									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
50	5.840	11.680	17.520	23.360	29.200	35.040	40.880	46.720	52.560	58.400
100	2.920	5.840	8.760	11.680	14.600	17.520	20.440	23.360	26.280	29.200
200	1.460	2.920	4.380	5.840	7.300	8.760	10.220	11.680	13.140	14.600
300	0.973	1.947	2.920	3.893	4.867	5.840	6.813	7.787	8.760	9.733
400	0.730	1.460	2.190	2.920	3.650	4.380	5.110	5.840	6.570	7.300
500	0.584	1.168	1.752	2.336	2.920	3.504	4.088	4.672	5.256	5.840
600	0.487	0.973	1.460	1.947	2.433	2.920	3.407	3.893	4.380	4.867
800	0.365	0.730	1.095	1.460	1.825	2.190	2.555	2.920	3.285	3.650
1000	0.292	0.584	0.876	1.168	1.460	1.752	2.044	2.336	2.628	2.920
1200	0.243	0.487	0.730	0.973	1.217	1.460	1.703	1.947	2.190	2.433
1500	0.195	0.389	0.584	0.779	0.973	1.168	1.363	1.557	1.752	1.947
2000	0.146	0.292	0.438	0.584	0.730	0.876	1.022	1.168	1.314	1.460
2500	0.117	0.234	0.350	0.467	0.584	0.701	0.818	0.934	1.051	1.168
3000	0.097	0.195	0.292	0.389	0.487	0.584	0.681	0.779	0.876	0.973
3500	0.083	0.167	0.250	0.334	0.417	0.501	0.584	0.667	0.751	0.834
4000	0.073	0.146	0.219	0.292	0.365	0.438	0.511	0.584	0.657	0.730
4500	0.065	0.130	0.195	0.260	0.324	0.389	0.454	0.519	0.584	0.649

Fuente: Elaboración propia basado en Leal-Iga (2015)

En la **Figura 2.41** se puede observar que, a un aumento del riego aplicado en condiciones de igual precipitación, se tienen aumentos en los valores de FHS. Asimismo, los aumentos en la precipitación manteniendo el riego aplicado generan disminución en el FHS. Se puede observar que para valores por encima de los 3000 mm el FHS es menor a 1 ha/ha para todas las cantidades de riego aplicado en el intervalo de 0.2-2.0 L/día/p. Es decir, que en aquellas zonas donde la precipitación es superior a los 3000 mm se tiene la cantidad de agua suficiente para mantener el cultivo todo el año, siempre y cuando el riego no sea superior a 2.0 L/día/p.

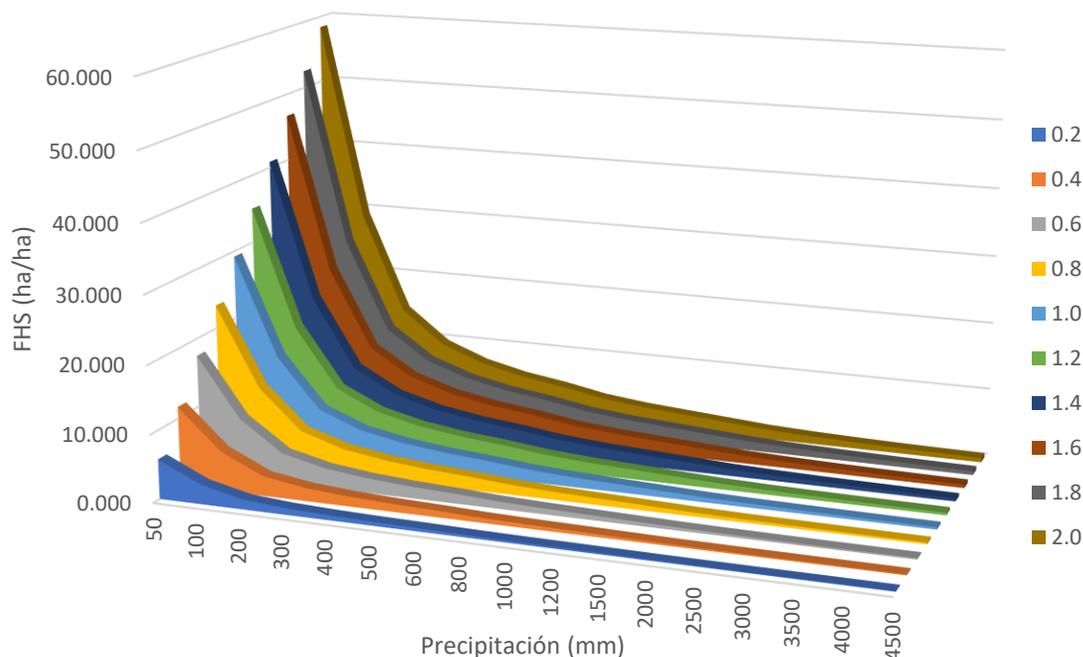


Figura 2.41. Variación de la FHS en función de la precipitación (mm) y el riego aplicado (L/día/p).

La cantidad de agua aplicada en el riego depende de las condiciones climáticas locales. Para calcular la FHS en las estaciones de los cinco estados analizados, se consideró 1 L/día/p como cantidad de agua de riego aplicado, así como una densidad de cultivo de 4 plantas/m<sup>2</sup> y la precipitación de cada estación. En el **Cuadro 2.20** se observa que la mayor parte de las estaciones en el Estado de México presentan valores entre 1 y 2, lo que indica que el agua captada no es suficiente para mantener las necesidades hídricas del cultivo. Sin embargo, el agua captada ayuda a reducir considerablemente el consumo de agua subterránea o de otras fuentes.

Cuadro 2.20. FHS para las estaciones del Estado de México, considerando un  $T_{Ri}=1$  L/día/p.

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
15002	ACULCO (SMN)	2.23	15073	PRESA GUADALUPE	2.06
15008	ATENCO	2.53	15074	PRESA LA CONCEPCION	2.02
15010	ATOTONILCO	1.72	15075	PRESA LAS RUINAS	1.73
15014	CAPULHUAC	1.43	15076	PRESA TEPETITLAN	1.95
15016	COATEPEC HARINAS	1.24	15077	PRESA TOTOLICA	1.44
15020	CHALCO -SAN LUCAS-	2.54	15078	PRESA FRANCISCO TRINIDAD FAB	2.13
15022	CHICONAUTLA	2.78	15081	REPRESA EL ALEMAN	2.20
15024	PRESA DANXHO	1.64	15083	SAN ANDRES	2.61
15025	EJIDO DE LLANO GDE	1.53	15084	SAN ANDRES TIMILPAN	1.49
15026	ENYEJE	1.87	15085	SAN BARTOLO DEL LLANO	1.95

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
15028	EL TAJO -TUNEL VIEJO-	2.30	15086	SAN BERNABE	1.72
15029	EL TEJOCOTE	1.67	15088	SAN FRANCISCO OXTOTILPAN	0.94
15030	HACIENDA LA Y	1.72	15089	SAN FRANCISCO TLALCILALCALPAN	1.79
15037	JIQUIPILCO	1.74	15090	SAN JERONIMO XONOCAHUACAN	2.64
15038	JOQUICINGO	1.52	15093	SAN LORENZO MALACOTA	1.61
15039	JUCHITEPEC	1.87	15098	SAN MARTIN OBISPO	2.10
15041	GRAN CANAL	2.51	15099	SAN MATEO ACUITLAPILCO	2.42
15044	LA GRANDE	2.54	15100	SAN MATEO TECOLOAPAN	3.81
15045	LA MARQUESA	1.11	15103	SAN PEDRO NEXAPA	1.73
15047	LAS ARBOLEDAS	1.70	15104	SAN PEDRO POTLA	1.75
15051	LOS VELAZQUEZ	1.59	15108	SANTA MARIA DEL MONTE	1.67
15055	MAQUIXCO	2.62	15112	SANTIAGO YECHE	1.98
15057	MIMIAPAN	1.33	15115	SANTO TOMAS PUENTE COLGANTE	2.33
15058	MOLINITO	1.61	15118	TEMASCALTEPEC	1.22
15059	MOLINO BLANCO	1.69	15119	TEMOAYA	1.45
15061	NEZAHUALCOYOTL	1.54	15122	TENANGO	1.80
15062	NEVADO DE TOLUCA	1.19	15126	TOLUCA (OBS)	1.69
15063	NUEVA SANTA ELENA	1.83	15127	TOTOLICA SAN BARTOLO	1.64
15064	OXTHOC	2.08	15128	TULTENANGO	1.96
15065	OTUMBA	2.89	15129	TULTEPEC	2.34
15066	PALIZADA	1.96	15134	VIVERO LA PAZ	1.71
15069	POLOTITLAN	2.12	15145	PLAN LAGO DE TEXCOCO	2.51
15070	PRESA BROCKMAN	1.61	15158	SAN PEDRO DE LOS BAÑOS	2.13
15071	PRESA EL TIGRE	1.68	15160	SANTIAGO DEL MONTE	1.51
15170	CHAPINGO (DGE)	2.41	15260	SAN LUCAS TOTOLMALOYA	2.02
15173	AHUATENCO	1.19	15261	EL JAZMIN	1.93
15174	PALO MANCORNADO	1.54	15264	BUENOS AIRES	2.33
15183	EL ORO	1.55	15266	CODAGEM	1.59
15184	EL ISLOTE	1.26	15267	CHICHILPA	1.59
15185	PRESA EL MOLINO	2.10	15270	MEYUCA	1.42
15187	PRESA HUAPANGO	1.78	15272	EL MIRADOR	1.44
15189	LA CONCEPCION	1.81	15273	PRESA ÑADO	1.55
15190	PRESA SAN ILDEFONSO	1.94	15276	SAN JOSE DEL CONTADERO	1.42
15192	TAXHIE	2.31	15282	TRES BARRANCAS	1.65
15193	PRESA TAXHIMAY I	2.18	15285	CAJONES E-26	1.06
15197	CUESTA DEL CARMEN	1.87	15287	LA COMUNIDAD-8	1.24
15199	MINA VIEJA	1.66	15293	SAN JUAN DE LAS HUERTAS	1.87
15201	TROJES	1.75	15295	SAN PEDRO ZICTEPEC D-10	1.28
15203	CALIXTLAHUACA	1.81	15296	SAN SEBASTIAN E-27	1.02

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
15205	DOLORES PRESA	1.87	15298	SANTA CRUZ TEZONTEPEC E-21	1.20
15217	SAN JUAN ACAZUCHITLAN	1.87	15299	SANTA MARIA E-31	1.20
15223	PUENTE CAPORAL	2.30	15301	TEXCALTITLAN D-7	1.40
15225	JILOTEPEC	1.89	15305	TOTOLMAJAC E-17	1.18
15231	PRESA ITURBIDE	0.97	15308	SAN CRISTOBAL DE LOS BAÑOS	2.39
15233	SAN NICOLAS MAVATI	1.85	15312	COLONIA ALVARO OBREGON	1.73
15236	OCOYOTEPEC	1.61	15315	CASETA EPCCA	1.46
15238	SANTA MARIA DEL LLANO	1.54	15327	MATUZ -ANTES CORRAL VIEJO	1.16
15239	SAN ANTONIO TROJES	2.10	15328	MAZATEPEC	1.21
15240	SAN FRANCISCO PUTLA	1.67	15333	EL PALMITO	1.88
15241	SAN PEDRO TENAYAC	1.46	15341	SAN ANTONIO NIXINI	2.02
15244	MUYTEJE	1.77	15346	EL SITIO	1.13
15245	LA JORDANA	1.79	15350	LA TROJA VIEJA	1.00
15248	COATEPEQUITO	1.54	15353	BUENA VISTA	1.05
15251	ATLACOMULCO II (DGE)	1.94	15361	POZO OCHO	1.91
15254	EL MOLINO E-16	1.33	15368	EL FRESNO	0.71
15255	IXTLAHUACA VILLADA E-30	1.61	15372	IXTLAHUACA (DGE)	1.88
15256	OCUILAN E-23	1.06	15374	AGUA BENDITA	1.53
15259	AGUA BENDITA	1.07	15390	E. T. A. 013 JOCOTITLAN	1.87

Fuente: Elaboración propia.

En el estado de Jalisco (**Cuadro 2.21**), los valores calculados de FHS considerando 1 L/día/p son similares a los del Estado de México, es decir que la mayoría de las estaciones tienen valores entre 1 y 2. Esto indica que se tienen valores de FHS muy cercanos a la autosuficiencia de agua de lluvia, aunque en varios casos será necesario el aporte de otras fuentes.

Cuadro 2.21. FHS para las estaciones de Jalisco, considerando un  $TR_i=1$  L/día/p.

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
14002	ACATLAN DE JUAREZ	1.85	14068	HOSTOTIPAQUILLO	1.70
14006	AJOJUCAR	2.36	14069	HUEJUCAR (OBS)	2.55
14009	AMECA	1.81	14070	HUASCATO	1.85
14011	APAZULCO	1.75	14071	HUEJUQUILLA EL ALTO	3.40
14013	ATEMAJAC DE BRIZUELA	1.45	14072	HUERTA VIEJA	1.57
14016	ATEQUIZA	1.74	14074	JALOSTOTITLAN	2.04
14017	ATOTONILCO EL ALTO	1.62	14075	JAMAY	1.85
14018	ATOYAC	2.37	14076	JESUS MARIA	1.69
14023	BOLAÑOS	2.32	14078	JUCHITLAN	2.02

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
14024	CAJON DE PEÑA	1.23	14080	LA CUÑA	1.79
14025	CALERA	2.71	14081	LA DESEMBOCADA	1.32
14026	CASA LLANTA	2.03	14084	LAGOS DE MORENO (DGE)	2.35
14028	CIHUATLAN (DGE)	1.42	14086	LA MANZANILLA DE LA PAZ	1.55
14029	CONCEPCION DE BUENOS AIRES	1.54	14087	LA RED	1.67
14033	COMANJA DE CORONA	1.89	14089	LA VEGA	1.62
14034	CONTLA	1.24	14090	LA YERBABUENA	1.68
14035	CORRINCHIS II	1.26	14093	MAGDALENA	1.62
14036	CUAUTITLAN	0.86	14096	MASCOTA (SMN)	1.45
14037	PRESA ACHIMEC	2.38	14099	MAZAMITLA	1.52
14038	CUIXTLA	1.67	14100	MEXTICACAN	1.94
14039	CUQUIO	1.86	14101	MICHOACANEJO	2.46
14040	CHAPALA	1.61	14104	PALO VERDE	2.13
14043	EJUTLA	1.70	14111	PONCITLAN	1.86
14044	EL BRAMADOR	0.71	14113	PRESA HURTADO	1.65
14046	EL CHANTE	1.66	14114	PRESA LA DUQUESA	2.84
14047	EL FUERTE	1.72	14118	QUITO	1.67
14048	EL CHIFLON	0.97	14122	SAN BERNARDO	2.67
14052	EL NOGAL	1.90	14123	SAN DIEGO DE ALEJANDRIA	2.30
14053	EL PINITO	2.26	14125	SAN GREGORIO	1.15
14054	EL PUESTO	2.49	14129	SAN MARCOS	1.17
14056	EL SALITRE	1.69	14132	TLAQUEPAQUE	1.46
14060	EL TULE	1.69	14136	SANTA ROSA	1.57
14066	GUADALAJARA (DGE)	1.49	14141	INGENIO TAMAZULA	1.43
14067	HIGUERA BLANCA	2.08	14142	TAPALPA (SMN)	1.67
14143	TECOLOTLAN (DGE)	1.88	14339	EL CUALE	0.92
14144	TENASCO	1.92	14343	PRESA BASILIO BADILLO	2.00
14145	TEOCALTICHE (DGE)	2.59	14345	AHUETITA	2.34
14146	TEOCUITATLAN	3.43	14346	BOCAS	2.59
14148	TECOMATES	0.97	14348	JILOTLAN	1.78
14153	TOTATICHE	1.89	14349	EL RODEO	1.36
14155	TUXCACUESCO	2.16	14350	EL ROSARIO	2.29
14156	TUXCUECA	2.00	14351	TALA	1.59
14157	UNION DE SAN ANTONIO	2.07	14355	LA BARCA	1.71
14158	UNION DE TULA	1.81	14367	TLACUITAPAN	2.11
14164	VILLA GUERRERO	1.93	14369	LA VAQUERA	1.83
14165	VILLA OBREGON	1.87	14379	MEZCALA	1.65
14167	YAHUALICA DE GONZALEZ GALLO	1.91	14388	ZAPOTLANEJO	1.63

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
14168	ZACOALCO DE TORRES	3.60	15295	SAN PEDRO ZICTEPEC D-10	1.28
14169	ZAPOPAN	1.46	15296	SAN SEBASTIAN E-27	1.02
14179	OJUELOS DE JALISCO (DGE)	2.07	15298	SANTA CRUZ TEZONTEPEC	1.20
14180	QUITUPAN	1.81	15299	SANTA MARIA E-31	1.20
14187	TEQUILA	1.64	15301	TEXCALTITLAN D-7	1.40
14189	TIZAPAN EL ALTO (DGE)	2.15	15305	TOTOLMAJAC E-17	1.18
14266	SAN GASPAS DE LOS REYES	2.11	15308	SAN CRISTOBAL DE LOS B.	2.39
14294	TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	1.82	15312	COLONIA ALVARO OBR.	1.73
14297	GUACHINANGO (SMN)	1.54	15315	CASETA EPCCA	1.46
14301	TENAMAXTLAN	1.56	15327	MATUZ -ANTES CORRAL V	1.16
14306	TENZOMPA	1.96	15328	MAZATEPEC	1.21
14311	CANOAS	2.87	15333	EL PALMITO	1.88
14317	MIXTLAN	1.44	15341	SAN ANTONIO NIXINI	2.02
14319	SAN JUAN DE LOS POTREROS	1.47	15346	EL SITIO	1.13
14320	LA SAUCEDA	2.37	15350	LA TROJA VIEJA	1.00
14324	TEMASTIAN	1.81	15353	BUENA VISTA	1.05
14326	TOTUATE	2.85	15361	POZO OCHO	1.91
14329	LA EXPERIENCIA	1.54	15368	EL FRESNO	0.71
14331	EL ZAPOTE	2.09	15372	IXTLAHUACA (DGE)	1.88
14336	EL GUAYABO	1.85	15374	AGUA BENDITA	1.53
14337	APOZOL	2.02	15388		1.84

Fuente: Elaboración propia.

En el estado de Michoacán (**Cuadro 2.22**) no se observa ninguna estación con valores de FHS inferiores a 1, aunque cabe destacar que son pocas las estaciones con valores superiores a 2. Esto muestra que, si el riego aplicado es cercano a 1 l/día/planta en todo el ciclo del cultivo, se pueden suplir gran parte de las necesidades hídricas con el uso de agua de lluvia.

Cuadro 2.22. FHS para las estaciones de Michoacán, considerando un  $TR_i=1$  L/día/p.

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
16002	AGOSTITLAN (CFE)	1.17	16111	SAN JOSE	1.66
16006	ANTUNEZ	1.87	16118	SANTA FE	2.25
16007	APATZINGAN (SMN)	1.89	16120	SANTIAGO UNDAMEO	1.74
16012	CAJONES	1.87	16123	TACAMBARO	1.28
16014	CAMECUARO	1.64	16124	TEMASCALES	1.85
16016	CARRILLO PUERTO	2.07	16133	TURICATO	1.68
16017	CASA BLANCA	1.94	16136	TZITZIO	1.08
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	1.77	16137	UREPETIRO	1.68
16024	CORRALES	2.04	16141	YURECUARO	1.77

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
16027	CUITZEO	2.22	16145	ZINAPECUARIO	1.67
16028	CUITZILLO GRANDE	2.25	16155	COPANDARO (CFE)	1.76
16030	CUIMATO	1.95	16159	EL ROSARIO	1.97
16031	CHAPARACO	1.92	16162	ORANDINO	1.81
16033	CHINCUA	1.66	16192	LA ENCARNACION	1.74
16039	PIEDRAS BLANCAS	2.32	16199	SAN MIGUEL CURINHUATO	1.75
16043	EL PUERTO	1.91	16208	CACHAN	1.45
16045	EL TEMAZCAL	1.14	16219	SAN PEDRO	1.54
16048	ZAMORA (DGE)	1.86	16220	SAN SIMON	1.90
16050	HUANIQUEO	1.65	16224	TANHUATO (DGE)	4.04
16052	HUINGO	1.89	16225	VILLA JIMENEZ II	1.67
16055	JESUS DEL MONTE	1.35	16227	LAZARO CARDENAS	1.05
16061	LAGUNA DEL FRESNO	1.99	16228	ACAHUATO	1.43
16065	LA PIEDAD DE CABADAS	2.19	16233	EPITACIO HUERTA	1.77
16080	MORELIA (OBS)	1.78	16234	GALEANA	1.71
16081	MORELIA	1.89	16235	HUAJUMBARO	1.27
16087	PATZCUARO	1.43	16248	CAURIO DE GUADALUPE	1.98
16091	ALVARO OBREGON (DGE)	2.34	16250	HUANDACAREO	1.65
16094	PRESA GUARACHA	1.83	16254	TEREMENDO	2.13
16095	PRESA JARIPO	1.89	16255	UCAREO	2.10
16097	PRESA PUCUATO	1.26	16512	EL COLEGIO	1.94
16098	PRESA SABANETA	1.20	16513	EL JACAL (DGE)	1.92
16105	QUIRIO	2.23	16514	JARIPEO	1.28
16108	SAN CRISTOBAL	1.83	16515	LA SANDIA	1.49
16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	1.60			

Fuente: Elaboración propia.

La FHS en el estado de San Luis Potosí es muy variable, ya que se pueden encontrar estaciones con valores inferiores a uno y en otras tener valores arriba de tres (**Cuadro 2.23**). En aquellas estaciones donde la FHS es inferior a uno se tiene un completo abasto de agua mediante la captación de agua de lluvia, incluso en algunas podría aumentarse la cantidad de riego a más de 1 L/día/p y todavía permanecer cerca de la sustentabilidad hídrica. Sin embargo, en varias estaciones el valor de FHS incluso es superior a 4, lo que indica que el agua de lluvia no es suficiente para abastecer ni la cuarta parte de las necesidades hídricas del cultivo.

Cuadro 2.23. FHS para las estaciones de San Luis Potosí, considerando un  $TR_i=1$  L/día/p.

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
24002	ALTAMIRA	0.88	24043	MICOS	0.93
24003	AQUISMON	0.65	24044	MOCTEZUMA (DGE)	4.05
24004	ARMADILLO DE LOS INFANTE	2.48	24045	NOGAL OSCURO	2.27
24005	BALLESMI	0.94	24046	OJO CALIENTE	3.91
24006	CARDENAS (DGE)	2.64	24047	OJO DE AGUA	1.33
24007	NORMAL DEL DESIERTO	4.01	24048	VALLEJO	5.63
24008	CERRITOS	2.13	24049	PAPAGAYOS	1.03
24009	SAN MARTIN CH.	1.01	24050	PAREDES	2.00
24011	CIUDAD DEL MAIZ	2.87	24051	PASO DE SAN ANTONIO	1.13
24013	COLONIA ALVARO OBREGON	3.90	24052	PASTORA	3.43
24014	DAMIAN CARMONA	0.93	24053	CIUDAD SANTOS	0.74
24015	EBANO	1.77	24054	PEDRO MONTOYA	2.74
24016	ABRITAS	0.88	24055	PEÑON BLANCO	4.32
24017	EL COCO	1.60	24056	PONCIANO ARRIAGA	1.41
24019	EL ESTRIBO	8.51	24057	PRESA DE GUADALUPE	4.05
24020	EL FISCAL	1.45	24059	VILLA DE RAMOS II	5.31
24021	EL GRITO	3.25	24060	RAYON	2.17
24022	EL HUIZACHE	3.41	24061	RINCON DEL PORVENIR	4.42
24024	EL PEAJE	3.54	24063	SAN ANTONIO DE G.	1.64
24025	EL PUJAL	1.07	24064	SAN DIEGUITO	1.04
24026	REQUETEMU	0.68	24065	SAN FELIPE	1.15
24027	EL SALTO (CFE)	1.11	24066	SAN FRANCISCO	3.79
24028	EL TIGRE	1.34	24067	SAN JOSE ALBURQUERQUE	3.14
24031	GALLINAS	0.85	24068	SAN JUAN DEL MECO	1.97
24032	GUADALCAZAR	2.36	24069	SAN LUIS POTOSI (DGE)	3.70
24033	LA MAROMA	3.95	24070	SAN LUIS POTOSI (OBS)	2.50
24034	LA SALITRERA	2.29	24071	SAN NICOLAS TOLENTINO	2.21
24035	LAGUNILLAS	2.26	24072	SANTA CRUZ	0.79
24036	LAS ADJUNTAS	1.51	24073	LA REFORMA	4.39
24037	LAS MORITAS	1.03	24074	SANTA MARIA DEL REFUGIO	4.82
24038	LOS PILARES	3.48	24075	SANTA MARIA DEL RIO	3.78
24039	MAITINEZ	1.12	24076	SANTA ROSA	1.12
24040	MATEHUALA (SMN)	2.69	24077	SANTO DOMINGO	2.95
24042	MEXQUITIC	3.59	24078	SANTIAGO	3.58
24079	SANTIAGUILLO	1.16	24145	LAGUNA SECA	3.34
24081	SOLEDAD DE GRACIANO	3.77	24146	LA VICTORIA	4.16
24082	TAMAPATZ	0.52	24148	SALINAS DE HIDALGO	3.60

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
24084	TANCUILIN	0.68	24149	SANTA ELENA	1.24
24085	TANQUIAN DE ESCOBEDO	1.24	24150	GUANAME	3.19
24087	TANLAJAS	0.90	24151	SAN JUAN DEL SALADO	4.52
24088	TANTIZOHUICHE	1.00	24152	SAUZ DE CALERA	4.18
24090	TANZABACA	0.84	24154	SAN FRANCISCO II	4.87
24091	TEMAMATLA	0.75	24156	BUENAVISTA	1.50
24092	TIERRA BLANCA	0.75	24157	ZARAGOZA	3.48
24093	TIERRA NUEVA	4.21	24160	COYOTILLOS	3.72
24094	VANEGAS	5.39	24161	LA HERRRADURA	6.66
24095	VELAZCO	1.77	24162	EL CARMEN	3.73
24097	VIGAS	2.44	24163	BLEDOS	4.09
24098	EL MEZQUITE	3.72	24164	LLANO DEL CARMEN	3.94
24100	VILLA DE ARRIAGA (DGE)	3.64	24165	SAN JOSE DE CORONADOS	3.28
24101	VILLA DE REYES	3.52	24168	BUENAVISTA	4.30
24103	VILLA JUAREZ	2.24	24170	EL CHARCO	1.82
24105	XILITLA	0.54	24171	HUIZACHAL	2.62
24106	ZARAGOZA	4.81	24172	MANANTIAL DE MEDIA LUNA	2.62
24107	EL PEÑÓN	1.30	24173	PRESA ALVARO OBREGON	3.43
24108	EL TULILLO	1.83	24174	PUERTO DE LOBOS	2.17
24110	OJO DE AGUA SECO	2.30	24175	EL SALADO	4.12
24111	SAN LUIS POTOSI (SMN)	3.96	24176	SAN JUAN DE TUZAL	4.41
24113	SAN VICENTE	1.30	24177	SANTA CATARINA	2.52
24114	RIOVERDE (DGE)	2.87	24179	XOCONOXTLE	3.80
24122	CHAPULUACANITO	0.82	24180	CAÑADA VERDE	2.69
24125	TLAMAYA	0.49	24182	TAMPAMOLON	0.97
24133	LA GLORIA	1.24	24186	HUICHIHUAYAN	0.64
24136	TANLU	1.67	24188	CORONADO	3.20
24137	VEINTE DE NOVIEMBRE	1.00	24189	EL HOSPITAL	3.49
24139	TAMUIN (DGE)	1.43	24190	LA LIBERTAD	9.43
24142	LA PRESA	2.68	24191	SAN ANTONIO DEL MEZQUITE	4.31
24144	LA CARDONCITA	6.14	24192	SAN FRANCISCO DE LA DICHA	5.26

Fuente: Elaboración propia.

En el estado de Sinaloa (**Cuadro 2.24**) gran parte de las estaciones presenta valores de FHS superiores a 2, lo que indica la necesidad de aporte de agua de otras fuentes en todo el estado. En Higuera de Zaragoza, Los Mochis y Topolobampo se tiene el menor aporte de agua de lluvia para satisfacer una cantidad de riego de 1 L/día/p.

Cuadro 2.24. FHS para las estaciones de Sinaloa, considerando un  $TR_i=1$  L/día/p.

Estación	Nombre	FHS	Estación	Nombre	FHS
25001	ACATITAN	1.72	25071	PERICOS	1.89
25003	AHOME	3.55	25074	POTRERILLOS	1.19
25009	BOCATOMA SUFRAGIO	3.08	25078	ROSARIO	1.64
25015	CULIACAN (DGE)	2.19	25080	RUIZ CORTINEZ	3.28
25019	CHOIX II (DGE)	1.80	25081	SANALONA II	1.65
25022	EL CARRIZO	3.89	25084	SAN IGNACIO	2.04
25023	EL FUERTE	2.36	25087	SANTA CRUZ DE ALAYA	1.86
25025	PRESA MIGUEL HIDALGO Y COSTILLA	2.29	25098	TOPOLOBAMPO (DGE)	4.11
25030	EL PLAYON	3.67	25100	YECORATO (CFE)	1.74
25033	EL VAREJONAL	1.54	25110	BADIRAGUATO (DGE)	1.52
25038	GUASAVE (DGE)	3.08	25116	LOS MOCHIS	4.04
25041	GUATENIPA	1.42	25119	SIQUEROS	1.89
25042	HIGUERA DE ZARAGOZA	4.48	25150	LAS TORTUGAS	1.58
25044	HUITES	1.69	25158	EL PALMAR DE LOS SEPULVEDA	2.09
25045	IXPALINO	1.77	25172	SAN JOAQUIN	1.83
25046	JAINA	1.58	25176	EL QUEMADO	2.43
25049	LA CONCHA	1.45	25178	ZOPILOTE	2.75
25050	LA CRUZ	1.84	25183	COMEDERO	1.44
25056	LAS ESTACAS	3.50	25186	OTATITAN	1.59
25064	MOCORITO (DGE)	2.09			

Fuente: Elaboración propia.

#### 2.5.2.1. Captación de agua de lluvia

Se analiza la información recopilada de la precipitación y la generada respecto a los coeficientes de escurrimiento y de la variación de la lluvia. Todo ello, orientado a la obtención de los volúmenes potencialmente recolectados de agua de lluvia según características, tipología y tamaño de naves de invernaderos.

El análisis del coeficiente de variación asociado a la precipitación se realizó bajo dos consideraciones (**Cuadro 2.25**):

- Coeficiente de variación de los promedios de lluvia mensual entre tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010).
- Coeficiente de variación de los promedios de lluvia mensual para el periodo (1981-2010).

Como primer análisis de la información recopilada de precipitación fue la obtención del coeficiente de variación respecto a tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010). A continuación, un ejemplo de la estación 15125, Texcoco, DGE.

Cuadro 2.25. Ejemplo de estimación del coeficiente de variación de la precipitación promedio mensual para tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010).

ESTADO DE: MEXICO														
LATITUD	19°30'20"	N.												
LONGITUD	98°52'55"	W.												
ALTURA	2,250.00	msnm												
Municipio	TEXCOCO													
ESTACION:	15125	TEXCOCO (DGE)												
PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
1951-2010	9.4	8.4	10.9	24.8	46.8	101.9	121.6	103.7	76.7	37.5	8.8	4.0	554.5	
1971-2000	7.3	7.0	9.8	23.7	51.4	108.8	125.3	91.9	77.2	36.1	9.9	3.3	551.7	
1981-2010	7.9	10.6	9.0	22.5	46.1	100.1	120.7	94.1	56.1	30.6	9.6	1.0	508.3	
<b>Promedio</b>	<b>8.2</b>	<b>8.7</b>	<b>9.9</b>	<b>23.7</b>	<b>48.1</b>	<b>103.6</b>	<b>122.5</b>	<b>96.6</b>	<b>70.0</b>	<b>34.7</b>	<b>9.4</b>	<b>2.8</b>	<b>538.2</b>	
<b>Varianza</b>	<b>0.78</b>	<b>2.20</b>	<b>0.61</b>	<b>0.88</b>	<b>5.53</b>	<b>14.06</b>	<b>3.96</b>	<b>26.25</b>	<b>96.65</b>	<b>8.87</b>	<b>0.22</b>	<b>1.64</b>	<b>447.32</b>	
<b>Des Est</b>	<b>0.88</b>	<b>1.48</b>	<b>0.78</b>	<b>0.94</b>	<b>2.35</b>	<b>3.75</b>	<b>1.99</b>	<b>5.12</b>	<b>9.83</b>	<b>2.98</b>	<b>0.46</b>	<b>1.28</b>	<b>21.1</b>	
	0.11	0.17	0.08	0.04	0.05	0.04	0.02	0.05	0.14	0.09	0.05	0.46	0.04	
					0.06									
CV	0.11	0.17	0.08	0.04	0.05	0.04	0.02	0.05	0.14	0.09	0.05	0.46	0.04	

Aplicando las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 se obtuvieron el promedio, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación respectivamente. Este ejercicio nos permite revisar el grado de dispersión de los valores promedio de precipitación entre los periodos considerados.

Esta actividad tuvo como resultado el análisis de una muestra aleatoria de aproximadamente el 15% del total de las estaciones con valores de los tres periodos para los estados: Estado de México, Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí y Sinaloa (**Cuadro 2.26**). El **Cuadro 2.27** muestra de manera más detallada el análisis realizado de la variable precipitación en un estado.

Cuadro 2.26. Estimación del coeficiente de variación de la precipitación promedio mensual muestra aleatoria de estaciones de 5 estados para tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010).

Estado	Estaciones			Con valores los tres periodos	Estaciones muestra analizadas	Coeficiente de variación promedio (pp anual)
	(1951-2010)	(1971-2000)	(1981-2010)			
Estado de México	277	254	206	189	32	0.03
Jalisco	227	206	161	158	21	0.02
Michoacán	203	177	132	130	20	0.03
San Luis Potosí	177	168	164	159	18	0.03
Sinaloa	100	92	65	64	10	0.02

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2.27. Ejemplo de análisis de coeficiente de variación de la variable precipitación para tres periodos (1951-2010), (1971-2000) y (1981-2010) – Muestra del Estado de Jalisco.

No	Estación	Municipio	Promedio	Varianza	Des Estandar	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	CV (ANUAL)
1	ACATLAN DE JUAREZ	ACATLAN DE JUAREZ	785.2	199.5	14.1	0.04	0.23	0.39	0.05	0.07	0.03	0.02	0.03	0.02	0.09	0.16	0.09	0.02
2	AMECA	AMECA	844.3	324.6	18.0	0.12	0.19	0.38	0.23	0.16	0.03	0.02	0.01	0.03	0.04	0.23	0.27	0.02
3	ATENGUIILLO	ATENGUIILLO	1,067.2	63.1	7.9	0.17	0.05	0.39	0.36	0.08	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.17	0.01
4	BOCAS	MEZQUITIC	559.1	57.6	7.6	0.13	0.15	0.00	0.07	0.04	0.02	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.07	0.01
5	CIHUATLAN (DGE)	CIHUATLAN	952.8	209.4	14.5	0.23	0.40	0.63	1.21	0.33	0.08	0.04	0.02	0.02	0.04	0.25	0.28	0.02
6	CONTLA	TAMAZULA DE GORDIANO	1,140.6	1,512.3	38.9	0.05	0.23	0.44	0.36	0.04	0.02	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07	0.10	0.03
7	EJUTLA	EJUTLA	881.6	397.3	19.9	0.09	0.03	0.14	0.33	0.01	0.04	0.01	0.05	0.02	0.10	0.12	0.14	0.02
8	EL NOGAL	TAPALPA	755.0	345.9	18.6	0.05	0.15	0.21	0.18	0.07	0.01	0.03	0.02	0.03	0.08	0.15	0.13	0.02
9	EL ZAPOTE	COLOTLAN	656.4	223.3	14.9	0.06	0.08	0.05	0.04	0.05	0.01	0.02	0.02	0.08	0.01	0.04	0.14	0.02
10	GUADALAJARA (SMN)	GUADALAJARA	948.1	276.7	16.6	0.16	0.25	0.19	0.09	0.09	0.06	0.01	0.02	0.02	0.07	0.04	0.19	0.02
11	JALOSTOTITLAN	JALOSTOTITLAN	709.7	403.0	20.1	0.07	0.28	0.13	0.12	0.13	0.05	0.01	0.03	0.06	0.07	0.04	0.27	0.03
12	LA EXPERIENCIA	GUADALAJARA	916.6	325.8	18.1	0.15	0.06	0.14	0.15	0.10	0.06	0.02	0.00	0.03	0.02	0.09	0.16	0.02
13	LAS LAGUNAS	JESUS MARIA	828.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	MEZQUITIC	MEZQUITIC	588.1	174.5	13.2	0.12	0.39	0.32	0.23	0.11	0.01	0.01	0.01	0.05	0.06	0.12	0.12	0.02
15	PIHUAMO	PIHUAMO	1,590.8	664.8	25.8	0.10	0.13	0.99	0.27	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02	0.06	0.12	0.27	0.02
16	QUITUPAN (CFE)	QUITUPAN	792.8	508.7	22.6	0.12	0.08	0.40	0.09	0.02	0.03	0.01	0.03	0.06	0.04	0.13	0.38	0.03
17	SAN MIGUEL EL ALTO	SAN MIGUEL EL ALTO	719.1	55.6	7.5	0.17	0.25	0.25	0.09	0.08	0.08	0.04	0.03	0.03	0.05	0.14	0.15	0.01
18	TECALITLAN	TECATITLAN	875.3	0.1	0.2	0.04	0.06	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00
19	TIZAPAN EL ALTO (DGE)	TIZAPAN EL ALTO	722.0	356.6	18.9	0.04	0.21	0.35	0.14	0.09	0.02	0.01	0.04	0.06	0.07	0.15	0.12	0.03
20	UNION DE TULA	UNION DE TULA	807.4	98.5	9.9	0.11	0.05	0.18	0.30	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.11	0.13	0.27	0.01
21	ZAPOTLANEJO (DGE)	ZAPOTLANEJO	876.4	164.5	12.8	0.06	0.35	0.10	0.13	0.01	0.03	0.02	0.04	0.05	0.01	0.05	0.08	0.01
COEFICIENTE DE VARIACIÓN PROMEDIO						0.10	0.17	0.27	0.21	0.08	0.03	0.02	0.02	0.04	0.05	0.10	0.16	0.02

Fuente: Elaboración propia.

Se llevó a cabo un análisis más concreto del coeficiente de variación (Cuadro 2.28) de los promedios de lluvia mensual para los estados de México y San Luis Potosí considerando el periodo (1981-2010) (Cuadro 2.29). Se consideró la información depurada mencionada en el apartado de recopilación de información.

Cuadro 2.28. Ejemplo de análisis de coeficiente de variación de la variable precipitación para el periodo (1981-2010) – Estación 15002 (Aculco, SMN)

Est	Var	Anio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
15002	208	1981	50	28	12	23	45.5	201	175.5	95.5	37.5	68.6	2	5	743.6
15002	208	1982	0	4.5	16	16	61	22.2	86.4	57.8	49.5	70.7	0	0	384.1
15002	208	1983	32.5	0	4.5	0	25.9	40.5	343.4	142.5	93.8	50.5	12.5	2	748.1
15002	208	1984	6.5	11	0	0	22	152.5	173.2	151	169.5	75.5	0	2	763.2
15002	208	1985	3	SD	SD	SD	SD	199	181.5	45	0	SD	SD	SD	428.5
15002	208	1986	SD	0	0	7	24	3	134	SD	SD	SD	SD	SD	168
15002	208	1987	0	0	0	0	SD	SD	SD	SD	SD	1	25.5	0	26.5
15002	208	1988	SD	SD	12	8.6	42.4	61.4	181.1	161.8	65.7	0	12.9	0	545.9
15002	208	1989	0	26.6	SD	23.1	45.9	90	136.1	160.2	37.6	26.4	8.3	18.3	572.5
15002	208	1990	5.6	35.6	4	20.4	79.3	56.7	SD	154	109.9	98.6	0.3	9	573.4
15002	208	1991	9.9	4.2	0	2.7	38.3	306.5	280.3	58.2	79.6	40.6	27	24	871.3
15002	208	1992	79.8	30.1	2.6	8	133.9	26.2	134.2	127.3	69.1	84	72.7	4.7	772.6
15002	208	1993	6.4	4.3	8.2	22.8	14.2	134.7	166.8	49.6	129.8	11.5	54	0	602.3
15002	208	1994	0	0	1.9	50.4	33.9	SD	SD	234.4	77.6	89	9.7	0	496.9
15002	208	1995	15.4	14.4	13.1	28.3	54.2	102.5	112.5	185.3	155	21.1	55.7	22.9	780.4
15002	208	1996	0	0	0	19.9	27.3	71.8	74.8	93.1	174.9	84.1	0.7	0	546.6
15002	208	1997	0.6	0	44.7	78.6	84.3	124.3	119.6	38.9	42.7	83.5	11.3	0.7	629.2
15002	208	1998	3.8	1.5	0	0	15.4	139.3	60.7	95.5	234.4	101.9	13.8	0	666.3
15002	208	1999	0	0	1.2	0	14	72.8	196.3	80	85.6	98.7	4	9.4	562
15002	208	2000	0	0.9	18.5	0	88.8	141.1	69	173.3	126.7	22.4	16.4	5.5	662.6
15002	208	2001	5	19.3	6.5	27.9	63.8	154.8	102.2	125.2	135.4	57	4.2	0.2	701.5
15002	208	2002	32.1	10.6	1.1	32.5	17.6	89.1	234.4	77	175.9	62.8	63.6	0	796.7
15002	208	2003	6.4	0	0	4.4	12.6	87.1	SD	SD	SD	SD	SD	0	110.5
15002	208	2004	13.6	0	14.8	6.1	93.6	256.9	142.8	139.4	76.8	43	10.3	4.1	801.4
15002	208	2005	12.1	1.5	9.5	6.8	18.8	77.6	190.3	96.6	98.8	SD	0	2.2	514.2
15002	208	2006	17.4	0	5.4	0	93.8	49.3	93.8	178	198.5	114.5	106.5	1	858.2
15002	208	2007	SD	SD	SD	SD	31.5	95	180.8	134.9	225.4	54.4	9.7	8.4	740.1
15002	208	2009	11.1	0	1.1	0.5	102.9	79.7	146.2	115.9	140.7	115.2	0	0	713.3
15002	208	2010	38.5	79.2	0	11.9	42.3	49.7	174.1	79.2	144.9	2.6	0	0	622.4
PROMEDIO			13.45	10.45	6.81	14.77	49.16	106.84	155.60	117.29	112.90	59.10	20.04	4.42	670.84
VARIANZA			347.32	306.66	90.31	316.66	1,042.69	4,909.83	4,088.91	2,403.06	3,557.14	1,252.28	728.36	46.51	43,494.06
DESVIACIÓN ESTANDAR			18.64	17.51	9.50	17.79	32.29	70.07	63.94	49.02	59.64	35.39	26.99	6.82	208.55
COEFICIENTE DE VARIACIÓN			1.39	1.68	1.40	1.20	0.66	0.66	0.41	0.42	0.53	0.60	1.35	1.54	0.31

Cuadro 2.29. Ejemplo de análisis de coeficiente de variación de la variable precipitación para el periodo (1981-2010) – Estado de México.

Ni	Estaci	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	pp Total	Cv
1	15002	13.45	10.45	6.81	14.77	49.16	106.84	155.60	117.29	112.90	59.10	20.04	4.42	670.84	0.31
2	15008	7.07	4.34	11.87	27.41	38.35	102.39	119.16	107.56	88.13	44.47	9.02	5.65	565.42	0.23
3	15010	18.49	13.32	12.21	22.02	77.21	141.92	164.46	161.20	139.21	55.39	13.79	9.12	828.35	0.17
4	15014	10.01	9.36	12.18	26.09	66.22	168.16	219.61	221.22	157.54	87.15	19.99	9.42	1,006.95	0.41
5	15016	13.43	13.19	12.53	30.65	99.92	215.77	217.16	208.02	222.55	98.22	19.37	12.48	1,163.29	0.25
6	15020	6.91	7.52	9.29	19.23	39.06	97.55	119.96	117.66	89.44	39.55	5.79	3.13	555.09	0.16
7	15022	5.49	7.94	7.88	22.28	33.26	93.09	104.83	111.48	79.96	38.56	9.40	2.75	516.94	0.23
8	15024	12.02	15.23	11.69	35.43	65.53	132.80	202.76	150.70	152.15	71.07	14.55	9.02	872.94	0.18
9	15025	16.48	10.52	10.99	31.01	58.50	150.90	207.79	201.50	142.95	70.08	15.93	8.61	925.27	0.25
10	15026	21.77	16.18	12.19	24.27	58.34	129.39	152.19	131.48	127.09	57.60	15.80	9.50	755.82	0.23
11	15028	10.82	11.68	10.51	26.70	43.89	95.50	121.12	117.17	99.47	55.70	9.90	5.24	607.71	0.21
12	15029	13.76	13.26	9.66	21.51	54.05	145.14	208.93	172.80	137.43	68.03	20.39	6.85	871.81	0.32
13	15030	13.67	11.59	10.09	26.17	70.61	163.03	169.05	157.98	141.06	76.11	15.93	8.60	863.87	0.29
14	15037	5.71	11.38	10.58	15.85	51.10	125.05	187.11	215.25	140.65	56.30	12.81	4.14	835.93	0.56
15	15038	6.61	11.50	5.95	33.81	78.71	152.98	206.63	182.60	162.32	68.03	14.78	9.18	933.12	0.55
16	15039	15.52	21.27	11.24	30.87	51.61	134.08	145.41	143.92	120.53	49.49	15.02	11.69	750.65	0.23
17	15041	8.10	9.34	8.39	21.26	42.58	97.19	113.95	116.60	96.30	49.17	12.99	2.71	578.57	0.19
18	15044	7.16	7.13	14.20	28.60	37.73	101.07	104.60	106.72	99.52	35.81	10.93	6.52	559.99	0.21
19	15045	13.24	14.97	16.07	39.39	85.74	230.30	283.74	281.42	222.66	94.07	15.42	8.50	1,305.52	0.20
20	15047	9.60	10.57	10.62	25.05	65.27	144.99	164.41	157.44	151.36	72.20	12.47	5.32	829.30	0.15

Se analizaron dos estados:

- Estado de México con 138 estaciones analizadas
- Estado San Luis Potosí con 142 estaciones analizadas

Los resultados indican que, a pesar haber realizado una depuración de la información, aún se manejan para algunos meses valores de cero, lo que conduce a obtener valores altos de coeficiente de variación.

Para los estados de México y San Luis Potosí (**Cuadro 2.30**) se realizaron los análisis asociados a la precipitación y el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia con aplicación a la agricultura protegida. Considerando las 138 y 142 estaciones de los estados de México y San Luis Potosí respectivamente se presentan los intervalos de precipitación (cada 250 mm) y su correspondiente en número de estaciones y porcentaje.

Cuadro 2.30. Frecuencia en número de estaciones y en porcentaje por intervalos de valores de precipitación.

Intervalo de precipitación, mm		Estaciones Estado de México		Estaciones San Luis Potosí	
		En número	En porcentaje	En número	En porcentaje
0	250	0	0%	4	3%
251	500	1	1%	58	41%
501	750	37	27%	25	18%
751	1000	68	49%	10	7%
1001	1250	22	16%	11	8%
1251	1500	7	5%	13	9%
1501	1750	2	1%	9	6%

Intervalo de precipitación, mm		Estaciones Estado de México		Estaciones San Luis Potosí	
		En número	En porcentaje	En número	En porcentaje
1751	2000	0	0%	5	4%
2001	2250	1	1%	4	3%
2251	2500			0	0%
2501	2750			1	1%
2751	3000			1	1%
3001	3250			1	1%
		<b>138</b>		<b>142</b>	

Es importante mencionar que para el estado de México el 92% está dentro del intervalo entre 501 y 1,250mm (**Cuadro 2.31**) que son valores con un amplio potencial de aprovechamiento de agua de lluvia para la agricultura protegida. En el caso del estado de San Luis potosí para el mismo intervalo se tiene un porcentaje de 33%. Para el mismo estado un 41% presenta valores de precipitaciones menores de 500mm.

Cuadro 2.31. Frecuencia en número de estaciones por intervalos de valores de precipitación – Estado de México.

Intervalo (pp), mm		Frecuencia	Promedios de precipitación en el intervalo, mm												
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	pp Total
301	400	1	3.17	3.44	3.52	15.08	26.77	67.61	69.11	72.85	77.39	46.09	4.03	1.69	390.73
401	500	0													
501	600	12	7.71	8.12	12.38	27.16	42.70	95.87	109.81	104.52	88.46	47.69	10.86	4.76	560.03
601	700	16	10.32	11.15	8.93	24.26	47.54	109.70	141.32	123.99	105.12	52.53	13.35	6.64	654.84
701	800	25	14.28	13.57	9.77	21.51	53.38	125.74	164.05	142.33	121.63	60.91	15.64	7.69	750.51
801	900	35	12.71	12.31	11.69	26.13	66.14	148.79	176.25	160.12	138.81	64.84	17.23	9.96	844.98
901	1000	17	15.34	13.47	10.31	23.35	65.53	166.04	197.08	181.79	163.44	76.95	18.32	8.51	940.11
1001	1100	8	15.09	14.46	11.17	25.94	75.10	187.78	214.18	197.94	175.24	81.42	21.67	9.32	1,029.31
1101	1200	7	13.63	11.54	9.89	22.56	75.19	215.26	222.58	232.72	219.17	101.71	21.00	9.88	1,155.12
1201	1300	8	17.18	12.45	10.24	26.53	81.05	227.77	247.57	250.96	220.07	105.08	26.80	8.22	1,233.92
1301	1400	4	13.04	13.42	13.49	26.21	97.68	236.95	260.68	262.88	255.27	113.45	24.06	10.25	1,327.37
1401	1500	2	14.34	11.11	7.40	20.16	71.83	277.45	261.65	293.43	318.12	130.44	27.34	16.81	1,450.09
1501	1600	2	26.92	21.26	20.86	41.76	128.47	258.39	300.76	285.14	251.23	133.94	35.44	20.06	1,524.24
1601	1700	0													
1701	1800	0													
1801	1900	0													
1901	2000	0													
2001	2100	1	35.16	23.46	12.87	21.48	94.37	322.39	407.71	457.18	382.01	229.52	53.98	13.65	2,053.78
Total d estaciones		138													

En el cálculo de los volúmenes potencialmente captables de agua de lluvia está involucrada la variable de la precipitación expresada en lámina (mm), área de la superficie de captación (m<sup>2</sup>) y dos coeficientes (uno asociado a la superficie de escurrimiento y otro asociado a variabilidad de la lluvia). Es importante mencionar que para diseño de proyectos de captación de agua de lluvia

se utilizan valores promedio mensuales dentro de un intervalo de años; sin embargo, es conveniente utilizar un coeficiente probabilístico de lluvia.

$$Va = A_c C_e Cv_{II} \quad (6)$$

Donde:

$Va$  = Volumen potencialmente captable de agua de lluvia, en  $m^3$

$A_c$  = Área de captación (superficie destinada de agricultura protegida, en  $m^2$ )

$C_e$  = Coeficiente de escorrentía, (valor recomendado de 0.90)

$Cv_{II}$  = Coeficiente variación de la lluvia en un intervalo determinado

A continuación, el ejemplo de la estación 15002 con valor de precipitación de 670.84 mm anuales, bajo el escenario de una nave de 1,000 $m^2$ ,  $C_e=0.90$  y  $Cv_{II}=1$  y 0.74 (**Cuadro 2.32**).

Cuadro 2.32. Ejemplo de cálculo de volumen potencialmente captable de agua de lluvia,  $m^3$

N	Estaci	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	pp Tota
1	15002	13.45	10.45	6.81	14.77	49.16	106.84	155.60	117.29	112.90	59.10	20.04	4.42	670.84
Ac	1000	Ce	0.9	Cv	1.00									
No	Estacion	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Va m3
1	15002	12.11	9.41	6.13	13.30	44.24	96.16	140.04	105.56	101.61	53.19	18.04	3.98	603.76
Ac	1000	Ce	0.9	Cv	0.74									
No	Estacion	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Va m3
1	15002	9.01	7.00	4.56	9.90	32.94	71.59	104.26	78.59	75.65	39.60	13.43	2.96	449.50

Se realizó el cálculo para todas las estaciones del Estado de México (138) y San Luis Potosí (142) del potencial de aprovechamiento del agua de lluvia en la (AP) (**Cuadro 2.33**).

Cuadro 2.33. Ejemplo de base de datos del potencial de aprovechamiento del agua de lluvia en la AP.

Ac	1000	Ce	0.9	Cv	0.74												
No	Estacion	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Va m3	Max Vol	Min Vol	Va m3 (CV 1)
1	15002	9.01	7.00	4.56	9.90	32.94	71.59	104.26	78.59	75.65	39.60	13.43	2.96	449.50	104.26	2.96	603.76
2	15008	4.73	2.91	7.95	18.37	25.69	68.61	79.84	72.07	59.05	29.80	6.04	3.79	378.86	79.84	2.91	508.87
3	15010	12.39	8.93	8.18	14.76	51.73	95.09	110.20	108.02	93.28	37.11	9.24	6.11	555.04	110.20	6.11	745.52
4	15014	6.71	6.27	8.16	17.48	44.37	112.68	147.15	148.23	105.56	58.39	13.40	6.31	674.72	148.23	6.27	906.26
5	15016	9.00	8.84	8.39	20.54	66.95	144.58	145.51	139.38	149.12	65.81	12.98	8.36	779.47	149.12	8.36	1,046.96
6	15020	4.63	5.04	6.22	12.89	26.17	65.37	80.38	78.84	59.93	26.50	3.88	2.10	371.95	80.38	2.10	499.59
7	15022	3.68	5.32	5.28	14.93	22.29	62.38	70.25	74.70	53.58	25.84	6.30	1.84	346.38	74.70	1.84	465.25
8	15024	8.05	10.21	7.83	23.74	43.91	88.98	135.86	100.98	101.95	47.62	9.75	6.04	584.92	135.86	6.04	785.64
9	15025	11.04	7.05	7.36	20.78	39.20	101.11	139.23	135.02	95.79	46.96	10.68	5.77	619.98	139.23	5.77	832.74
10	15026	14.59	10.84	8.17	16.26	39.09	86.70	101.98	88.10	85.16	38.60	10.59	6.37	506.44	101.98	6.37	680.24

Para el análisis del potencial de aprovechamiento de agua de lluvia en AP para el cultivo de jitomate se analizó el comportamiento de las áreas de captación y volúmenes de almacenamiento para las siguientes condiciones (**Cuadro 2.34**):

Cuadro 2.34. Condiciones de análisis – potencial de aprovechamiento de agua de lluvia – A. P. - Cultivo de jitomate.

CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA PARA LA SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SU ADAPTACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Datos del cultivo	Datos Invernadero	Otros datos
<ul style="list-style-type: none"> <li>Jitomate</li> <li>Plantas 2,800</li> <li>Ciclo de 5 meses</li> <li>Riego lt/día/planta:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 1er mes = 0.4</li> <li>➤ 2do mes= 0.6</li> <li>➤ 3er mes = 1.2</li> <li>➤ 4to mes = 1.6</li> <li>➤ 5to mes = 1.8</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nave 1,000m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ce = 0.90</li> <li>Cv<sub>II</sub> = 0.80</li> <li>Estaciones</li> <li>15014 CAPULHUAC</li> <li>15170 Chapingo. DGE</li> </ul>

En el Cuadro 2.35 se observa:

- La nave de 1,000 m<sup>2</sup> es insuficiente para captar la cantidad de agua necesaria (aprox. 470-480m<sup>3</sup>). La necesidad de riego se alcanza con una superficie (aprox. 1,180 – 1,200m<sup>2</sup>).
- Si el ciclo de cultivo se desarrolla en época de estiaje el volumen de diseño es superior y decrece mientras el ciclo de cultivo se acerca a la época de lluvia.

Cuadro 2.35. Análisis del potencial de aprovechamiento de agua de lluvia – A. P. - Cultivo de jitomate. Diferentes ciclos de cultivo. Chapingo.

Estación climatológica		Chapingo. DGE		15170																															
No de plantas		2,800		Ingresar el número de plantas																															
C <sub>e</sub>		0.8		Ingresar el coeficiente de escurrimiento de la superficie de captación																															
n <sub>o</sub>		0.9		Ingresar valor probabilístico asociado al evento de lluvia																															
Área de captación						1,203.0			1,197.4			1,211.5			1,215.7			1,210.0			1,212.8			1,205.7			1,211.5								
						Enero-Mayo			Febrero-Junio			Marzo-Julio			Abril-Agosto			Mayo-Septiembre			Junio-October			Julio-Noviembre			Agosto-Diciembre								
Mes	No días	PP <sub>estación</sub>	PP <sub>aprov</sub>	PP <sub>aprov</sub>	PP <sub>aprov</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>lluvia</sub>						
Enero	31	11.4	0.0	0.0	0.0	0.4	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
Febrero	28	8.8	0.0	0.0	0.0	0.6	47.0	0.0	0.4	31.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
Marzo	31	12.1	0.0	0.0	0.0	1.2	104.2	0.0	0.6	52.1	0.0	0.4	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
Abril	30	28.9	28.9	20.8	20.8	1.6	134.4	25.0	1.2	100.8	24.9	0.6	50.4	25.2	0.4	33.6	25.3	0.0	0.0	25.2	0.0	0.0	25.2	0.0	0.0	25.1	0.0	0.0	25.0	0.0	25				
Mayo	31	47.0	47.0	33.9	33.9	1.8	156.2	40.7	1.6	138.9	40.6	1.2	104.2	41.0	0.6	52.1	41.2	0.4	34.7	41.0	0.0	0.0	41.1	0.0	0.0	40.8	0.0	0.0	41	0.0	41				
Junio	30	103.8	103.8	74.7	74.7	0.0	0.0	89.9	1.8	151.2	89.5	1.6	134.4	90.5	1.2	100.8	90.9	0.6	50.4	90.4	0.4	33.6	90.6	0.0	0.0	90.1	0.0	0.0	90	0.0	90				
Julio	31	125.2	125.2	90.1	90.1	0.0	0.0	108.4	0.0	0.0	107.9	1.8	156.2	109.2	1.6	138.9	109.6	1.2	104.2	109.1	0.6	52.1	109.3	0.4	34.7	108.7	0.0	0.0	108	0.0	108				
Agosto	31	115.7	115.7	83.3	83.3	0.0	0.0	100.2	0.0	0.0	99.7	0.0	0.0	100.9	1.8	156.2	101.3	1.6	138.9	100.8	1.2	104.2	101.0	0.6	52.1	100.4	0.4	34.7	100	0.0	100				
Septiembre	30	85.3	85.3	61.4	61.4	0.0	0.0	73.9	0.0	0.0	73.6	0.0	0.0	74.4	0.0	0.0	74.7	1.8	151.2	74.4	1.6	134.4	74.5	1.2	100.8	74.1	0.6	50.4	74	0.0	74				
Octubre	31	44.3	44.3	31.9	31.9	0.0	0.0	38.4	0.0	0.0	38.2	0.0	0.0	38.6	0.0	0.0	38.8	0.0	0.0	38.6	1.8	156.2	38.7	1.6	138.9	38.4	1.2	104.2	38	0.0	38				
Noviembre	30	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	151.2	0.0	1.6	134.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Diciembre	31	5.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	156.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
						598.6	550.2	396.2	476.6	476.6	474.4	474.4	479.9	479.9	481.6	481.6	479.4	479.3	480.5	480.5	477.7	477.6	477.7	477.6	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9		
						0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0		0.0
Mes	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>	D <sup>prom</sup>	O <sub>acum</sub>	O <sub>acum</sub>			
Enero	34.7	410.8	376.1	0.0	319.4	319.4	0.0	214.0	214.0	0.0	113.5	113.5	0.0	38.6	38.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Febrero	81.8	410.8	329.1	31.4	319.4	288.1	0.0	214.0	214.0	0.0	113.5	113.5	0.0	38.6	38.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Marzo	185.9	410.8	224.9	83.4	319.4	236.0	34.7	214.0	179.3	0.0	113.5	113.5	0.0	38.6	38.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Abril	320.3	435.8	115.5	184.2	344.3	160.1	85.1	239.2	154.0	33.6	138.7	105.1	0.0	63.7	63.7	0.0	25.2	25.2	0.0	25.1	25.1	0.0	25.1	25.1	0.0	25.1	0.0	25.2	25.0	25.2	25.0	25.2	25.0		
Mayo	476.6	476.6	0.0	323.1	384.9	61.7	189.3	280.2	90.9	85.7	179.9	94.2	34.7	104.7	70.0	0.0	66.3	66.3	0.0	65.9	65.9	0.0	66.2	66.2	0.0	66.2	0.0	66.2	66.2	66.2	66.2	66.2	66.2		
Junio	0.0	89.9	89.9	474.3	474.4	0.0	323.7	370.7	47.1	186.5	270.8	84.3	85.1	195.1	110.0	33.6	156.9	123.3	0.0	156.0	156.0	0.0	156.0	156.0	0.0	156.8	156.0	156.8	156.0	156.8	156.0	156.8			
Julio	0.0	198.3	198.3	0.0	107.9	107.9	479.9	479.9	0.0	325.4	380.3	55.0	189.3	304.2	114.9	85.7	266.2	180.6	34.7	264.7	230.0	0.0	266.0	266.0	0.0	266.0	0.0	266.0	266.0	266.0	266.0	266.0	266.0		
Agosto	0.0	298.5	298.5	0.0	207.7	207.7	0.0	100.9	100.9	481.6	481.6	0.0	328.2	405.0	76.8	189.8	367.3	177.4	86.8	365.1	278.3	34.7	366.9	366.9	33.7	366.9	33.7	366.9	366.9	366.9	366.9	366.9	366.9		
Septiembre	0.0	372.5	372.5	0.0	281.2	281.2	0.0	175.4	175.4	0.0	74.7	74.7	479.4	479.3	0.0	324.2	441.8	117.5	187.6	439.2	251.6	85.1	441.3	441.3	35.6	441.3	35.6	441.3	441.3	441.3	441.3	441.3			
Octubre	0.0	410.8	410.8	0.0	319.4	319.4	0.0	214.0	214.0	0.0	113.5	113.5	0.0	38.6	38.6	480.5	480.5	0.0	326.5	477.6	151.2	189.3	479.9	479.9	29.6	479.9	29.6	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9			
Noviembre	0.0	410.8	410.8	0.0	319.4	319.4	0.0	214.0	214.0	0.0	113.5	113.5	0.0	38.6	38.6	0.0	0.0	0.0	477.7	477.6	0.0	323.7	479.9	479.9	15.6	479.9	15.6	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9			
Diciembre	0.0	410.8	410.8	0.0	319.4	319.4	0.0	214.0	214.0	0.0	113.5	113.5	0.0	38.6	38.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	479.9	479.9	479.9	0.0	479.9	0.0	479.9	479.9	479.9	479.9	479.9			
<b>Volumen de almacenamiento</b>						410.8		319.4		214.0		113.5		114.9		180.6		278.3		409.6		356.2		356.2		356.2		356.2		356.2		356.2		356.2	
<b>Demanda durante el periodo</b>						476.6		474.3		479.9		481.6		479.4		480.5		477.7		479.9		479.9		479.9		479.9		479.9		479.9		479.9		479.9	
<b>Oferta durante el periodo</b>						65.8		154.9		266.0		415.6		415.6		414.2		321.6		214.0		214.0		214.0		214.0		214.0		214.0		214.0		214.0	
<b>Deficit</b>						410.8		319.4		214.0		113.5		63.7		66.3		156.1		265.9		265.9		265.9		265.9		265.9		265.9		265.9		265.9	

En las Figuras 2.42 y 2.43 se observa que si el ciclo de cultivo se desarrolla en época de lluvias el agua se va utilizando conforme a las necesidades de riego y el volumen de diseño es menor comparado al escenario donde el ciclo de cultivo se desarrolla en época de estiaje donde es necesario contar con un volumen de almacenamiento mucho mayor para completar el ciclo vegetativo del cultivo en condiciones de ausencia de lluvia.

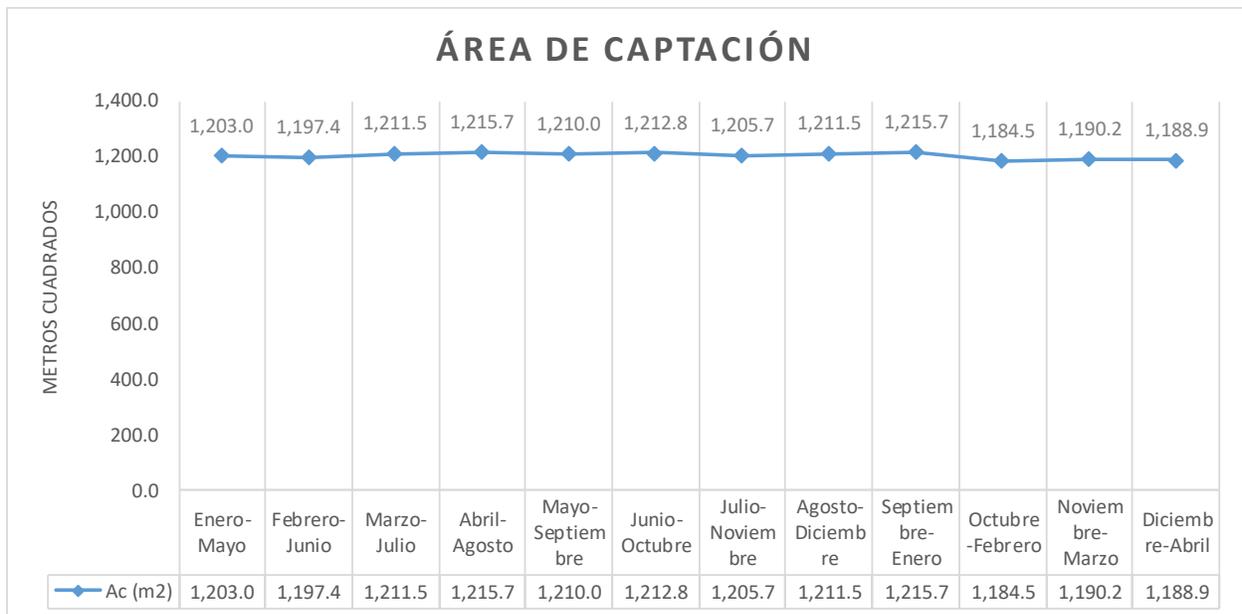


Figura 2.42. Área de captación análisis Chapingo – cultivo de Jitomate.

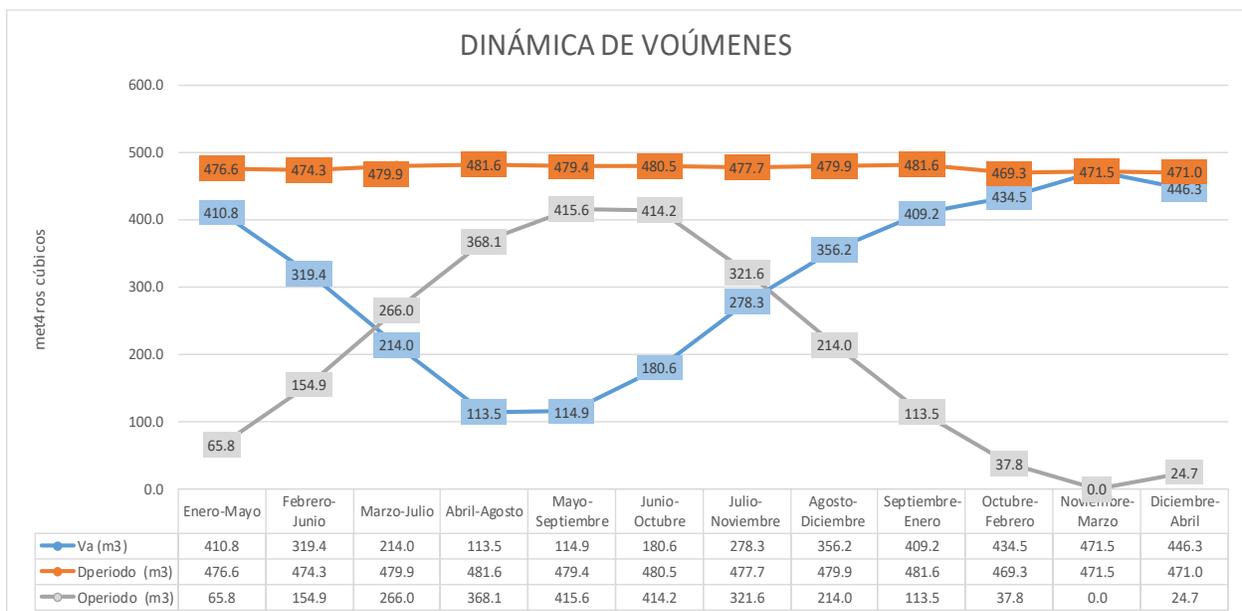


Figura 2.43. Dinámica de volúmenes análisis Chapingo – cultivo de Jitomate.

En el Cuadro 2.36 se observa:

- La nave de 1,000 m<sup>2</sup> si es suficiente para captar la cantidad de agua necesaria (aprox. 470-480m<sup>3</sup>). La necesidad de riego se alcanza con una superficie incluso menor (aprox. 691 – 707m<sup>2</sup>).
- Si el ciclo de cultivo se desarrolla en época de estiaje el volumen de diseño es superior y decrece mientras el ciclo de cultivo se acerca a la época de lluvia.

Cuadro 2.36. Análisis del potencial de aprovechamiento de agua de lluvia – A. P. - Cultivo de jitomate. Diferentes ciclos de cultivo. Capulhuac.

Estación climatológica		CAPULHUAC			15014			00015014 CAPULHUAC			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic									
No de plantas		2,800			Ingresar el número de plantas						10.0	9.4	12.2	26.1	66.2	168.2	219.6	221.2	157.5	87.1	20.0	9.4									
C <sub>e</sub>		0.8			Ingresar el coeficiente de escurrimiento de la superficie de captación																										
n <sub>a</sub>		0.9			Ingresar el valor probabilístico asociado al evento de lluvia																										
Area de captación					699.7			696.4			704.6			707.1			703.8			705.5			701.3			704.6					
					Enero-Mayo			Febrero-Junio			Marzo-Julio			Abril-Agosto			Mayo-Septiembre			Junio-Octubre			Julio-Noviembre			Agosto-Diciembre					
Mes	No días	PP Estación	PP aprov	PP aprovneto	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>	Nec riego	D <sub>mensual</sub>	O <sub>Lluvia</sub>			
Enero	31	10.0	0.0	0.0	0.4	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Febrero	28	9.4	0.0	0.0	0.6	47.0	0.0	0.4	31.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Marzo	31	12.2	0.0	0.0	1.2	104.2	0.0	0.6	52.1	0.0	0.4	34.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Abril	30	26.1	26.1	18.8	1.6	134.4	13.1	1.2	100.8	13.1	0.6	50.4	13.2	0.4	33.6	13.3	0.0	0.0	13.2	0.0	0.0	13.3	0.0	0.0	13.2	0.0	0.0	13.2	0.0	13.2	
Mayo	31	66.2	66.2	47.7	1.8	156.2	33.4	1.6	138.9	33.2	1.2	104.2	33.6	0.6	52.1	33.7	0.4	34.7	33.6	0.0	0.0	33.6	0.0	0.0	33.4	0.0	0.0	33.6	0.0	33.6	
Junio	30	168.2	168.2	121.1	0.0	0.0	84.7	1.8	151.2	84.3	1.6	134.4	85.3	1.2	100.8	85.6	0.6	50.4	85.2	0.4	33.6	85.4	0.0	0.0	84.9	0.0	0.0	85.3	0.0	85.3	
Julio	31	219.6	219.6	158.1	0.0	0.0	110.6	0.0	0.0	110.1	1.8	156.2	111.4	1.6	138.9	111.8	1.2	104.2	111.3	0.6	52.1	111.6	0.4	34.7	110.9	0.0	0.0	111.4	0.0	111.4	
Agosto	31	221.2	221.2	159.3	0.0	0.0	111.4	0.0	0.0	110.9	0.0	0.0	112.2	1.8	156.2	112.6	1.6	138.9	112.1	1.2	104.2	112.4	0.6	52.1	111.7	0.4	34.7	112.2	0.0	112.2	
Septiembre	30	157.5	157.5	113.4	0.0	0.0	79.4	0.0	0.0	79.0	0.0	0.0	79.9	0.0	0.0	80.2	1.8	151.2	79.8	1.6	134.4	80.0	1.2	100.8	79.5	0.6	50.4	79.9	0.0	79.9	
Octubre	31	87.1	87.1	62.7	0.0	0.0	43.9	0.0	0.0	43.7	0.0	0.0	44.2	0.0	0.0	44.4	0.0	0.0	44.2	1.8	156.2	44.3	1.6	138.9	44.0	1.2	104.2	44.2	0.0	44.2	
Noviembre	30	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	151.2	0.0	1.6	134.4	0.0
Diciembre	31	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	156.2	0.0	1.8	156.2
					1006.95	946.0	681.1	476.6	476.6	476.6	474.3	474.3	479.9	479.9	481.6	481.6	479.4	479.4	480.5	480.5	480.5	480.5	477.7	477.7	477.7	477.7	477.7	477.7	479.9	479.9	
					0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0			0.0		0.0
					Enero-Mayo			Febrero-Junio			Marzo-Julio			Abril-Agosto			Mayo-Septiembre			Junio-Octubre			Julio-Noviembre			Agosto-Diciembre					
Mes	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	D <sup>acum</sup>	O <sup>acum</sup>	
Enero	34.7	430.1	395.4	0.0	343.7	343.7	0.0	236.4	236.4	0.0	124.6	124.6	0.0	44.2	44.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Febrero	81.8	430.1	348.3	31.4	343.7	312.4	0.0	236.4	236.4	0.0	124.6	124.6	0.0	44.2	44.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Marzo	185.9	430.1	244.2	83.4	343.7	260.3	34.7	236.4	201.6	0.0	124.6	124.6	0.0	44.2	44.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Abril	320.3	443.2	122.9	184.2	356.8	172.6	85.1	249.6	164.5	33.6	137.9	104.3	0.0	57.4	57.4	0.0	13.3	13.3	0.0	13.3	13.3	0.0	13.2	13.2	0.0	13.2	13.2	0.0	13.2	13.2	
Mayo	476.6	476.6	0.0	323.1	390.0	66.9	189.3	283.2	93.9	85.7	171.6	85.9	34.7	90.9	56.2	0.0	46.9	46.9	0.0	46.9	46.9	0.0	46.6	46.6	0.0	46.6	46.6	0.0	46.6	46.8	
Junio	0.0	84.7	84.7	474.3	474.3	0.0	323.7	368.5	44.8	186.5	257.2	70.7	85.1	176.2	91.0	33.6	132.3	98.7	0.0	131.5	131.5	0.0	132.1	132.1	0.0	132.1	132.1	0.0	132.1	132.1	
Julio	0.0	195.4	195.4	0.0	110.1	110.1	479.9	479.9	0.0	325.4	369.0	43.6	189.3	287.4	98.2	85.7	243.9	158.2	34.7	242.4	207.7	0.0	243.6	243.6	0.0	243.6	243.6	0.0	243.6	243.6	
Agosto	0.0	306.8	306.8	0.0	221.0	221.0	0.0	112.2	112.2	481.6	481.6	0.0	328.2	399.5	71.4	189.8	356.2	166.4	86.8	354.1	267.3	34.7	355.8	321.1	0.0	355.8	321.1	0.0	355.8	321.1	
Septiembre	0.0	386.2	386.2	0.0	300.0	300.0	0.0	192.2	192.2	0.0	80.2	80.2	479.4	479.4	0.0	324.2	436.3	112.0	187.6	433.7	246.1	85.1	435.7	350.6	0.0	435.7	350.6	0.0	435.7	350.6	
Octubre	0.0	430.1	430.1	0.0	343.7	343.7	0.0	236.4	236.4	0.0	124.6	124.6	0.0	44.2	44.2	480.5	480.5	0.0	326.5	477.7	151.2	189.3	479.9	290.6	0.0	479.9	290.6	0.0	479.9	290.6	
Noviembre	0.0	430.1	430.1	0.0	343.7	343.7	0.0	236.4	236.4	0.0	124.6	124.6	0.0	44.2	44.2	0.0	0.0	0.0	477.7	477.7	0.0	323.7	479.9	156.2	0.0	479.9	156.2	0.0	479.9	156.2	
Diciembre	0.0	430.1	430.1	0.0	343.7	343.7	0.0	236.4	236.4	0.0	124.6	124.6	0.0	44.2	44.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	479.9	479.9	0.0	0.0	479.9	0.0	0.0	479.9	0.0
Volumen de almacenamiento					430.1		343.7		236.4		124.6		98.2		166.4		267.3		350.6		403.2		350.6		403.2		350.6		403.2		350.6
Demanda durante el periodo					476.6		474.3		479.9		481.6		479.4		480.5		477.7		479.9		477.7		479.9		479.9		479.9		479.9		479.9
Oferta durante el periodo					46.5		130.6		243.6		357.0		422.0		433.6		346.1		236.4		236.4		236.4		236.4		236.4		236.4		236.4
Deficit					430.1		343.7		236.4		124.6		57.4		46.8		131.5		243.6		243.6		243.6		243.6		243.6		243.6		243.6

En las Figuras 2.44 y 2.45 se observa que si el ciclo de cultivo se desarrolla en época de lluvias el agua se va utilizando conforme a las necesidades de riego y el volumen de diseño es menor comparado al escenario donde el ciclo de cultivo se desarrolla en época de estiaje donde es necesario contar con un volumen de almacenamiento mucho mayor para completar el ciclo vegetativo del cultivo en condiciones de ausencia de lluvia.

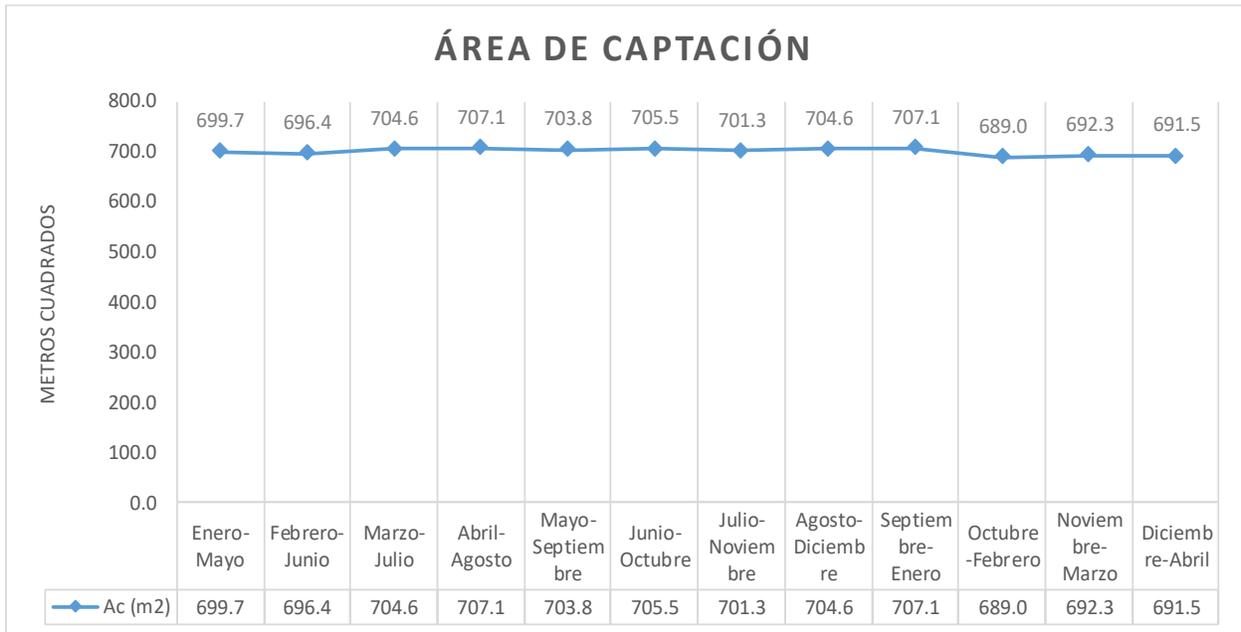


Figura 2.44. Área de captación análisis Capulhuac – cultivo de Jitomate.

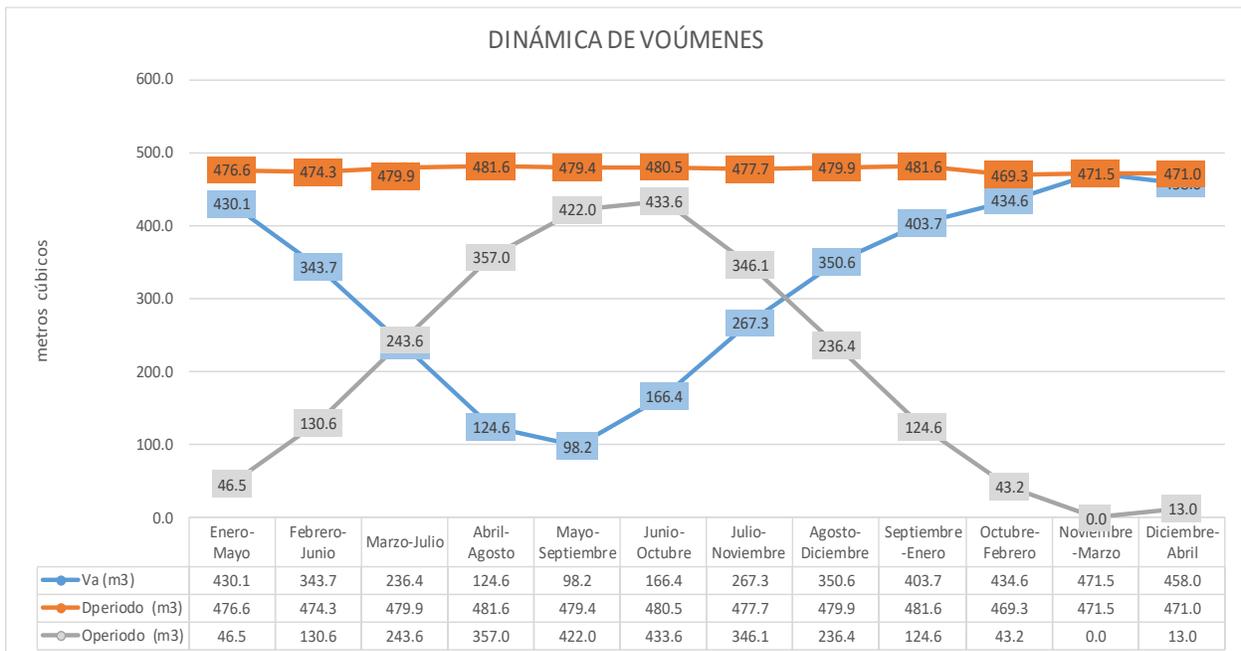


Figura 2.45. Dinámica de volúmenes análisis Capulhuac – cultivo de Jitomate.

Al comparar los escenarios de Chapingo y Capulhuac (**Cuadro 2.37**) observamos que a mayor precipitación las áreas de captación de diseño son menores  $pp_{\text{Capulhuac}} > pp_{\text{Chapingo}}$  ---  $Ac_{\text{Chapingo}} > Ac_{\text{Capulhuac}}$ . En el escenario de Chapingo la nave de 1,000m<sup>2</sup> no satisface las necesidades de riego

del cultivo de jitomate. En el escenario de Capulhuac la nave de 1,000m<sup>2</sup> satisface las necesidades de riego del cultivo de jitomate.

Cuadro 2.37. Comparación entre los análisis de la estación Chapingo vs Capulhuac.

Variable	Estación Chapingo	Estación Capulhuac
Precipitación anual, mm	598.6	1,006.95
Precipitación anual aprovechable, mm	550.2	946.0
Demanda promedio del cultivo, m <sup>3</sup>	476.9	476.9
Precipitación anual aprovechable neta, mm	396.2	681.1
Área de captación de diseño mínima, m <sup>2</sup>	1,184.5	689.0
Área de captación de diseño máxima, m <sup>2</sup>	1,215.7	707.1
Volumen de almacenamiento de diseño mínimo, m <sup>3</sup>	113.5	98.2
Volumen de almacenamiento de diseño máximo, m <sup>3</sup>	471.5	471.5

### 2.5.3. Potencial térmico por región (estado)

Se prevé que en los próximos años haya un aumento de la temperatura, que provocaría un aumento de la evaporación y evapotranspiración, así como la reducción de la precipitación, que conlleva a una redistribución del recurso hídrico. La distribución de los seres vivos (cultivo, ganado y ecosistemas naturales) serán afectados por las variaciones de la distribución del agua y la temperatura (Sánchez-Salazar & Martínez-Galicia, 2006) citado por (Moreno Reséndez, Aguilar Durón, & Luévano González, 2011).

El aumento de la demanda de alimentos por una población creciente trae consigo un aumento en la actividad agrícola. Con las técnicas modernas se ha logrado aumentar la producción, aunque esto trae consigo afectaciones al medio ambiente. El potencial productivo está relacionado con la producción agrícola ya que esta deriva de la búsqueda para satisfacer las demandas con menos tierra agrícola y agua, por lo que el cultivar en zonas aptas reduce los costos.

La actividad agrícola moderna ha generado además de aumentos en la producción, afectaciones al medio ambiente. El aumento de las necesidades de alimentos ha generado que el hombre busque satisfacer el aumento de las demandas con menos tierra agrícola y agua (Armendáriz-Erives, 2007).

En un estudio de potencial productivo de un cultivo, son necesarios dos procesos básicos, la definición de los requerimientos agroecológicos del cultivo y el contraste de éstos con las condiciones ambientales de la región donde se pretende producir. Al producir un cultivo en un lugar donde los requerimientos agroecológicos están cubiertos se asegura un mejor rendimiento con mayores ganancias y menor impacto ambiental.

La determinación del potencial productivo ha sido de especial interés en la producción de cultivos a cielo abierto y de temporal. En los estudios de potencial productivo que se han realizado se

consideran principalmente factores climáticos, topográficos y edafológicos. Además, se analiza el potencial productivo de varios cultivos en estudios que pueden ser regionales o hasta nacionales.

Sin embargo, estos estudios de potencial tienen que ser adaptados para la agricultura protegida, ya que en esta modalidad se tiene control parcial o total de gran parte de las condiciones limitantes del desarrollo de un cultivo. En el caso de invernaderos de alta tecnología, las condiciones ambientales externas producen menos afectaciones que en invernaderos de mediana o baja tecnología. Por lo tanto, este estudio de potencial productivo puede ser aplicado principalmente para instalaciones de mediana y baja tecnología.

Como primer paso se estableció la efectividad térmica en invernadero, la cual está basada en la efectividad de la temperatura ambiental dentro de un rango de temperaturas. La estimación de la efectividad de la temperatura fue mediante el uso de una ecuación que define una función peso:

$$w_i = \operatorname{erfc}\left(\frac{(T_i - T_e)^2}{A^2}\right) \quad (26)$$

Donde A representa la amplitud de la variable, en este caso temperatura,  $T_i$  es el valor observado, y  $T_e$  es el valor óptimo de la variable. Los valores de  $T_e$  y A, se aplican en función de los óptimos reportados por la bibliografía para los cultivos que vayan a utilizarse.

Este razonamiento está basado en el hecho de que a medida que los valores de las variables climáticas registradas en el invernadero se aproximen al óptimo promedio, la efectividad tiende a la unidad de acuerdo con la **Figura 2.46** que muestra los pesos. Para el jitomate, se consideró un promedio óptimo de temperatura media diaria ( $T_e$ ) de 21 °C y una amplitud  $A=10$ . La figura 4 muestra gráficamente la distribución del peso  $w_i$  para la temperatura.

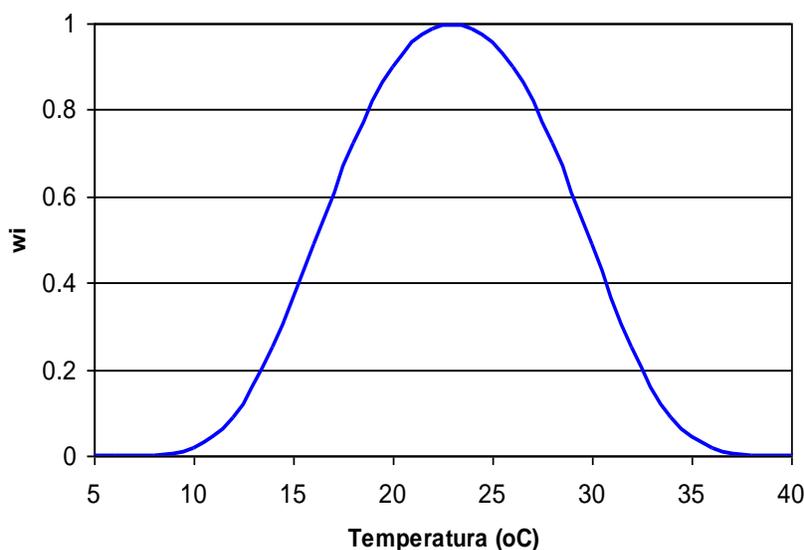


Figura 2.46. Variación del peso en función de la temperatura

La función  $erfc(x)$  representa la función error complemento. Una aproximación racional de la función  $erfc(x)$ , para  $z \geq 0$ , representada por Abramowitz and Stegun (1972) está dada por:

$$erfc(x) = \left[ 1 + \sum_{k=1}^4 a_k z^k \right]^{-4} \quad (27)$$

donde los valores de  $a_1, a_2, a_3$  y  $a_4$  son constantes dadas por 0.278393, 0.230389, 0.000972, y 0.078108, respectivamente.

El valor diario de los Grados de Efectividad Térmica (GET), para una temperatura diaria ( $T_i$ ) puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$DGE = w_i T_i \quad (28)$$

donde  $w_i$  es evaluado de acuerdo con la ecuación 26.

Si la temperatura ambiental diaria  $T_j$  es cercana al valor óptimo  $T_e$  el valor  $w_j$  es cercano a uno y los Grados de Efectividad Térmica (GET) entonces son cercanos también a  $T_e$ .

Los valores acumulados de GET definen cuantitativamente la efectividad de un invernadero para mantener condiciones propicias para un cultivo. Los valores acumulados de GET se estiman de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sum DGE = \sum_{i=1}^N w_i T_i = \sum_{i=1}^N DGE \quad (29)$$

donde N es el número de días bajo estudio.

Aplicando este criterio, se estimaron los GET para cada una de las estaciones de los estados de estudio considerando la temperatura media diaria. La **Figura 2.47** muestra los GET acumulados para el Estado de México. Se observa que en la región norte centro del estado los GET son bajos (<2000), lo que indica que no se tiene tiempo suficiente para completar el ciclo del cultivo de jitomate. Sin embargo, en estas regiones pueden producirse plántulas u otros cultivos que tengan similitudes en los rangos de temperatura pero que requieran un ciclo menor.

En el caso del estado de San Luis Potosí (**Figura 2.48**), los GET acumulados son en su mayoría superiores a 3700, lo cual indica que gran parte del territorio del estado es potencialmente apto para el cultivo de jitomate en invernadero. Sin embargo, a pesar de que muchas zonas presentan temperaturas dentro del rango óptimo para el cultivo de jitomate, deben considerarse aquellas en las que los asentamientos humanos impiden la producción agrícola. Estas zonas no son aptas para el cultivo en invernaderos convencionales.

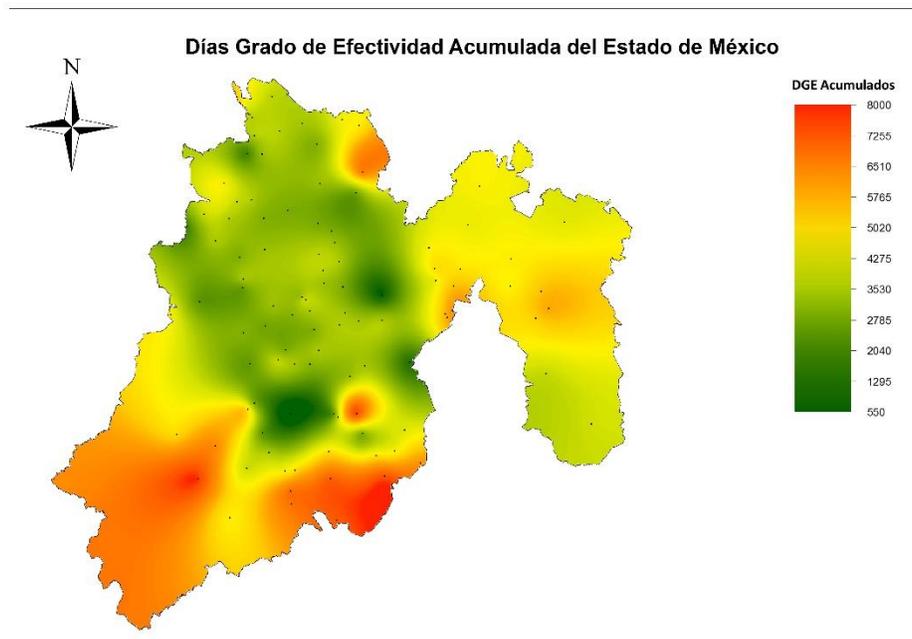


Figura 2.47. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el Estado de México.

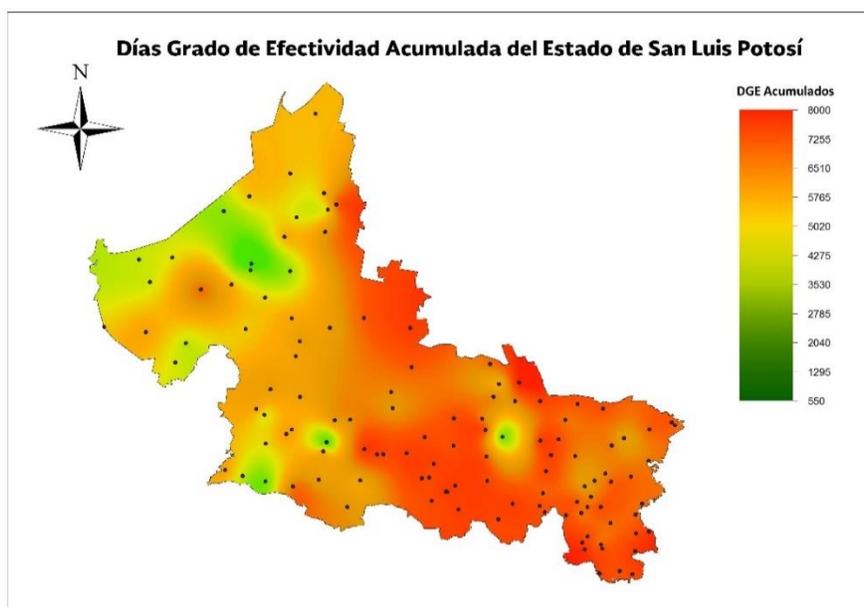


Figura 2.48. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de San Luis Potosí.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

Los GET acumulados en el estado de Jalisco (**Figura 2.49**) llegan a valores cercanos a los 8000, lo que indica que en estas zonas se tiene la eficiencia térmica cercana al óptimo durante todo el año. También hay zonas con poca cantidad de GET acumulados, entre 4000 y 5000, lo que indica que en éstas el cultivo puede demorar más en su crecimiento y producción.

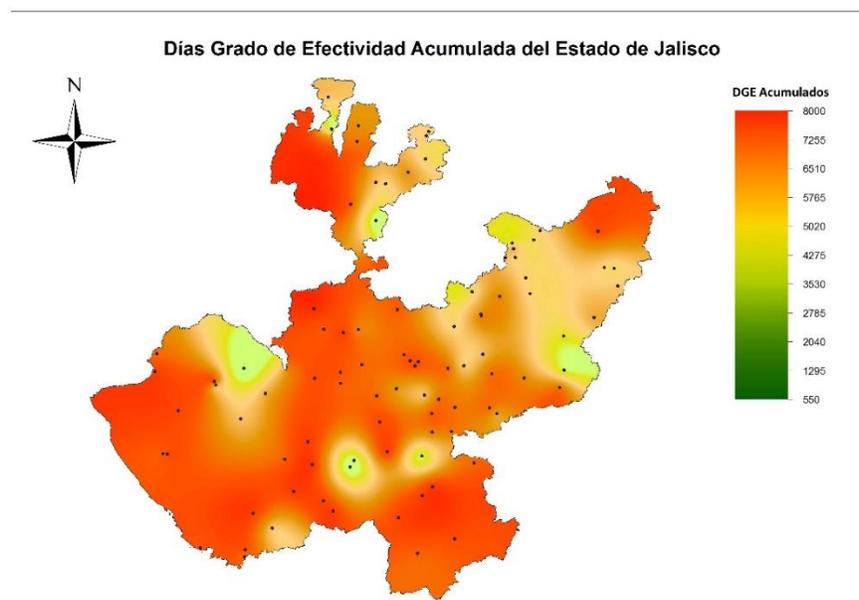


Figura 2.49. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de Jalisco.

En gran parte del estado de Michoacán se tienen valores de GET superiores a 5000 (**Figura 2.50**), por lo que en la mayor parte del año se producen temperaturas cercanas al óptimo para la producción de jitomate en invernadero. En la parte central y oeste del estado de Michoacán presenta los valores acumulados de GET más bajos, con lo que la producción del cultivo de jitomate se puede atrasar.

El estado de Sinaloa (**Figura 2.51**) presenta valores de GET acumulados superiores a 6500, lo que indica que en la mayor parte del año se tienen temperaturas cercanas al óptimo para la producción de jitomate. Las zonas con mayor cantidad de GET acumulados se encuentran en el centro y sur del estado de Sinaloa, donde podrían cubrirse dos ciclos de cultivo en el año.

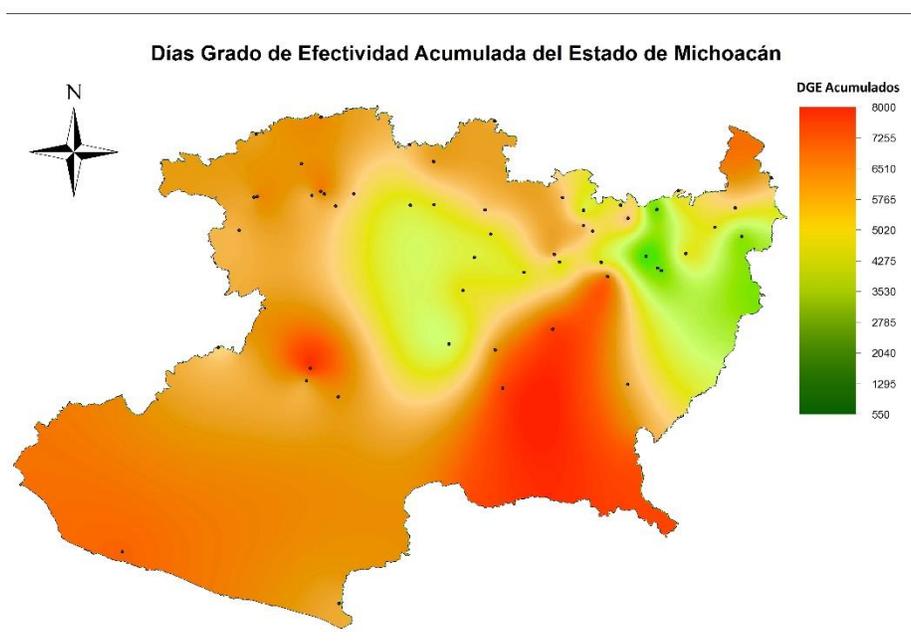


Figura 2.50. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de Michoacán.

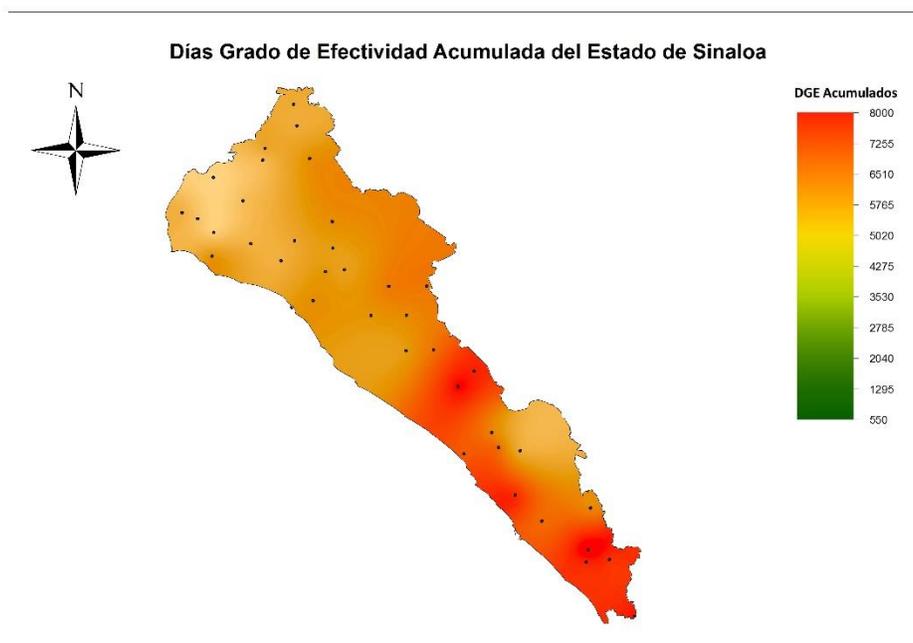


Figura 2.51. Grados de Efectividad Térmica acumulados para el estado de Sinaloa.  
Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2017.

La eficiencia térmica basada en la función peso fue evaluada en cinco estaciones del Estado de México y San Luis Potosí. Se eligieron estaciones que presentaran condiciones climáticas contrastantes. Además, se consideraron cuatro rangos de eficiencia partiendo del 20% hasta 100%. También se consideraron los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno para ver la distribución de la eficiencia térmica en el tiempo.

De acuerdo con SAGARPA (2017) la producción agrícola mexicana se divide en dos temporadas: primavera-verano y otoño-invierno. La primera va del 1 de marzo al 30 de septiembre, y la segunda del 1 de octubre al 28 de febrero. En México casi tres cuartas partes de la superficie agrícola se destinan a cultivos del tipo cíclico, 54 por ciento para Primavera/Verano y 17 por ciento para Otoño/Invierno.

En la **Figura 2.52** se observa que la mayor cantidad de días con eficiencia térmica superior al 60% en la estación Chalco, Estado de México, se presentan durante el ciclo primavera-verano. En el ciclo de otoño-invierno, en esta estación, la mayor parte de los días tienen eficiencia térmica entre 20 y 40. En este escenario, el periodo primavera-verano es el más adecuado, mientras que en el periodo otoño-invierno no es recomendable cultivar jitomate.

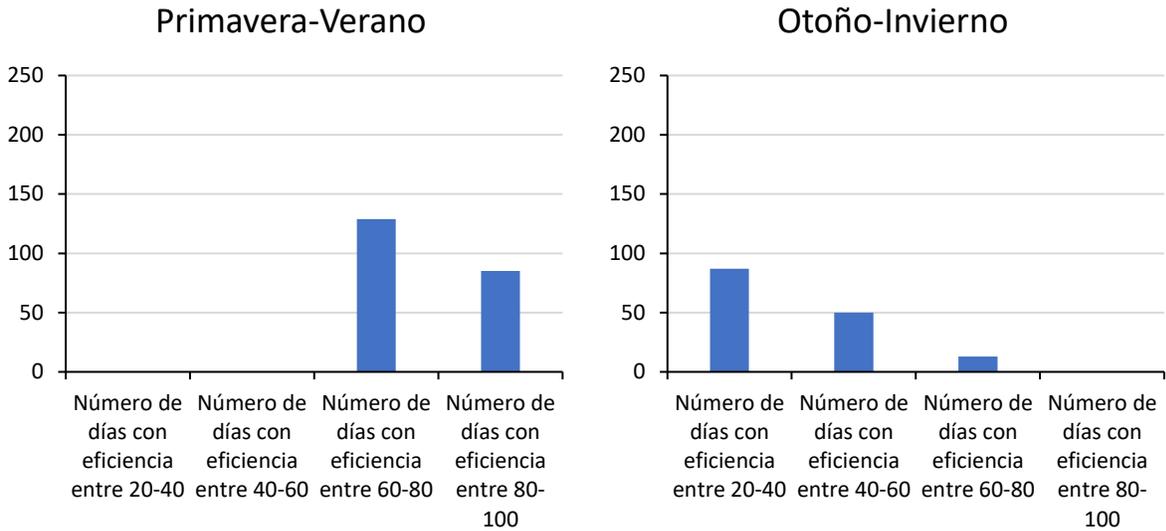


Figura 2.52. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15020, Chalco, Estado de México.

En la estación Tecámac, Estado de México la mayor eficiencia térmica del invernadero ocurre en el ciclo primavera-verano, con casi 200 días con eficiencia térmica entre 80 y 100% (Figura 2.53). Esto permite el desarrollo óptimo del cultivo durante más de 6 meses, lo cual es suficiente para completar todo el ciclo del cultivo de jitomate. En el caso del ciclo otoño-invierno gran parte de los días (80) presentan eficiencias entre 40 y 60%, aunque también ocurren algunos días (25) con eficiencia térmica entre el 80 y 100%.

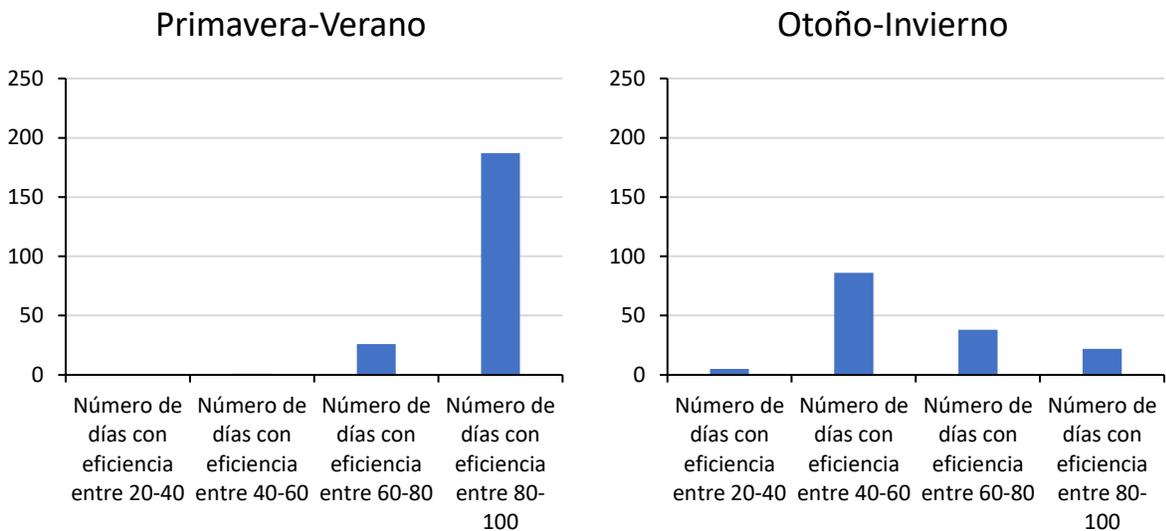


Figura 2.53. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15022, Tecámac, Estado de México.

La estación Tonatico en el Estado de México, se encuentra en una zona de temperaturas relativamente altas para el estado de México, con temperaturas medias en todo el año entre 17 y 23 °C. En el caso particular de esta estación en ambos ciclos (primavera-verano y otoño invierno) se tienen todos los días con eficiencia térmica entre 80 y 100% (**Figura 2.54**). En ambos ciclos el cultivo de jitomate se encuentra en el óptimo de temperaturas para desarrollarse completamente sin que su desarrollo se vea disminuido. En el ciclo primavera-verano se tienen 214 días (siete meses) con eficiencia térmica entre 80 y 100%, mientras que en el ciclo otoño-invierno se tienen 151 días (cinco meses).

En la zona fría del Estado de México se encuentra la estación Metepec, en la cual la mayor parte de la eficiencia térmica para el periodo primavera-verano está entre el 60 y 80% (**Figura 2.55**). Se tienen 177 días con eficiencia entre 60 y 80%, por lo que es posible completar el desarrollo del cultivo en un tiempo aceptable. En el caso del ciclo otoño-invierno la mayor parte de los días (84) tienen eficiencias muy bajas (entre 20 y 40%). La disminución de la eficiencia térmica en el ciclo otoño-invierno ocasiona el retraso en el desarrollo del cultivo, pudiendo incluso reducir considerablemente el rendimiento.

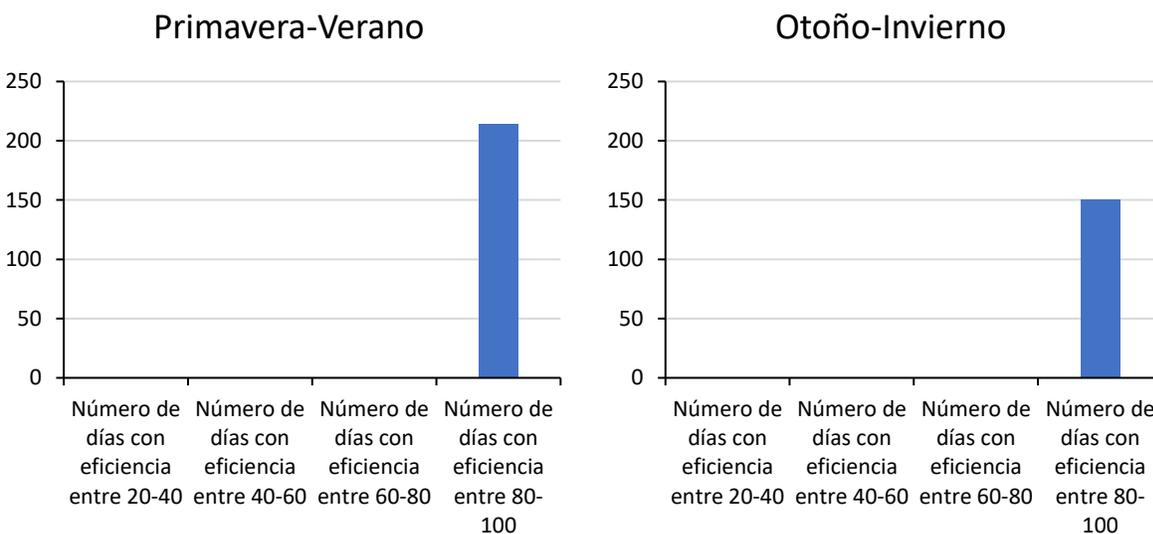


Figura 2.54. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15248, Tonatico, Estado de México.

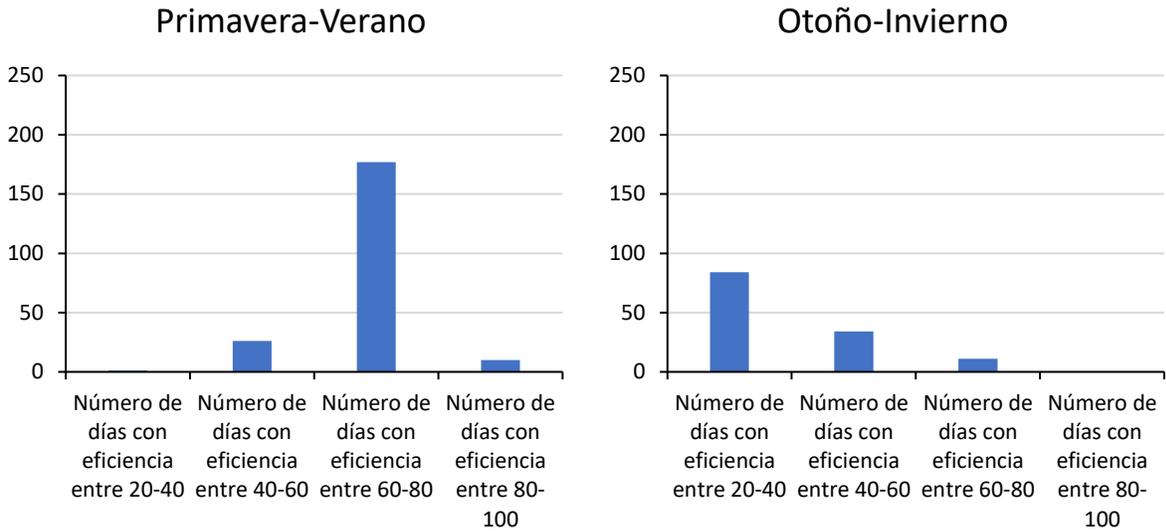


Figura 2.55. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15266, Metepec, Estado de México.

La estación Tejupilco se localiza en la zona sur de estado de México, cerca del estado de Guerrero. En esta zona se encuentran las temperaturas medias más altas del estado. La eficiencia térmica del invernadero en el ciclo primavera-verano se encuentra entre el 80 y 100% durante los 214 días del ciclo (Figura 2.56). El ciclo otoño-invierno también presenta eficiencias entre 80 y 100 % en toda su duración (151 días).

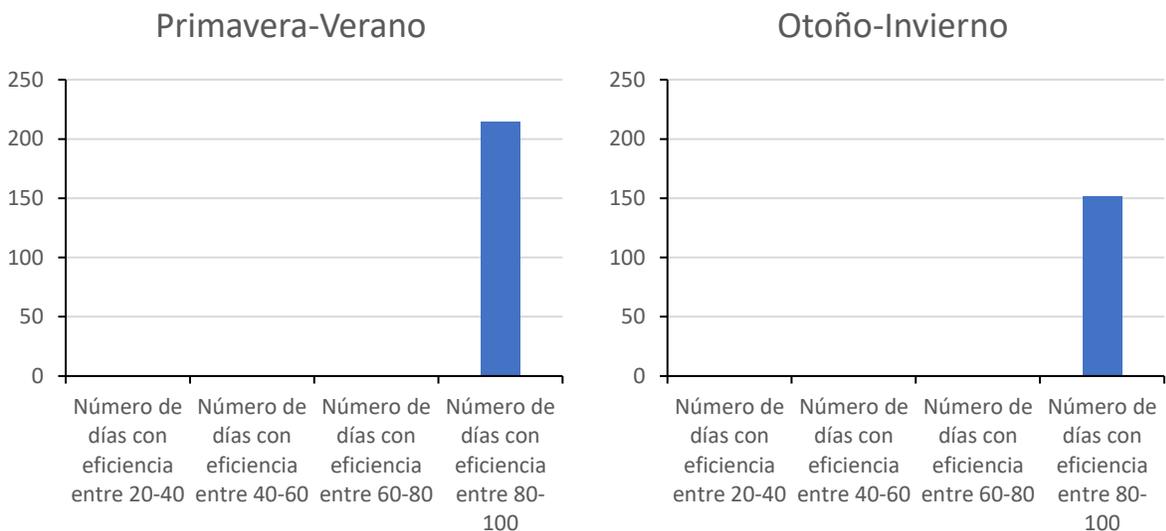


Figura 2.56. Eficiencia térmica en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la estación 15328, Tejupilco, Estado de México.

En la **Figura 2.57** se muestra una comparativa de las cinco estaciones analizadas. Se observa claramente que las estaciones de Tonatico y Tejupilco presentan las mayores eficiencias térmicas durante todo el año. Esto debido a que se encuentran en zonas con temperaturas medias entre 17 y 25 °C, las más cálidas del Estado de México. La estación Tecámac se encuentra en una zona con temperaturas medias moderadas, por lo que la eficiencia térmica en todo el año no baja del 40%, manteniéndose las eficiencias más altas en el ciclo primavera verano. La estación con las eficiencias más bajas durante el año es Metepec, ya que esta se encuentra en la zona alejada al nevado de Toluca, donde las temperaturas medias diarias son bajas (entre 9 y 15 °C).

En el ciclo primavera-verano para las cinco estaciones analizadas se tienen eficiencias superiores al 40% (**Figura 2.58**). A mediados del mes de marzo la eficiencia térmica comienza a aumentar en las estaciones de zonas frías y se mantiene superior al 60% hasta mediados del mes de agosto. En el caso de las estaciones de zonas cálidas, la eficiencia térmica disminuye en el mes de mayo debido a la incidencia de temperaturas altas en ese mes. Las temperaturas altas también disminuyen la eficiencia térmica ya que se encuentran alejadas de la temperatura óptima, y la función peso comienza a disminuir a valores superiores al óptimo establecido.

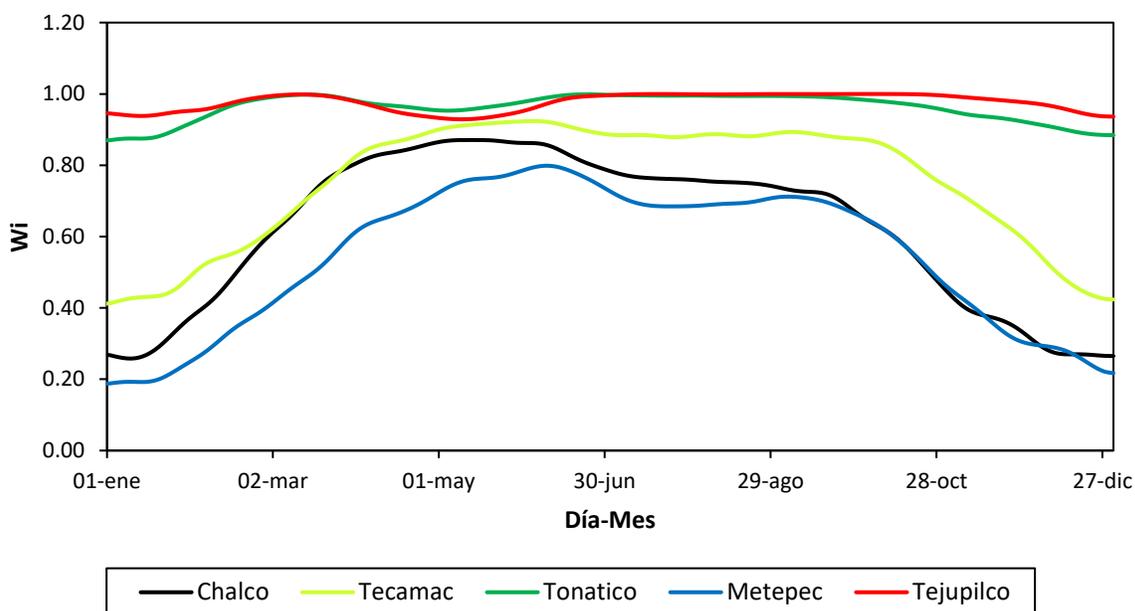


Figura 2.57. Distribución de la eficiencia térmica del invernadero durante todo el año en las cinco estaciones analizadas del Estado de México.

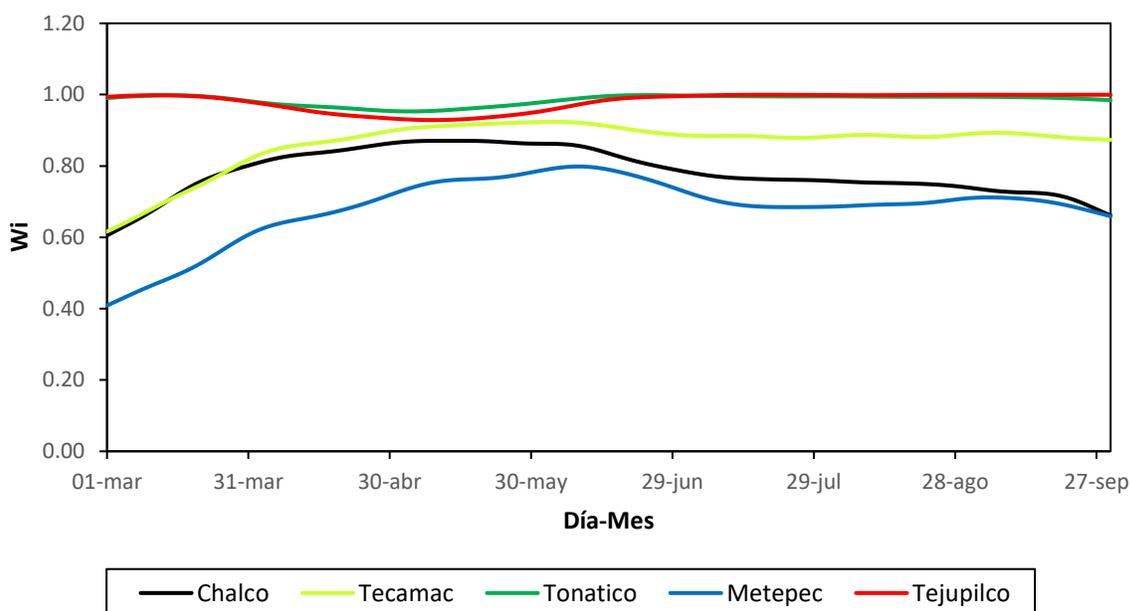


Figura 2.58. Distribución de la eficiencia térmica del invernadero durante el ciclo primavera-verano en las cinco estaciones analizadas del Estado de México.

## 2.6. Modelo numérico de CFD

### 2.6.1. Variabilidad climática

México se localiza en el hemisferio norte, en el continente americano. Se extiende entre los paralelos  $14^{\circ} 32' 27''$  en la desembocadura del río Suchiate y el paralelo  $32^{\circ} 43' 06''$  que pasa por la confluencia del río Gila con el Colorado; también está comprendido entre las longitudes oeste de Greenwich de  $118^{\circ} 22' 00''$  y  $86^{\circ} 42' 36''$  respectivamente.

En el artículo 42 de la Constitución Política de México se especifica que el país está integrado por entidades federativas; islas, arrecifes y cayos en los mares adyacentes; las islas Guadalupe y Benito Juárez; la plataforma continental y los zócalos submarinos; las aguas de los mares territoriales y los mares interiores, y el espacio aéreo situado sobre el territorio nacional (Tamayo (1993) citado por INEGI (2017)).

#### Estado de México

El 73% del estado presenta clima templado subhúmedo, localizado en los valles altos del norte, centro y este; el 21% es cálido subhúmedo y se encuentra hacia el suroeste, el 6% seco y semiseco, presente en el noreste, y 0.16% clima frío, localizado en las partes altas de los volcanes.

La temperatura media anual es de  $14.7^{\circ}\text{C}$ , las temperaturas más bajas se presentan en los meses de enero y febrero son alrededor de  $3.0^{\circ}\text{C}$ . La temperatura máxima promedio se presentan en abril y mayo es alrededor de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media del estado es de 900 mm anuales. El Nevado de Toluca (Alberge, Estación de Microondas), se registra una temperatura media anual de 3.9°C, que es la más baja de todo el país. En el estado se practica la agricultura de riego y de temporal siendo los principales cultivos: maíz, chícharo verde, cebada, frijol, papa, alfalfa, trigo, aguacate y guayaba entre otros.

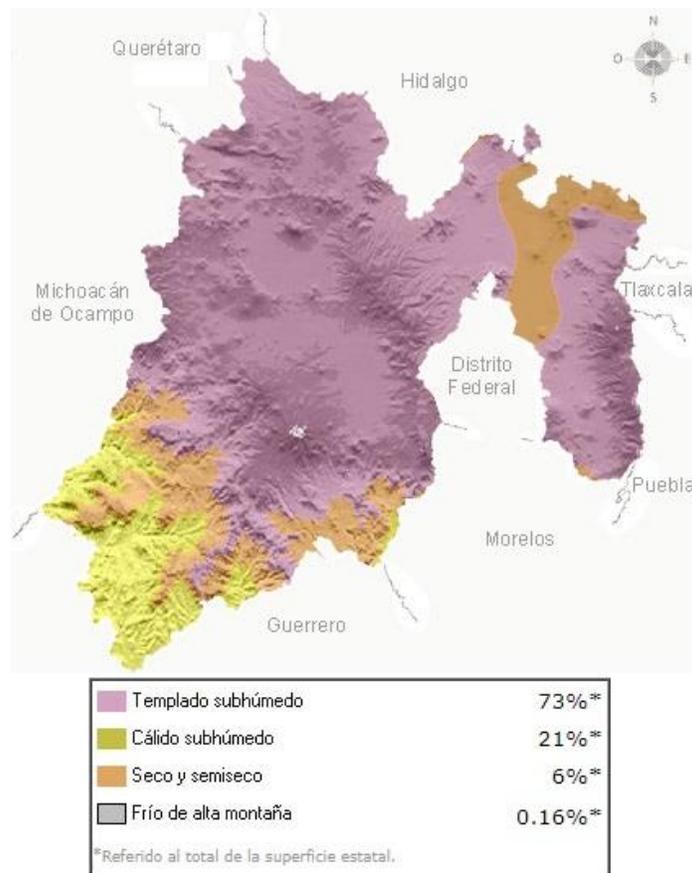


Figura 2.59. Climas del Estado de México.

Fuente: INEGI, 2017.

### San Luis Potosí

El clima que predomina es el seco y semiseco ya que se presenta en el 71% de la superficie del estado localizado en las región conocida como El Salado, el 15% está representado por el clima cálido subhúmedo, localizado en la parte este de la Sierra Madre Oriental, el 10% está representado por clima cálido húmedo, el cual se localiza hacia la Llanura Costera del Golfo, el 2.5% es clima muy seco localizado en la Mesa del Centro, el 1.5% es templado subhúmedo y se

localiza en las llanuras que se encuentran entre las sierras, también se presenta clima templado húmedo en un porcentaje muy pequeño del 0.2 hacia el sureste del estado.

La temperatura media anual del estado es de 21°C, la temperatura mínima promedio es de 8.4°C que se presenta en el mes de enero y la máxima promedio es alrededor de 32°C se presenta en el mes de mayo.

Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media del estado es alrededor de 950 mm anuales.

La actividad agrícola se realiza principalmente en la zona de la huasteca, donde se presentan los climas cálidos húmedos y subhúmedos, con cultivos como el maíz, cártamo, frijol, cebada, caña de azúcar, naranja, café, limón agrio, tuna y mango.

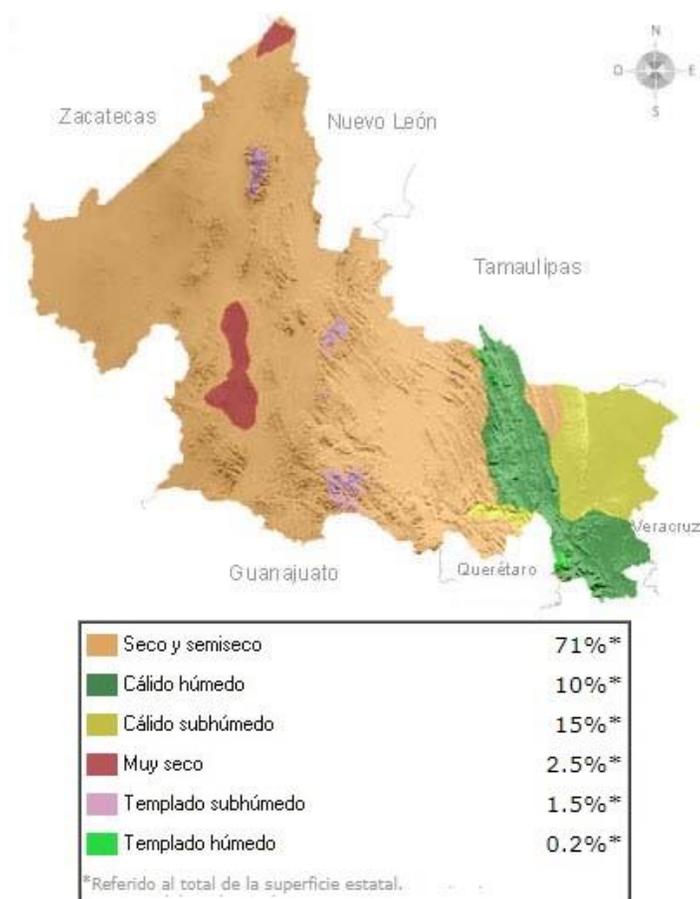


Figura 2.60. Climas del estado de San Luis Potosí.

Fuente: INEGI, 2017.

Una parte importante en la recopilación de información para la elaboración de mapas temáticos es la disponibilidad de información climática actualizada y confiable (Díaz et al., 2012).

Un análisis medioambiental localizado puede ayudar a resolver los problemas de intentar importar tecnologías de regiones ambientales diferentes originada por la gran variabilidad de condiciones climáticas espaciotemporales que se tienen en el país.

Esta generalización en la instalación de las estructuras sin tomar en cuentas las condiciones climáticas genera problemas en la producción, ya que en los invernaderos tipo túnel se genera demasiada concentración de calor y humedad relativa, además de dificultar la circulación del aire en zonas con temperaturas ambientales elevadas.

En México pueden encontrarse varios tipos de estructuras aplicadas en la agricultura protegida. Uno de los invernaderos más comunes es el tipo túnel, que se ha instalado de igual manera en zonas húmedas como en zonas secas. Otro modelo de invernadero que se ha implementado en México es el vertitúnel. Este invernadero también presenta problemas de alta temperatura en días soleados, además de acumular la humedad relativa y tener problemas de circulación de aire.

El factor primordial en la elección de un invernadero es la variación del clima en la región donde se establecerá. Dada la variabilidad del clima en la República Mexicana, se debe considerar la elección de un tipo de invernadero que mejore las condiciones ambientales para que el cultivo se desarrolle de forma óptima, lo que genera que en cada región se haga uso de diferentes invernaderos.

La sensibilidad de los cultivos a las variaciones ambientales ocasiona que el control del clima en los invernaderos sea un problema que aún en la actualidad debe resolverse. El mejor desarrollo de las plantas puede lograrse con un control adecuado de las condiciones ambientales dentro del invernadero, que puede lograrse con un diseño adecuado del sistema de ventilación. Considerando los costos generados por dicho sistema, resulta más conveniente el control del clima interno del invernadero mediante la ventilación natural.

Las dimensiones y condiciones ambientales de los invernaderos, así como las posición y combinación de las ventanas influyen en el movimiento del aire en el interior. Las condiciones ambientales exteriores como la temperatura, velocidad del viento, radiación, etc., aportan información relacionada con los sistemas de ventilación y en consecuencia pueden emplearse para mejorar dichos sistemas.

Con el crecimiento de la investigación del clima en invernaderos a través de CFD se ha desarrollado un campo de estudio que aporta confianza en las aplicaciones. Los modelos aplicados a la agricultura han motivado el desarrollo de nuevas técnicas de análisis que han permitido la caracterización del sistema invernadero-cultivo. La técnica de CFD se ha mostrado como una herramienta poderosa para modelar el microclima generado en el interior de los invernaderos y para el desarrollo de diseños de estructuras mejorados con respecto a la eficacia

de varias técnicas de climatización (ventilación natural y forzada, calefacción por agua caliente, mallas de sombreado y pantallas térmicas).

En invernaderos, la CFD se emplea para resolver numéricamente las ecuaciones que caracterizan el flujo de aire, es decir, las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento (Ecuaciones de Navier-Stokes) y de energía. Con la finalidad de resolver el conjunto de ecuaciones resultantes, se implementan códigos numéricos que puedan ser aplicados en una discretización espacial. En dicha discretización espacial el espacio comprendido por el invernadero y el aire que le rodea se divide en varios elementos geométricos que conforman una malla, en las que los vértices de dichos elementos son llamados nodos, en los cuales, dependiendo de las variables consideradas, se pueden asignar valores (Vega-García, 2015).

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno donde intervienen fluidos.

La CFD se basa en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales del flujo de fluidos, conocidas como las ecuaciones de continuidad y Navier-Stokes para conservación de momento lineal en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

Debido principalmente a su habilidad intrínseca de tomar en cuenta las condiciones de frontera y afrontar las soluciones más complejas, la CFD utiliza principalmente el método de análisis por elementos finitos para la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes (Martínez-García, 2013).

En el modelo matemático, el análisis se basa en los procesos físicos que se desarrollan en el interior del invernadero para formular la ecuación de balance de energía. Con esto deben realizarse las suposiciones correspondientes que, para el caso del invernadero, se le considera como un cuerpo de volumen homogéneo, con lo que se eliminan los intercambios de energía entre los elementos dentro del invernadero (Vega-García, 2015).

## 2.6.2. Construcción del modelo computacional

La principal ventaja de usar un simulador es que permite la evaluación del resultado de una decisión del mundo real sin llegar a tomar efectivamente ésta. Para modelar el clima que se genera en el interior de un invernadero debe atenderse los principios físicos y químicos de transferencia y balance de energía y masa en los elementos que lo constituyen (Rodríguez-Díaz, 2002).

El análisis de la ventilación puede llevarse a cabo mediante Dinámica de Fluidos Computacional y de esta manera proporcionar conocimiento relacionado con el movimiento del aire y los resultados en el interior del invernadero. Además, con la implementación de esta herramienta pueden resolverse muchas interrogantes sobre el manejo del sistema de ventilación para mantener una buena circulación y favoreces los procesos de transferencia de calor y masa entre las plantas y el aire (Ould-Khaoua, Bournet, Migeon, Boulard, & Chasseriaux, 2006).

La simulación del ambiente se llevó a cabo en un invernadero tipo cenital con cubierta plástica. La información base del tipo de invernadero fue proporcionada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En dicha información está incluida la geometría del invernadero (que contiene el espacio ocupado por el cultivo) incrustada en un dominio computacional, cuyas características y dimensiones se muestran en la **Figura 2.61**.

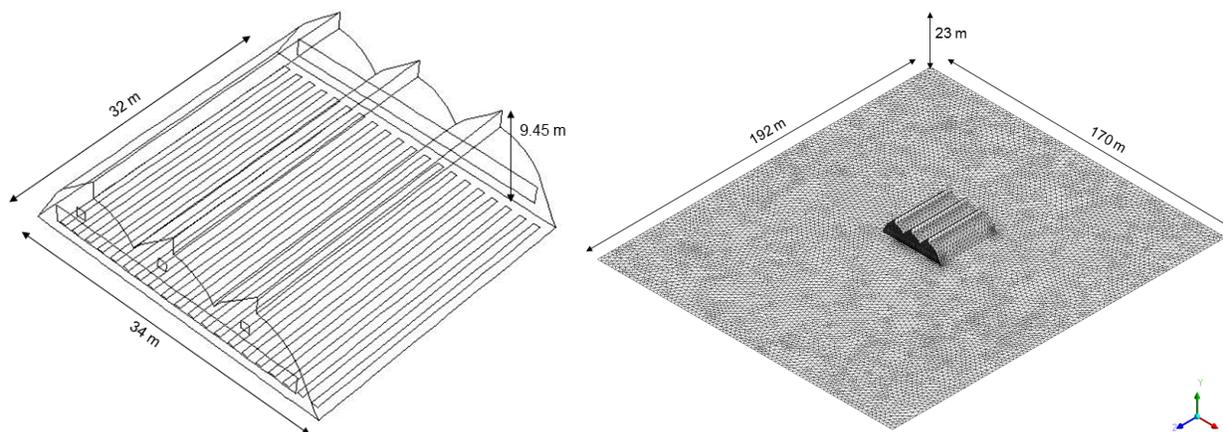


Figura 2.61. Geometría y mallado del invernadero tipo cenital.

El invernadero es de tres naves con techo tipo cenital. El área de las ventanas laterales es de 335 m<sup>2</sup> y de las ventanas cenitales de 72 m<sup>2</sup>, las cuales están provistas de mallas anti insectos. El área cubierta por las tres naves es de 1088 m<sup>2</sup> y el volumen total del invernadero es de aproximadamente 4198.06 m<sup>3</sup>.

El modelo de invernadero fue empleado en los estados de San Luis Potosí y Estado de México. La temperatura media anual en el estado de México es de 14.7°C y en San Luis Potosí es de 21°C.

La malla empleada influye en los resultados de la simulación, por lo que es importante tener especial atención a la hora de discretizar el modelo. Un aspecto importante es asegurar que los resultados de la simulación sean independientes de la malla empleada y que dependan solamente de las condiciones de frontera y los parámetros físicos del modelo. También debe considerarse el tamaño de las celdas, ya que, si bien un aumento del número de celdas proporciona una mejor precisión, también aumenta la necesidad de mayor capacidad de cálculo (Vega-García, 2015).

La elaboración de la malla se realizó empleando un algoritmo de arreglo conforme para mallas no estructuradas empleando tetraedros tanto en la zona del cultivo, el invernadero y el dominio.

### 2.6.3. Condiciones de frontera y propiedades

La temperatura en el invernadero, el suelo y el aire es utilizada como condición de frontera. También puede asignarse una determinada velocidad del viento y la permeabilidad de algunos materiales por los que el aire pasará, como lo es el cultivo y las mallas antiinsectos (Vega, 2015).

La ecuación que calcula la temperatura dentro del invernadero es se expresa de la siguiente manera (J. Bakker, 1995):

$$V_{grh} \rho_{air} cp_{air} \frac{dT_{in}}{dt} = Q_{sol} - Q_{vent} - Q_{conv} + Q_{soil} \quad (30)$$

donde  $dT_{in}$  es la variación de temperatura en el tiempo  $t$  ( $dt$ ),  $V_{grh}$  es el volumen del invernadero,  $\rho_{air}$  densidad del aire,  $cp_{air}$  capacidad calorífica del aire,  $Q_{sol}$  es el transporte de calor por radiación del sol,  $Q_{vent}$  intercambio de calor, por ventilación,  $Q_{conv}$  transporte de calor por convención, y  $Q_{soil}$  es el transporte de calor del suelo.

Las velocidades del viento fueron programadas de acuerdo con la velocidad media del viento en cada estado de estudio. El viento en el modelo fue asumido como un fluido viscoso, representado por las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma generalizada.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S\phi \quad (31)$$

donde los cuatro términos que componen la ecuación son: transitorio, convectivo, difusivo ( $\Gamma \nabla \phi$ ) y el término fuente  $S\phi$ , la variable  $\phi$  es la variable independiente que describe las características del flujo en un punto específico,  $\rho$  es la densidad y  $\mathbf{u}$  es la velocidad.

Se activó la ecuación de la energía y el modelo de turbulencia estándar k-épsilon. Además, se configuraron los materiales empleados en el invernadero. Se consideraron los cambios del aire

desde el dominio al interior del invernadero. También se determinaron las condiciones de las celdas para diferenciar la zona del dominio, el invernadero y el cultivo.

En el **Cuadro 2.38** se muestran las propiedades de los materiales considerados en el modelo de CFD, tales como el suelo, la cubierta plástica y la biomasa del cultivo.

Cuadro 2.38. Materiales usados en el modelo.

Material	Densidad	Cp	Conductividad térmica
Plástico	925.5	1600	0.33
Biomasa	1000	4180	0.6
Suelo	1400	1738	1.5

Con la modelación numérica es posible tener un seguimiento más exacto de las variables climáticas en el interior del invernadero, con lo que se logra reducir los inconvenientes de tiempo, espacio y costos de experimentación (Norton, Sun, Grant, Fallon, & Dodd, 2007).

Generalmente, el proceso de simulación comprende tres etapas: Preproceso (definición del problema), proceso (solución numérica) y postproceso (análisis de los resultados).

Actualmente la modelación va encaminada a incorporar el modelo del cultivo en las simulaciones. Las mallas anti insectos y el cultivo pueden ser modeladas empleando una aproximación de un medio poroso (Vega-García, 2015).

El uso de mallas anti insectos en los invernaderos fue modelado en términos de permeabilidad y porosidad (Miguel, Van de Braak, & Bot, 1997), cuya ecuación de movimiento fue derivada de la ecuación de Forchheimer:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} u + \rho \frac{C_F}{\sqrt{K}} u |u| \quad (32)$$

donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $K$  es la permeabilidad intrínseca del medio ( $\text{m}^2$ ),  $C_F$  es el factor de inercia,  $\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $u$  es la velocidad del aire ( $\text{m s}^{-1}$ ), y  $p$  es la presión ( $\text{N m}^2$ ). Las características de la malla anti insectos se muestran en el **Cuadro 2.39**.

Cuadro 2.39. Características de la malla antiinsectos (condición de medio poroso).

Permeabilidad de la cara	Espesor del medio poroso	Coficiente de salto de presión
$2.86e^{-9}$	0.000372	11131.45

Se consideraron varios escenarios en el modelo de acuerdo con las regiones de estudio. Para la determinación de la influencia de la temperatura ambiental dentro del invernadero fueron

consideradas la temperatura mínima promedio en las condiciones del periodo frío y la temperatura máxima promedio en el periodo cálido para los estados de San Luis Potosí y Estado de México.

La aproximación del medio poroso fue empleada para simular el cultivo, donde la caída de presión debida al efecto de inercia se expresa con la ecuación de Forchheimer. La variable de interés ( $\phi$ ) representa el momento causado por el efecto del aumento de fricción, la cual es expresada usando la siguiente fórmula:

$$S_{\phi} = -L C_D v^2 \quad (33)$$

donde  $L$  representa la densidad del área de la hoja de cultivo ( $m^2 m^{-3}$ ),  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $v$  es la velocidad del aire ( $m s^{-1}$ ).

Para la simulación de las condiciones de frontera impuestas por los factores climáticos de temperatura externa y velocidad del viento, se empleó el programa ANSYS Fluent. Las condiciones de frontera empleadas para el Estado de México se muestran en el **Cuadro 2.40** y para el estado de San Luis Potosí son mostradas en el **Cuadro 2.41**. Las velocidades del viento permanecieron iguales para los periodos frío y cálido, variando dependiendo del estado.

Cuadro 2.40. Condiciones de frontera en los escenarios evaluados para el Estado de México.

Condiciones de frontera del periodo cálido			
Zona	Momento	Turbulencia	Temperatura
Ventilación de entrada (vent inlet)	Método de especificación de velocidad: Magnitud, normal a frontera	Método: k-ε	22.9 °C
	Velocidad del viento: <b>1.12 m/s</b>		
Presión a la salida (pressure outlet)	Método de especificación de dirección de flujo: normal a frontera	Método: k-ε	
Condiciones de frontera del periodo frío			
Zona	Momento	Turbulencia	Temperatura
Ventilación de entrada (vent inlet)	Método de especificación de velocidad: Magnitud, normal a frontera	Método: k-ε	7.4 °C
	Velocidad del viento: <b>1.12 m/s</b>		
Presión a la salida (pressure outlet)	Método de especificación de	Método: k-ε	

	dirección de reflujo: normal a frontera		
--	--------------------------------------------	--	--

Cuadro 2.41. Condiciones de frontera en los escenarios evaluados para San Luis Potosí.

Condiciones de frontera del periodo cálido			
Zona	Momento	Turbulencia	Temperatura
Ventilación de entrada (vent inlet)	Método de especificación de velocidad: Magnitud, normal a frontera	Método: k-ε	28.1 °C
	Velocidad del viento: 1.6 m/s		
Presión a la salida (pressure outlet)	Método de especificación de dirección de reflujo: normal a frontera	Método: k-ε	
Condiciones de frontera del periodo frío			
Zona	Momento	Turbulencia	Temperatura
Ventilación de entrada (vent inlet)	Método de especificación de velocidad: Magnitud, normal a frontera	Método: k-ε	13.2 °C
	Velocidad del viento: 1.6 m/s		
Presión a la salida (pressure outlet)	Método de especificación de dirección de reflujo: normal a frontera	Método: k-ε	

Con el establecimiento de las condiciones de frontera se procedió a definir los métodos de solución y el criterio de convergencia se estableció en  $1 \times 10^{-3}$ , posteriormente se definió el número de iteraciones y se corrió la simulación. Una vez alcanzada la convergencia establecida, los resultados pueden ser expresados de manera gráfica y numérica mediante los perfiles de temperatura y velocidad del viento.

#### 2.6.4. Simulación del ambiente del invernadero

En este apartado se lleva a cabo la visualización de los resultados. Para esto se emplea el programa CFD post, de ANSYS. Los resultados de mayor interés son los vectores de velocidad en sitios estratégicos del invernadero, así como los contornos de temperatura en planos verticales dentro del invernadero y valores escalares de temperatura obtenida de los planos antes mencionados.

Se presentan mapas de distribución de temperaturas, velocidad y dirección del viento, utilizando escala de magnitud de colores. Además, están incluidos los valores escalares de la distribución de las temperaturas en puntos críticos como la zona de cultivo y en las entradas y salidas del invernadero. Se presentan los resultados para el Estado de México y San Luis Potosí, considerando un periodo frío y un periodo cálido para ambos estados.

## 2.7. Mapas de distribución de temperaturas, velocidad y dirección del viento

Las variables de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> están influenciadas por la ventilación en el invernadero. Las zonas con diferencias en temperatura y humedad son ocasionadas por una ventilación deficiente, lo cual impacta sobre el rendimiento. Los efectos de la ventilación sobre los factores climáticos se mencionan a continuación (Lorenzo, 1994; Lorenzo et al., 1990).

- a) Reducción de la temperatura del invernadero por diferencia de densidades desde la base hacia las ventanas cenitales debido al “efecto chimenea”.
- b) La velocidad exterior del viento aumenta la tasa de renovación de aire.
- c) Reducción de la humedad al interior del invernadero.
- d) Reducción del riesgo por enfermedades de las plantas.

La ventilación es un factor muy importante en un invernadero, ya que un buen diseño de los sistemas de ventilación permite un mejor control del clima, repercutiendo en un mejor desarrollo del cultivo y rendimiento. La ventilación natural es la más usada debido a los bajos costos, aunque no es la más eficiente.

La ventilación cenital ayuda en la reducción de altas temperaturas causadas por la radiación, aunque en ocasiones la implementación de esta adaptación puede dificultarse dependiendo del tipo de invernadero que se disponga (Brun & Lagier, 1984).

Con la introducción de los sistemas de ventilación en invernaderos de México y el uso de sensores que permiten establecer consignas en la operación del ambiente del invernadero, se han logrado aumentos en el rendimiento del cultivo de jitomate, superando los 20 kg/m<sup>2</sup> (Flores, Ojeda-Bustamante, López, Rojano, & Salazar, 2007).

El flujo de aire a través de las ventanas no depende únicamente de parámetros determinados mediante leyes físicas, también es función de otra serie de parámetros como: tipo y localización de las ventanas, altura y anchura del invernadero en el campo de presiones del viento sobre la estructura (ASHRAE, 1993).

### 2.7.1. Periodo Cálido

#### 2.7.1.1. *Estado de México*

Aunque el invernadero puede estabilizar la temperatura al mantener relativamente estables los promedios de temperatura diaria, el problema resulta en mantener los picos de temperaturas diurnas y nocturnas, que deben cuidarse ya que pueden ocasionar problemas fisiológicos.

La orientación y tamaño del invernadero, además del tipo de material de cubierta, afectan a la temperatura interior de la estructura, ya que dicho parámetro es dependiente del balance de energía. La temperatura exterior en un invernadero cerrado siempre es menor que la temperatura interior durante el día, con un desfase respecto a la radiación solar (Seeman et al., 1979).

El periodo cálido fue determinado con la temperatura media máxima anual del Estado de México. La velocidad del viento fue tomada de la base de datos de INIFAP, resultado del promedio de las velocidades del viento en el Estado de México.

La dirección del viento exterior es perpendicular a la ventana lateral y paralela a la ventana cenital. La dirección y velocidad el viento, así como la distribución de la temperatura dentro del invernadero se presentó en el plano vertical que pasa por el centro del invernadero y a través de las ventilas de entrada y salida de aire. En la **Figura 2.62** se observa una estratificación de la temperatura, que se encuentra en su rango más bajo en la zona cercana a la ventila de entrada de aire, la temperatura varía de los 293 K en la zona más cercana a la ventila, hasta temperaturas superiores a los 308 K en la zona más alejada de la entrada de aire. Los gradientes mostrados son homogéneos en el plano mostrado, con diferencia de 2.2 K entre cada uno.

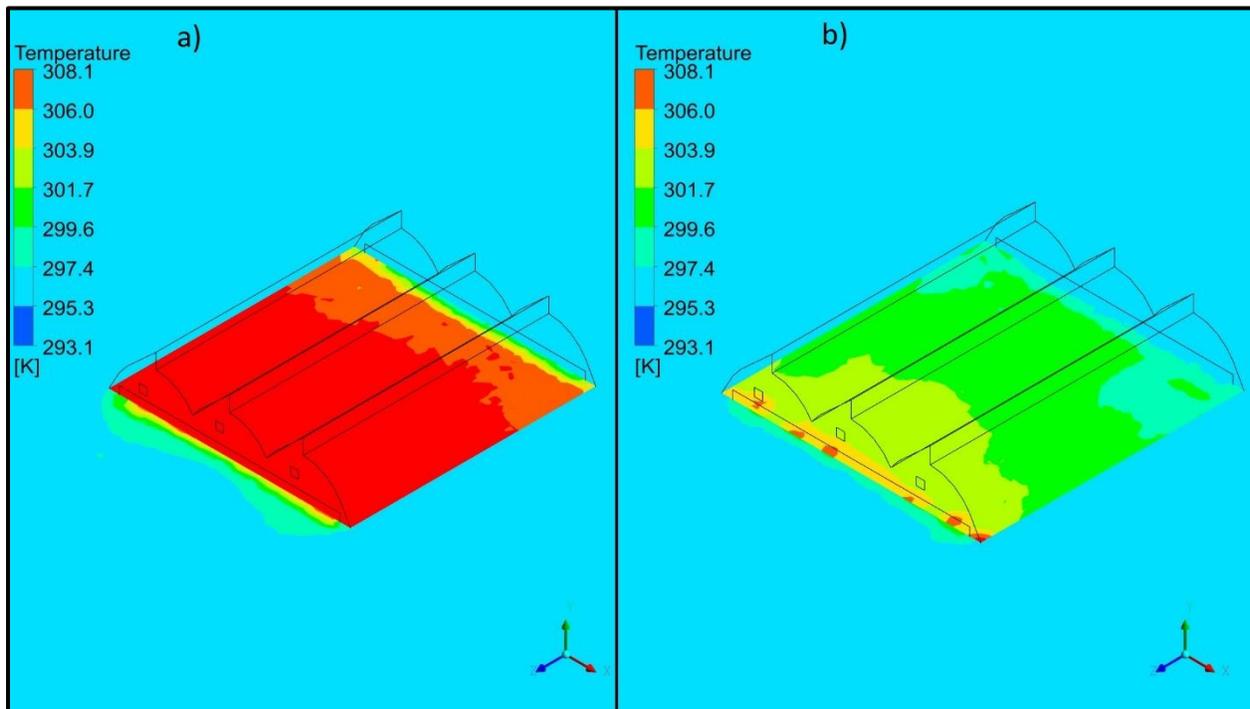


Figura 2.62. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior y exterior del invernadero en el plano horizontal: a) ventilación natural y b) ventilación forzada.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

En la **Figura 2.63** los contornos de temperatura mostrados durante el periodo cálido en el Estado de México determinan temperaturas superiores a los 308 K cercanas a la salida de aire del invernadero y principalmente cercanas al techo, dichas temperaturas pueden representar problemas de producción generando estrés térmico en el cultivo. Las altas temperaturas mostradas pueden representar problemas dentro del invernadero generando una mayor transpiración del cultivo, por lo cual es importante mejorar la renovación del aire, para poder descender la temperatura del invernadero. También se observa que en la ventilación natural (**Figura 63a**) se genera una zona de temperaturas moderadas (291-301 k) que va desde la ventila de entrada hasta un cuarto del invernadero.

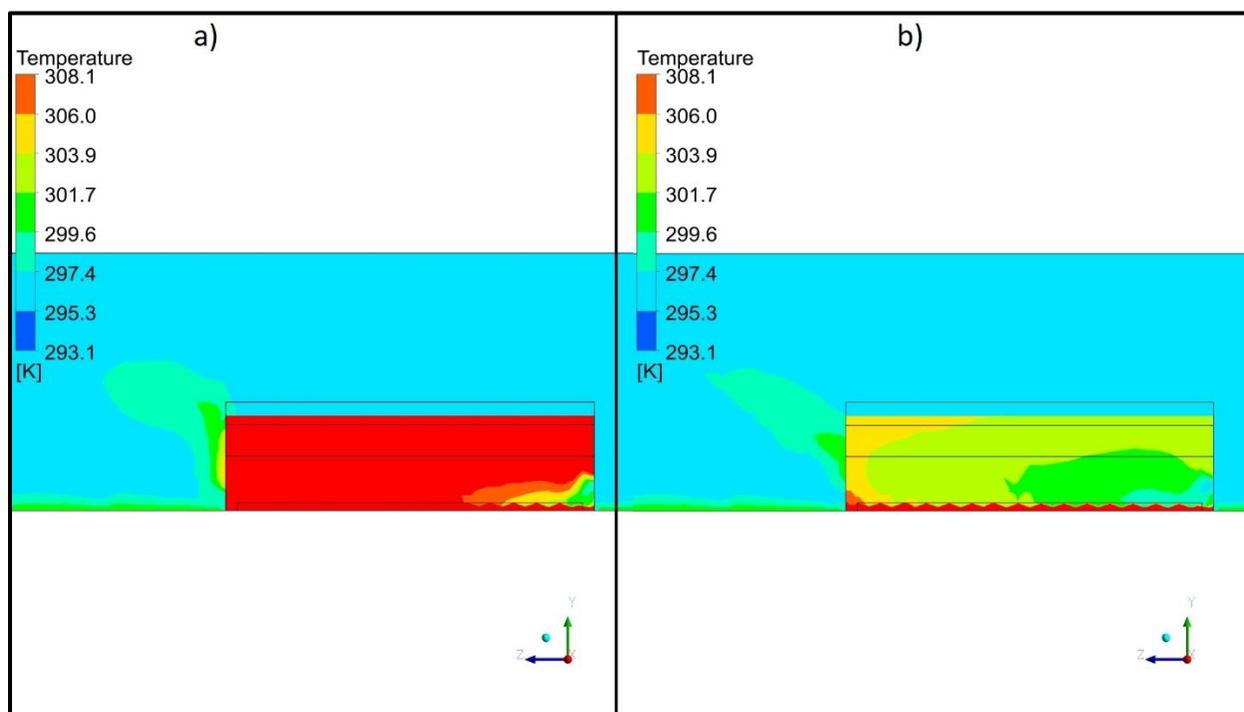


Figura 2.63. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano vertical: a) ventilación natural y b) ventilación forzada.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El flujo del aire dentro del invernadero está determinado por la velocidad del viento al exterior, por la malla de las ventilas y en su caso por la ventilación forzada. En cuanto al perfil de velocidad del viento se observa que las velocidades más altas del viento rodean la estructura. Se observa una disminución drástica de la velocidad en la ventila de entrada de aire, esto debido a la presencia de la malla anti insectos. Además, se observa una disminución de la velocidad mientras se adentra en el invernadero.

La velocidad del viento tiende a disminuir debido a la presencia del cultivo. Además de la reducción también ocurre la homogeneidad de la velocidad del viento en la zona del cultivo, con velocidades menores a  $0.4 \text{ m/s}$ . Esta reducción de velocidad es debida a la resistencia del cultivo al flujo de aire. Bajo las condiciones simuladas, la velocidad del viento promedio dentro del invernadero se encuentra entre  $0.1$  a  $0.3 \text{ m s}^{-1}$ .

La **Figura 2.64a** muestra tanto la velocidad y dirección de flujo al exterior e interior del invernadero con ventilación natural, en el cual la temperatura está determinada por un periodo cálido. Es necesario aumentar la tasa de velocidad del aire dentro del invernadero, incrementando la renovación de aire para poder disminuir la temperatura al interior. Esto puede ser logrado mediante la implementación de ventilación forzada (**Figura 2.64b**).

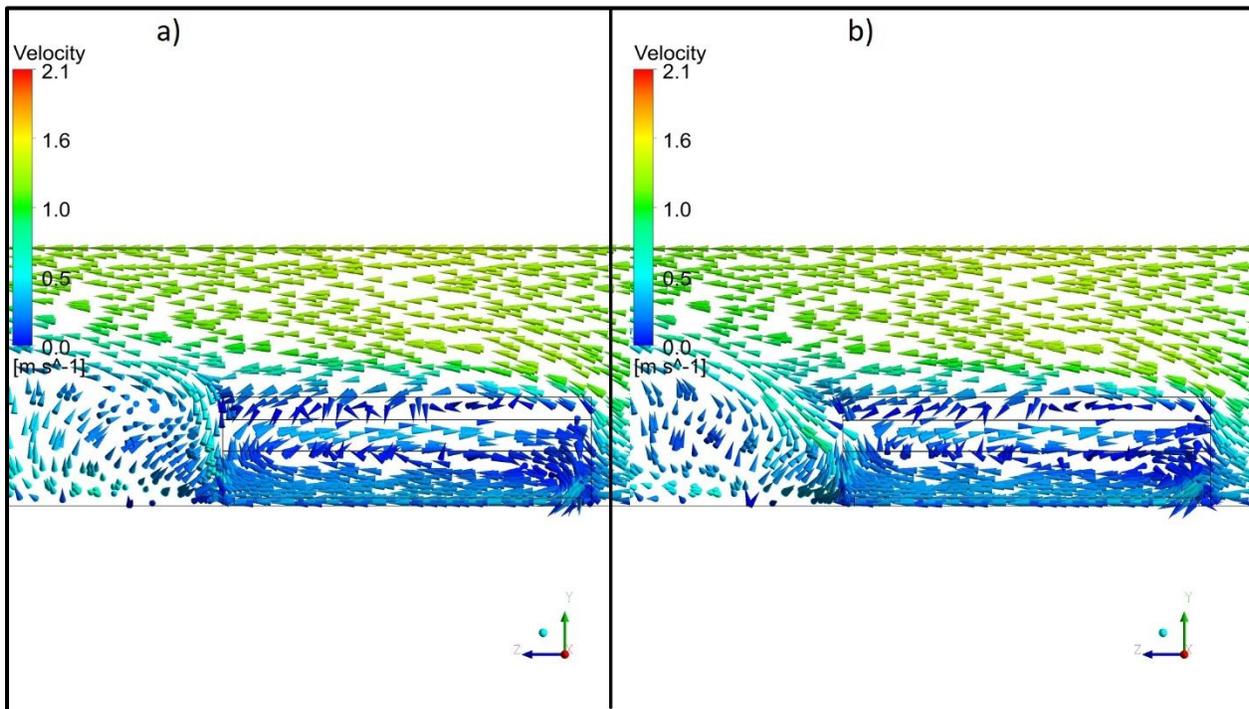


Figura 2.64. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero. Ventilación natural (izquierda) y forzada (derecha) para el Estado de México.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

#### Valores escalares

La aplicación de CFD tiene la ventaja de aportar una distribución continua de las variables simuladas. Además, es posible obtener valores discretos o escalares de las simulaciones de CFD.

Para la obtención de los valores escalares se realizó un isoclip en la zona del cultivo y también cuatro líneas que fueron colocadas en tres zonas relevantes del invernadero (entrada, salida, zona de las ventilas y zona de los ventiladores). El isoclip abarca toda la superficie del invernadero a 1 m de altura, muy cerca del cultivo (0.7 m), mientras que las líneas fueron ubicadas en la parte central de cada zona. Las líneas en la entrada y salida del invernadero fueron colocadas verticalmente para analizar el gradiente de temperatura a lo alto del invernadero. Las líneas de la zona de ventilas y ventiladores fueron ubicadas horizontalmente para observar el gradiente de temperatura a lo largo de invernadero, estando la primera situada a 2.3 m de altura (altura media de las ventilas) y la segunda a 5.2 m (altura a la que están colocados los ventiladores).

La **Figura 2.65** muestra los valores escalares de temperatura distribuidos en el plano del cultivo para la ventilación forzada y ventilación natural durante el periodo cálido. El valor de Z representa la distancia de la entrada del invernadero hasta la salida. Las temperaturas se encuentran en un rango de los 301 K a los 323 K, dichas temperaturas muestran zonas con temperaturas relativamente altas en las cuales es necesario un ajuste en el invernadero que permita reducir los gradientes de temperatura.

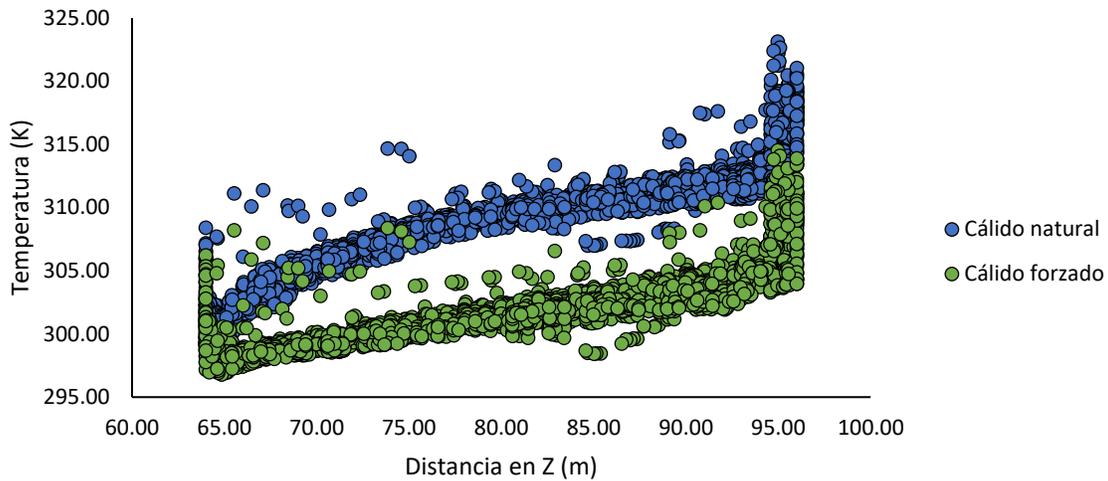


Figura 2.65. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo en el invernadero del Estado de México

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El promedio de temperaturas en el plano a 1 m de altura en el interior del invernadero para el periodo cálido bajo ventilación natural fue de 308.7 K. Para el caso de la ventilación forzada en el periodo cálido para el estado de México, se obtuvo un promedio de 301.7 K en el plano a 1 m de altura. Esto implica una reducción de 7 K en la zona del cultivo al emplear aire forzado durante el periodo cálido. Además de los valores obtenidos en el isoclip, se obtuvieron valores de una línea ubicada en el centro de la nave central a una altura de 1 m. Con esto es posible tener una idea de valores más puntuales de temperatura. La **Figura 2.66** muestra la distribución de la temperatura lo largo del invernadero en una zona cercana al cultivo.

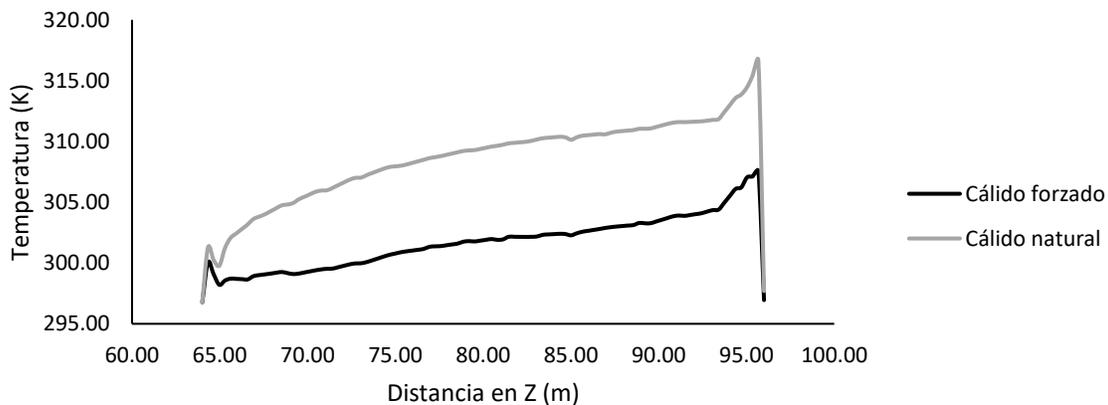


Figura 2.66. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La **Figura 2.67** muestra la distribución de la temperatura al exterior del invernadero y a lo largo del invernadero, partiendo de la ventila de entrada de aire a la ventila de salida. La temperatura externa es inferior a la del invernadero. Inmediatamente después de la entrada, la temperatura se incrementa en hasta 6 K y después de un metro al interior del invernadero el aumento de temperatura es menor (hasta 3 K) hasta llegar a la salida, donde el descenso de temperatura es significativo (hasta 9 K).

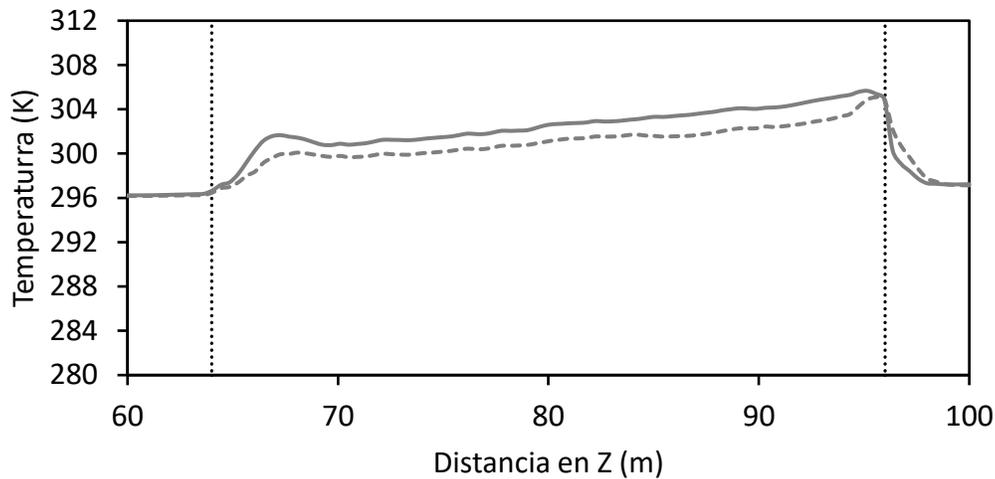


Figura 2.67. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para Estado de México en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

En la entrada del invernadero la temperatura oscila entre los 296 K y 302 K, siendo esta zona la más apta para el cultivo (**Figura 2.68**). En salida del invernadero la temperatura menor oscila entre los 303 K y 305 K, encontrando gradientes elevados, por lo cual es necesario regular el flujo de aire en el invernadero.

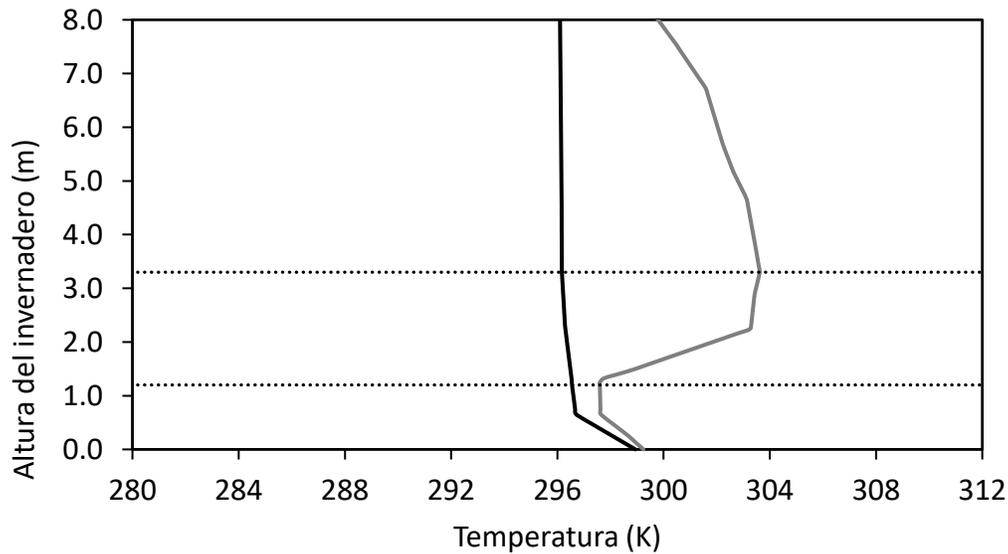


Figura 2.68. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La velocidad del viento exterior en las cercanías del invernadero se reduce con respecto a la velocidad global del aire, esto se debe al choque del viento con la estructura, que desvía las masas de aire hacia arriba y hacia los lados del invernadero. Además de esta reducción por choque con la estructura, existe otra reducción de velocidad del viento al pasar por las ventilas, ya que se trata de un medio poroso que permite el paso solamente a una parte del viento. La velocidad del viento dentro del invernadero reduce hasta 0.13 m/s (cercano al 10% de la velocidad global).

Dado que el viento pasa a través de dos medios porosos, la velocidad del viento a lo largo del invernadero tiende a aumentar gradualmente, hasta llegar a la zona de las ventilas, donde se da un gran aumento por la salida del aire (**Figura 2.69**). Una vez que pasa el medio poroso, la velocidad del viento vuelve a aumentar y tiende a igualarse con la velocidad global.

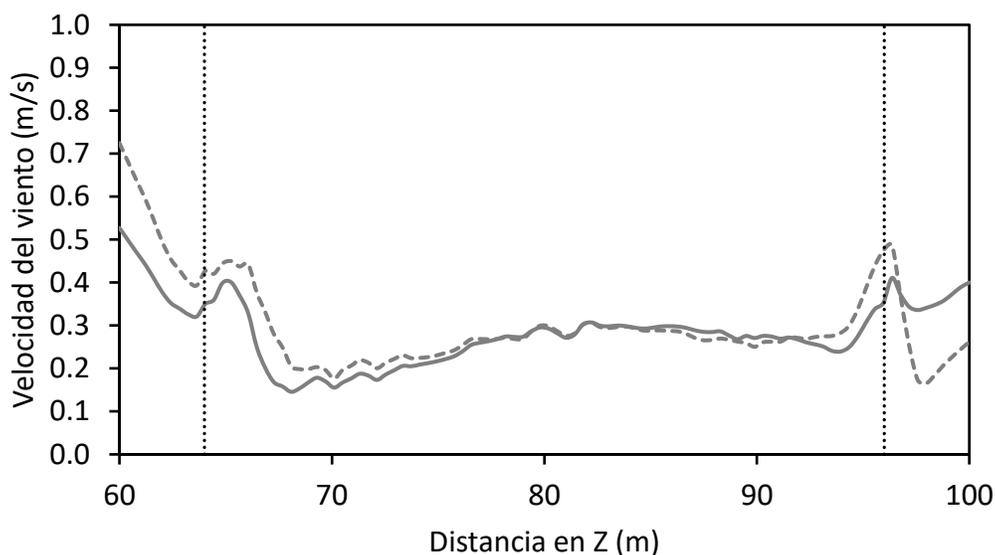


Figura 2.69. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La velocidad del viento a la altura de los ventiladores (5.2 m) muestra la reducción total de la velocidad en la parte de barlovento del invernadero (**Figura 2.70**). Esto se debe a que la zona de sotavento del invernadero está comprendida por la zona de ventilas y la cubierta plástica. La línea trazada involucra el exterior del invernadero, la cubierta plástica y el interior del invernadero, por lo que es lógico encontrar una reducción total de la velocidad del viento al chocar con la pared plástica.

La sección de los ventiladores permite analizar la velocidad a la salida del invernadero, donde se aprecian grandes diferencias entre la ventilación forzada y natural. La magnitud de la velocidad en el sotavento (cercano a 0.6 m/s) en condiciones de ventilación natural se debe al ascenso de aire al momento de salir del invernadero. En el caso de la ventilación forzada, el aumento de la velocidad es cercano al 40% (0.85 m/s) y es causado por la acción de los ventiladores.

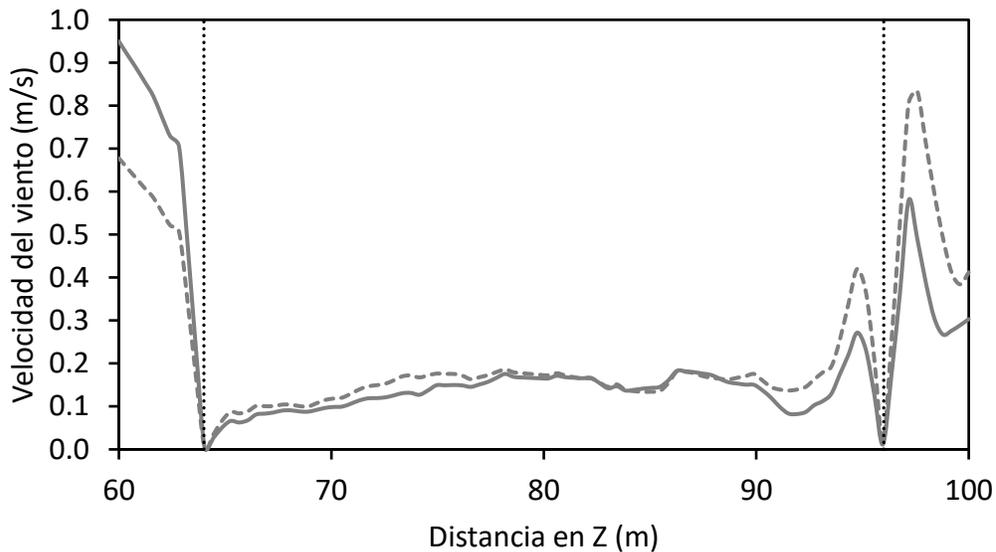


Figura 2.70. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo cálido a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La **Figura 2.71** muestra la comparación de los gradientes de temperatura y la velocidad del viento. Se observa que cerca de la entrada de aire la temperatura tiende a aumentar cuando la velocidad del aire disminuye. Esto se debe a que el aire que tenía una temperatura menor en el exterior del invernadero se va calentando conforme ingresa, y al ser la velocidad del viento menor, no es suficiente para disminuir la temperatura interna del invernadero.

A lo largo del invernadero, la velocidad del viento y la temperatura van en aumento. Esto es debido a que el aire caliente es arrastrado a lo largo del invernadero. Sin embargo, en la zona cercana a las ventila se salida, al haber un aumento de la velocidad del viento, ocurre un descenso de la temperatura.

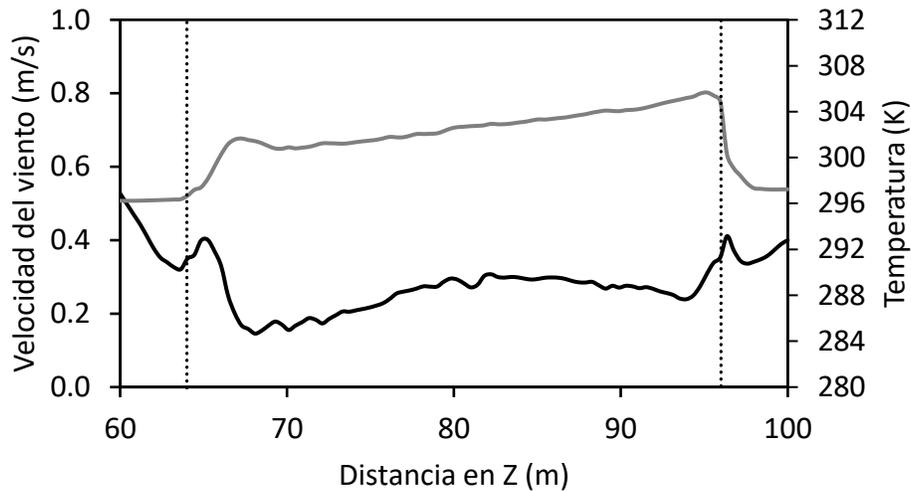


Figura 2.71. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en el Estado de México con ventilación forzada en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La velocidad del viento en las ventilas de entrada y salida bajo condiciones de ventilación natural se muestra en la **Figura 2.72**. La velocidad en la ventila de entrada muestra un pico que alcanza los 0.4 m/s, mientras que en la ventila de salida, la velocidad máxima alcanzada es cercana a los 0.6 m/s, esto representa un aumento cercano al 50% en la velocidad de salida del invernadero.

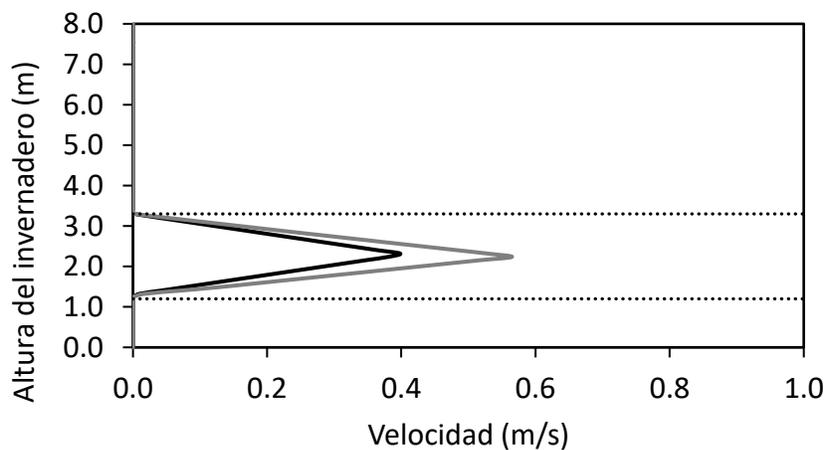


Figura 2.72. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

### 2.7.1.2. San Luis Potosí

El periodo cálido fue determinado con la temperatura máxima anual del estado de San Luis Potosí. La velocidad del viento fue tomada de la base de datos de INIFAP, resultado del promedio de las velocidades del viento en el estado de San Luis Potosí.

Para el periodo cálido del estado de San Luis Potosí la diferencia de los gradientes de temperatura al exterior y al interior, muestran un incremento considerable al interior del invernadero. Si bien, la temperatura externa es del orden de los 298 K, el incremento de temperatura generado en el interior del invernadero alcanza temperaturas del orden de los 310 K. Considerando el escenario de ventilación natural (**Figura 2.73a**) se vuelve necesario buscar o generar un mejor manejo del invernadero para periodos con climas cálidos. La implementación de la ventilación forzada ayuda en la reducción de la temperatura interna del invernadero en casi la mitad del espacio.

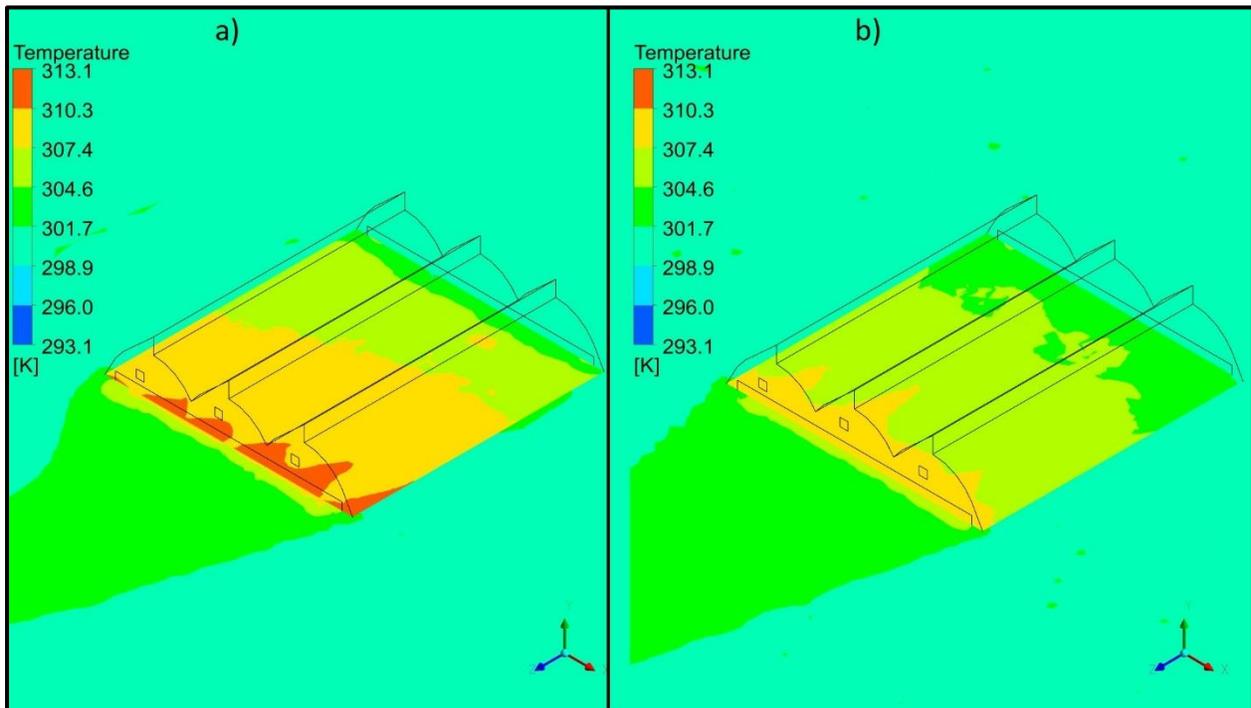


Figura 2.73. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero en el plano horizontal, para a) ventilación natural y b) ventilación forzada.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El plano vertical al interior del invernadero para la ventilación natural (**Figura 2.74a**) muestra que dentro de la estructura en cada una de las regiones se presentan temperaturas altas, tanto en el fondo, en la parte alta, la entrada y salida del invernadero, para este caso es necesario incrementar la renovación del flujo de aire dentro del invernadero. Al implementar la ventilación

forzada se logra tener una región en el rango de 298 K a 307 K en la zona cercana al cultivo. Esta región abarca cercad de la mitad del espacio inferior del invernadero, la cual representa un incremento aproximado del 40% con respecto a la zona formada por la ventilación natural.

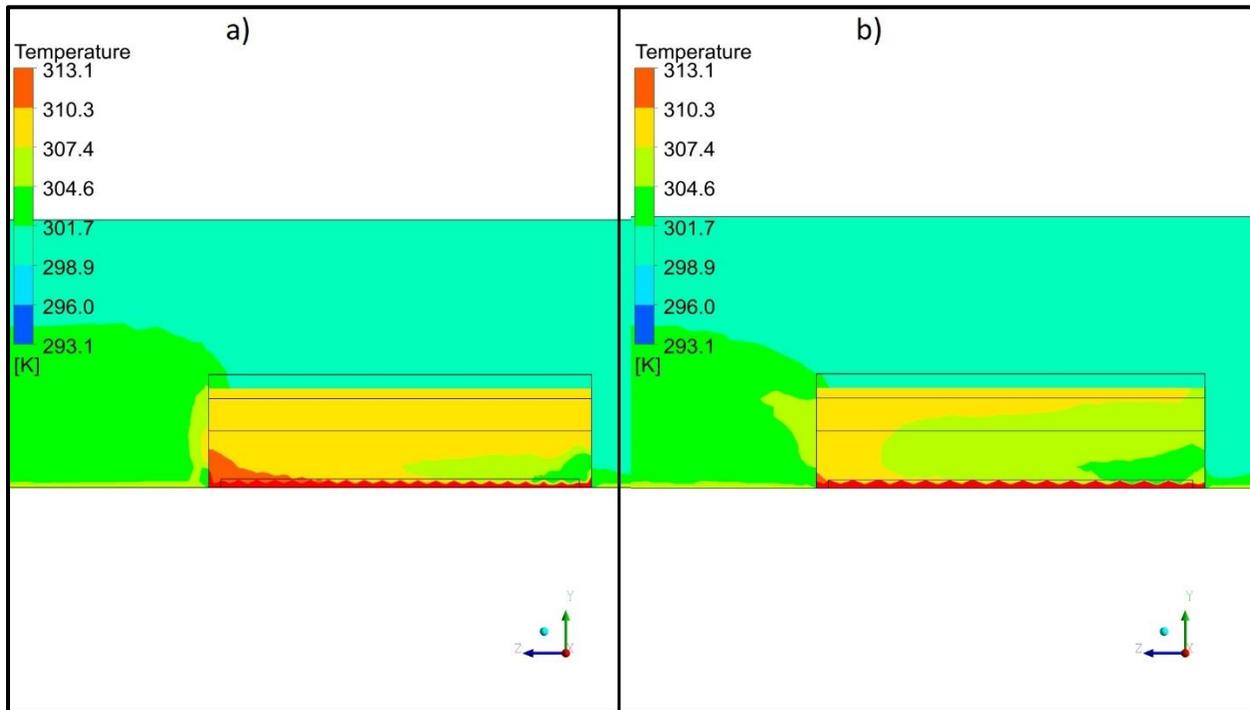


Figura 2.74. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano vertical: a) ventilación natural y b) ventilación forzada.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El comportamiento del flujo del aire en el invernadero en el caso del estado de San Luis Potosí muestra grandes recirculaciones en la salida del invernadero, lo cual puede disminuir considerablemente la salida del aire.

La ventilación contribuye con la disminución de gradientes térmicos provocados por el ascenso de aire caliente. El uso de ventanas cenitales y laterales en los invernaderos ayuda a uniformizar relativamente la temperatura, creando movimiento de la masa de aire dentro del invernadero. Las necesidades de ventilación de un cultivo dependen además del tipo de invernadero, de la etapa del cultivo y de las condiciones ambientales externas (Jensen, 2004; Vega-García, 2015).

Los vectores de velocidad del aire dentro del invernadero muestran el comportamiento del flujo en la ventilación natural (**Figura 2.75a**), la renovación para este caso es demasiado pequeña, por lo cual será necesario incrementar la entrada o salida de flujo del aire del invernadero. En la ventilación forzada (**Figura 2.75b**) se observa un ligero incremento de la velocidad del viento en

la zona superior del invernadero, principalmente en la parte cerca a los extractores. Se observa también el desplazamiento del aire generado por los ventiladores a la salida del invernadero.

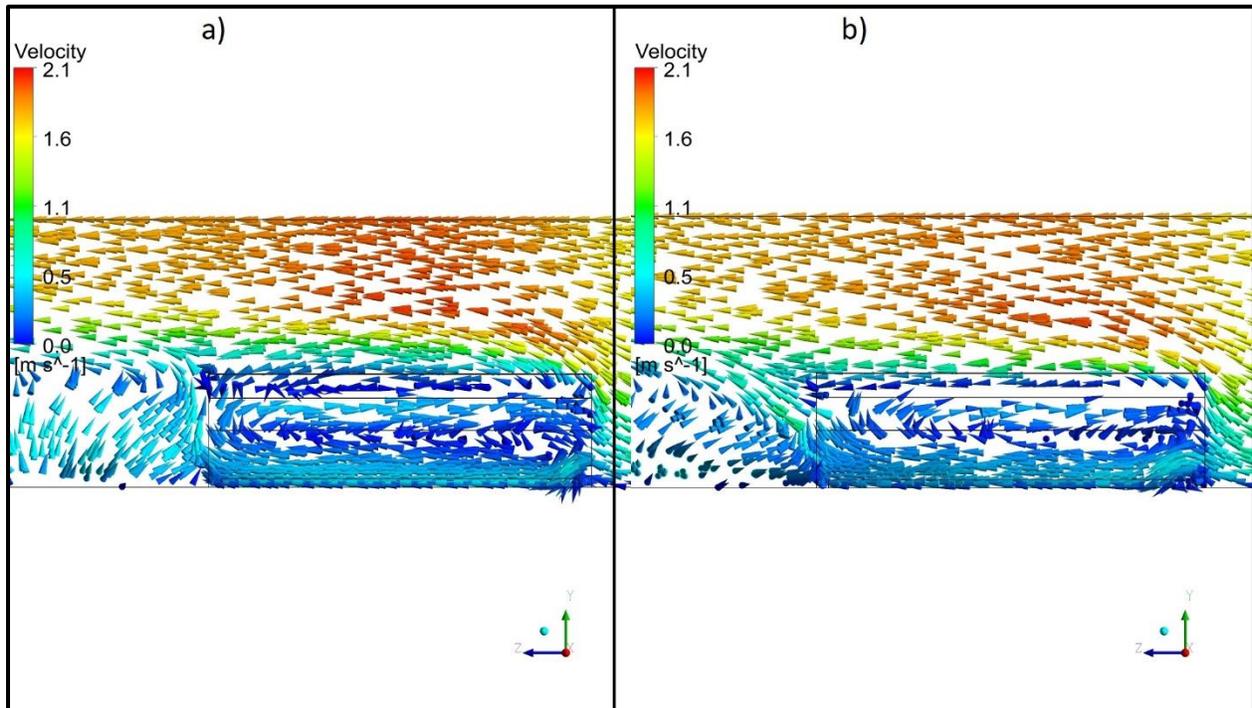


Figura 2.75. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

#### Valores escalares

El estudio de la temperatura en el periodo cálido muestra temperaturas que van desde los 302 K, hasta temperaturas mayores alcanzando puntos de temperatura cercanos a los 312 K o más, estas temperaturas están fuera del rango óptimo para el cultivo. La ventilación natural presenta valores de temperatura superiores a los alcanzados por la ventilación forzada (**Figura 2.76**). La activación de los extractores logra disminuir la temperatura en hasta 2 K en el interior del invernadero, y cerca de 4 K en las zonas próximas a la ventilas.

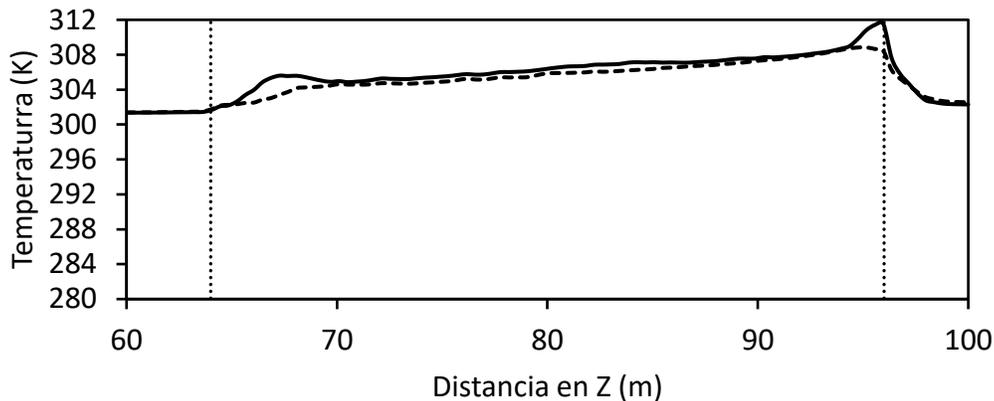


Figura 2.76. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La zona de entrada como en todos los demás periodos, sigue siendo la zona con los gradientes más bajos, para este caso las temperaturas oscilan entre los 302 K a los 303 K, con algunos puntos de mayor temperatura. La zona a la salida de aire de los invernaderos es la zona con mayor temperatura, la **Figura 2.77** muestra temperaturas mínimas que van desde los 303 K hasta puntos con temperatura de 309 K, estas temperaturas de la ventilación natural son elevadas ocasionando grandes problemas al cultivo si no se corrigen.

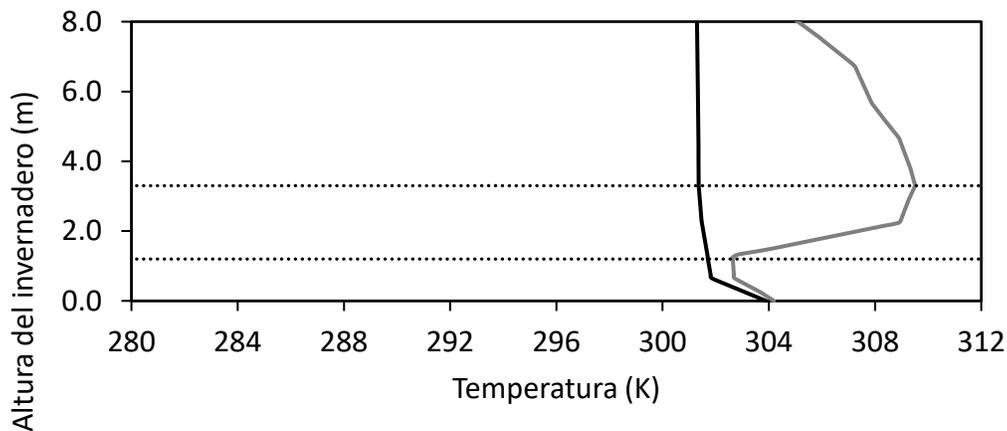


Figura 2.77. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La velocidad del viento se comporta de manera similar en todos los escenarios, caracterizándose por la disminución cercana al 10% de la velocidad global en el dominio. En el caso de San Luis

Potosí (**Figura 2.78**), se observa que la velocidad en la ventilación natural cerca de la ventila de entrada es superior a la velocidad provocada por la ventilación forzada. Sin embargo, a lo largo del invernadero la velocidad de la ventilación forzada tiende a superar la velocidad de la ventilación natural y finalmente a la salida del invernadero, la velocidad de la ventilación forzada es mayor que la natural.

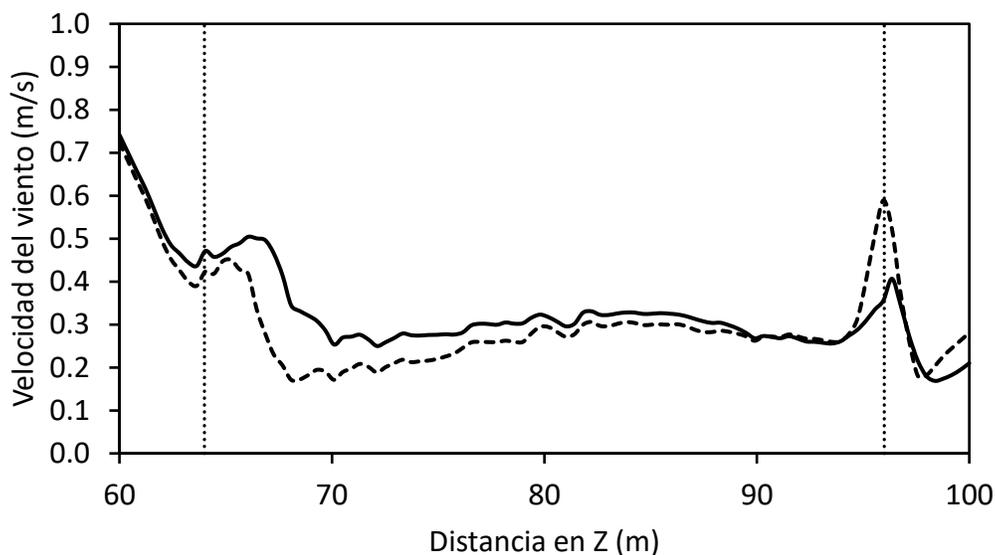


Figura 2.78. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El análisis de la velocidad en la parte superior del invernadero muestra que, si bien las velocidades cercanas a la entrada de aire son similares tanto para la ventilación natural como para la forzada, ésta última es hasta 45 % superior dentro del invernadero (**Figura 2.79**).

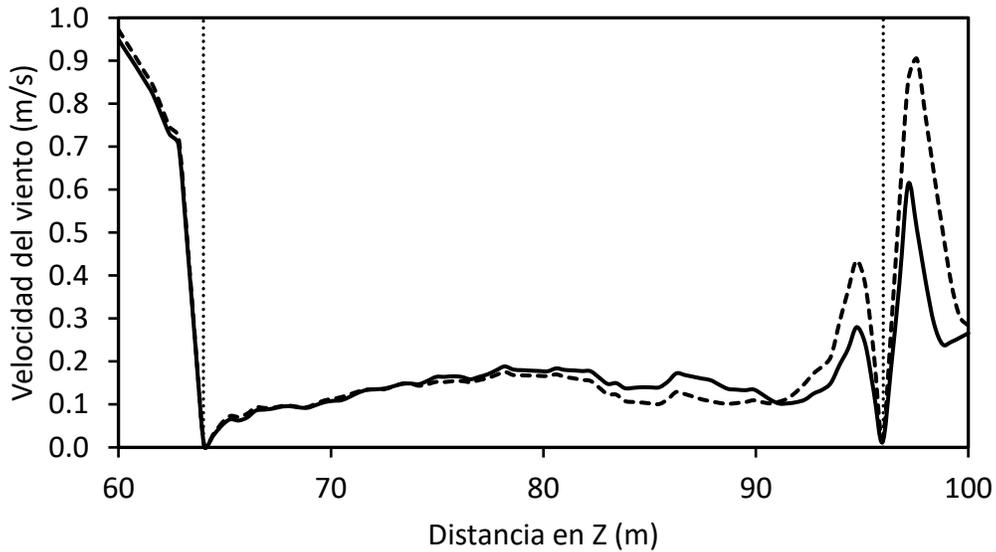


Figura 2.79. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida. Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La ventilación natural durante el periodo cálido San Luis Potosí muestra comportamientos similares a los observados en el estado de México respecto a la velocidad de entrada y salida (**Figura 2.80**). El pico de velocidad máxima alcanzada en la ventila de entrada del invernadero es cercano a los 0.4m/s, mientras que la velocidad máxima alcanzada en la ventila de salida es del orden de los 0.65 m/s en la parte central de la ventila.

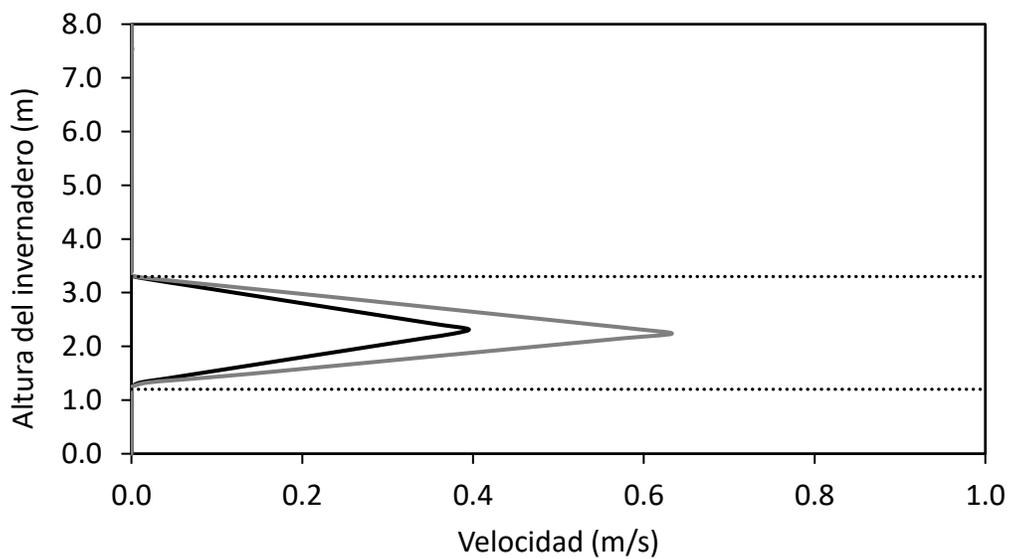


Figura 2.80. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Al comparar la temperatura contra la velocidad del viento (**Figura 2.81**) se tiene un patrón similar al observado en el Estado de México. La temperatura tiende a disminuir cuando la velocidad del viento aumenta y se incrementa cuando la velocidad del viento disminuye. Este comportamiento sucede principalmente en las zonas cercanas a las ventilas de entrada y salida, ya que, en el interior del invernadero, debido a su longitud, la velocidad del viento se mantiene con poca variación mientras que la temperatura tiende a aumentar a lo largo del invernadero.

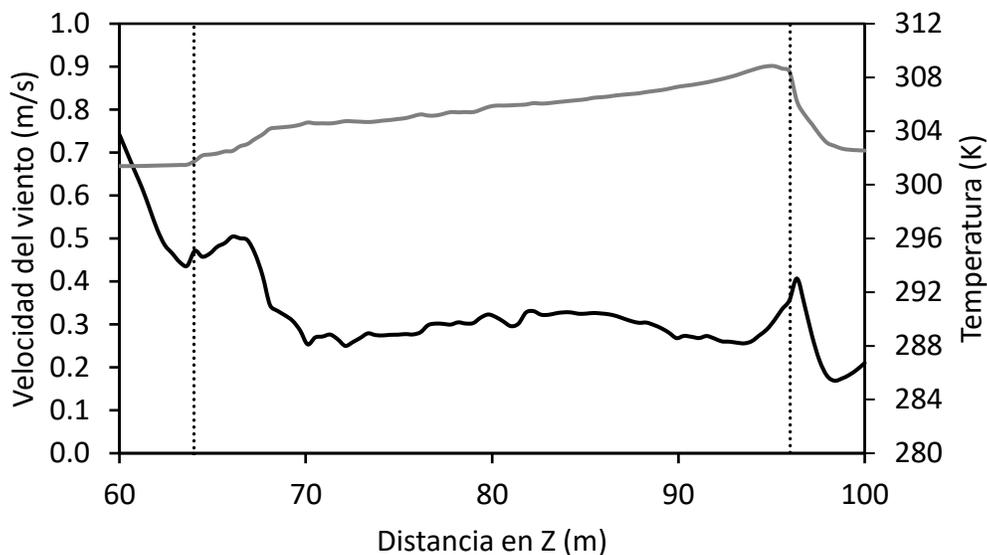


Figura 2.81. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en San Luis Potosí con ventilación forzada en el periodo cálido a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Para la obtención de los valores escalares en la zona del cultivo se realizó un isoclip. El **Cuadro 2.42** muestra los valores escalares de temperatura distribuidos en el plano del cultivo. El valor de Z representa la distancia de la entrada del invernadero hasta la salida.

Cuadro 2.42. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo para el periodo cálido.

Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]
65.0	51.3	67.0	58.7	65.9	33.2
65.9	36.4	66.0	32.9	64.9	33.1
65.9	36.2	66.1	33.5	65.0	50.6
69.9	39.3	67.0	59.0	64.8	35.1
70.1	39.4	66.1	33.5	67.0	61.4
70.2	39.4	67.9	35.5	67.9	38.5
66.0	35.2	68.0	35.5	68.0	38.4
66.0	35.2	68.1	35.6	65.0	50.5
66.0	35.2	69.0	60.7	65.9	36.0
64.6	38.6	68.1	35.3	69.9	38.0
64.2	38.5	68.2	35.6	69.1	61.5
64.0	42.2	64.7	52.8	70.0	38.3
66.0	35.2	64.2	39.7	67.2	44.0
65.0	49.3	64.2	40.3	67.3	47.7
66.0	35.2	72.1	39.3	67.9	47.2
65.9	34.6	72.2	39.4	67.0	61.6
68.0	36.4	71.9	39.2	66.2	36.7
68.0	36.4	68.1	36.7	66.1	36.7
68.1	36.4	68.1	36.7	65.0	49.1
66.0	45.3	68.1	36.7	69.0	61.2
66.5	42.7	68.0	36.7	69.0	60.9
65.8	44.7	68.1	38.4	68.2	35.6
69.9	37.0	68.0	38.6	65.3	45.1
70.0	37.0	68.8	74.4	69.1	61.2
70.1	37.1	65.3	40.9	69.1	61.0
68.1	36.4	65.6	45.7	69.9	36.7
65.0	49.1	64.9	31.3	69.9	37.0
68.0	35.2	64.6	37.3	67.0	61.5
67.0	59.6	66.0	32.8	64.5	30.5
67.9	35.5	65.0	47.8	64.9	30.8

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

### 2.7.1.3. Jalisco, Michoacán y Sinaloa

El periodo cálido fue determinado con la temperatura máxima anual en los estados de Jalisco, Michoacán y Sinaloa. La velocidad del viento fue tomada de la base de datos de INIFAP, resultado del promedio de las velocidades del viento en cada estado.

Para el periodo cálido en estos tres estados, la diferencia de los gradientes de temperatura al exterior y al interior, muestran un incremento considerable al interior del invernadero. Si bien, la temperatura externa es del orden de los 298 (Jalisco y Sinaloa) y 301 K, el incremento de temperatura generado en el interior del invernadero alcanza temperaturas del orden de los 307, 310 y 304 K (para Jalisco, Michoacán y Sinaloa respectivamente). Considerando el escenario de ventilación natural (**Figura 2.82a**) se vuelve necesario buscar o generar un mejor manejo del invernadero para periodos con climas cálidos. La implementación de la ventilación forzada ayuda en la reducción de la temperatura interna del invernadero en casi la mitad del espacio.

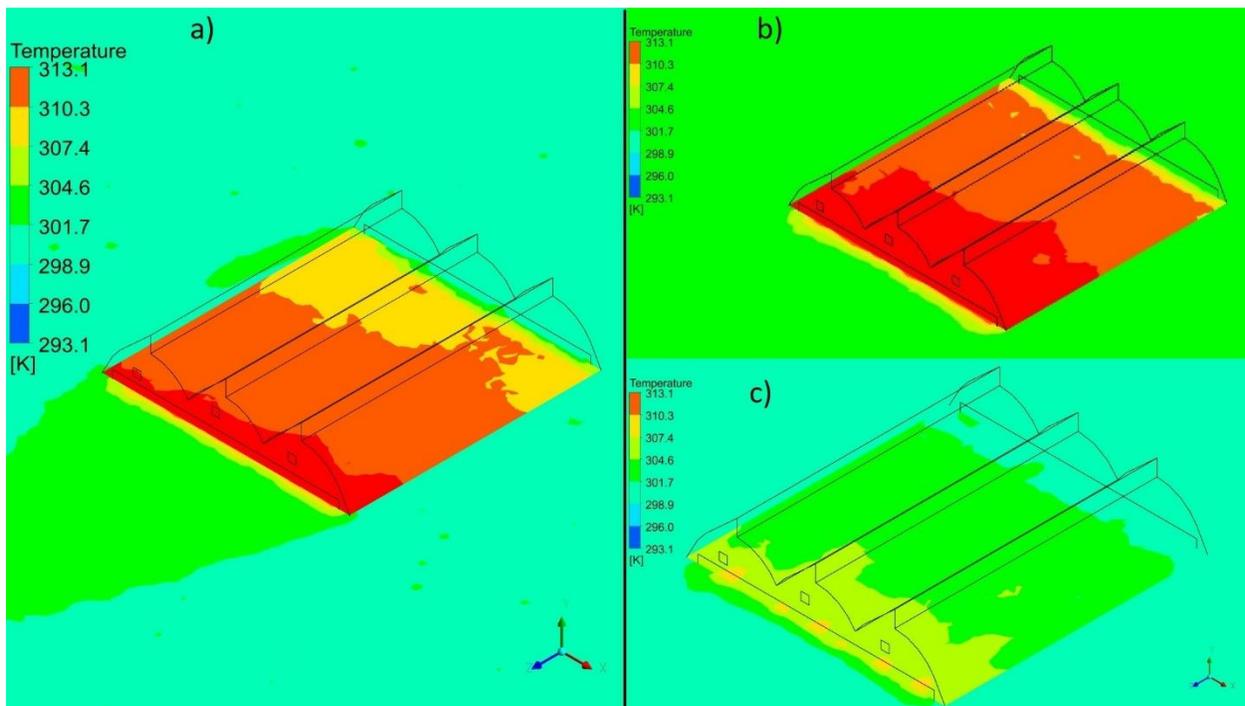


Figura 2.82. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación natural en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados

El plano vertical al interior del invernadero para la ventilación natural (**Figura 2.83a**) muestra que dentro de la estructura en cada una de las regiones se presentan temperaturas altas, tanto en el fondo, en la parte alta, la entrada y salida del invernadero, para este caso es necesario incrementar la renovación del flujo de aire dentro del invernadero. Al implementar la ventilación forzada se logra tener una región en el rango de 298 K a 307 K en la zona cercana al cultivo en todos los casos. Esta región abarca más de la mitad del espacio inferior del invernadero en el estado de Jalisco, poco menos de la mitad en el estado de Michoacán y en prácticamente todo el invernadero en el estado de Sinaloa.

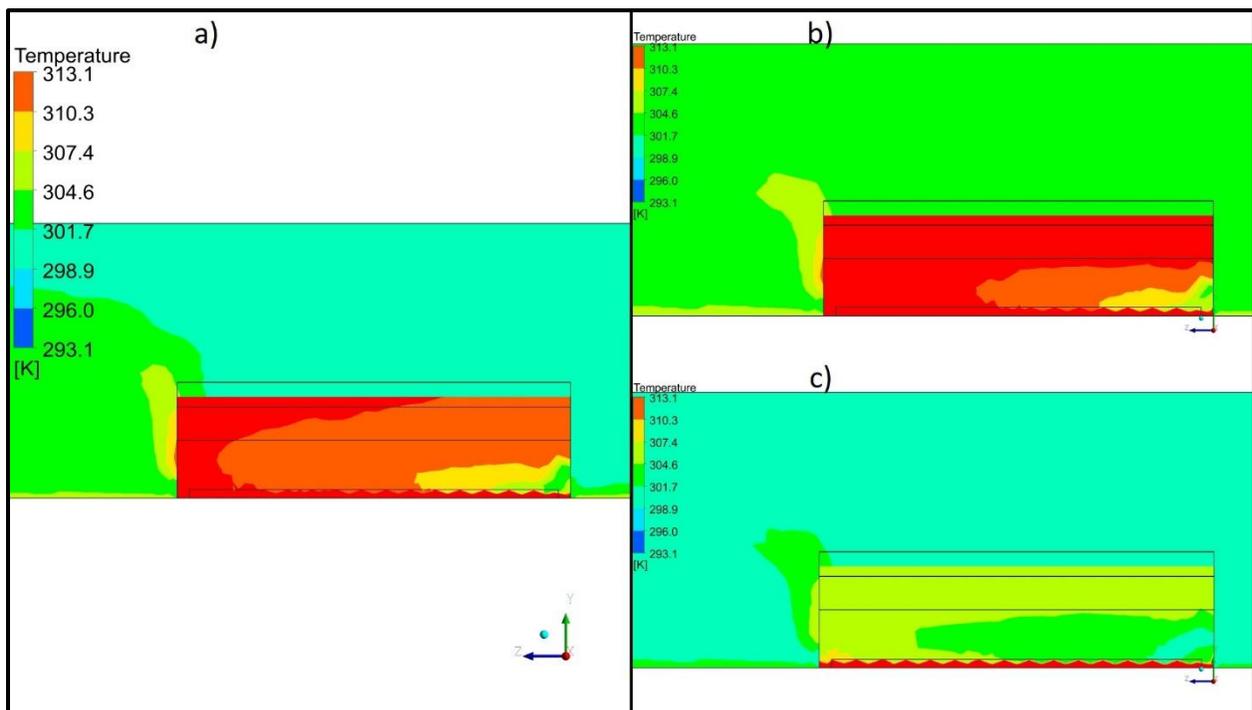


Figura 2.83. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación natural en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa.

Para la ventilación forzada en el periodo cálido para los tres estados, la diferencia de los gradientes de temperatura al exterior y al interior, muestran un incremento considerable al interior del invernadero. El incremento de temperatura generado en el interior del invernadero alcanza temperaturas del orden de los 307 K. La implementación de la ventilación forzada (**Figura 2.84a**) ayuda en la reducción de la temperatura interna del invernadero en más de la mitad del espacio.

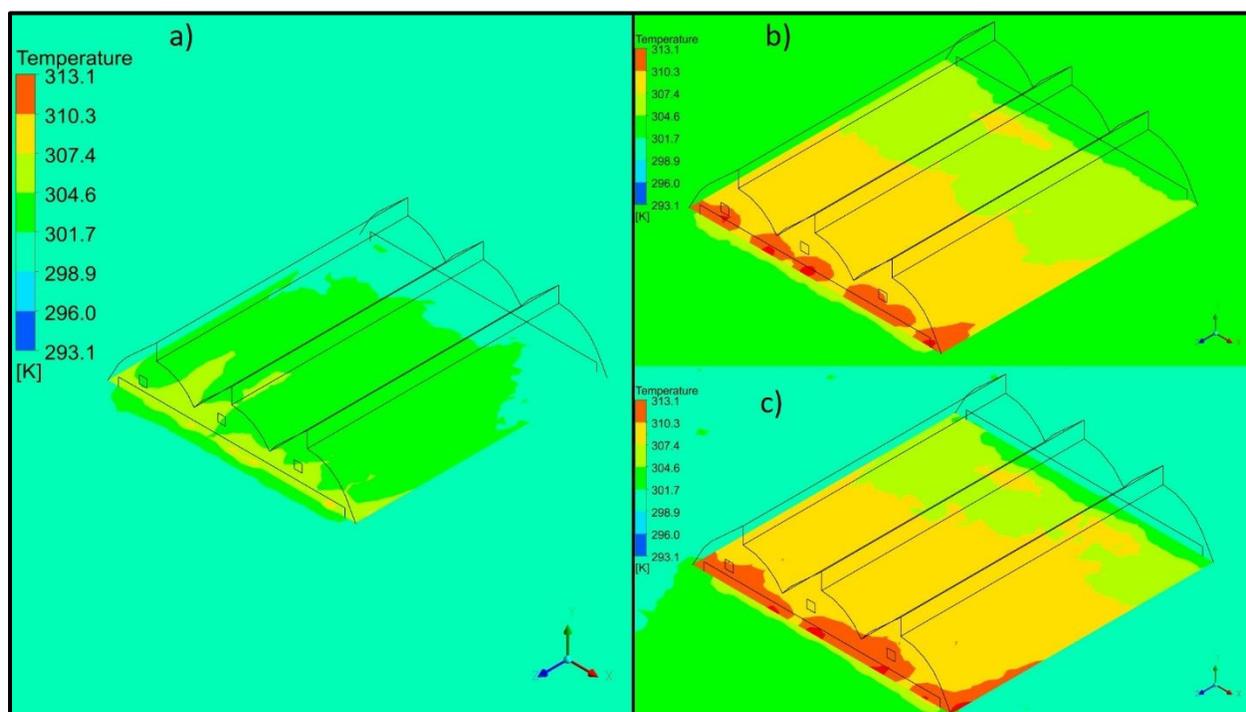


Figura 2.84. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación forzada en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa.

El plano vertical al interior del invernadero para la ventilación natural (**Figura 2.85a**) muestra que dentro de la estructura en cada una de las regiones se presentan temperaturas altas, tanto en el fondo, en la parte alta, la entrada y salida del invernadero, para este caso es necesario incrementar la renovación del flujo de aire dentro del invernadero. Al implementar la ventilación forzada se logra tener una región en el rango de 294 K a 302 K en la zona cercana al cultivo. Esta región abarca cercad de la mitad del espacio inferior del invernadero, la cual representa un incremento aproximado del 40% con respecto a la zona formada por la ventilación natural. Las temperaturas alcanzadas representan un incremento aproximado del 40% con respecto a la zona formada por la ventilación natural.

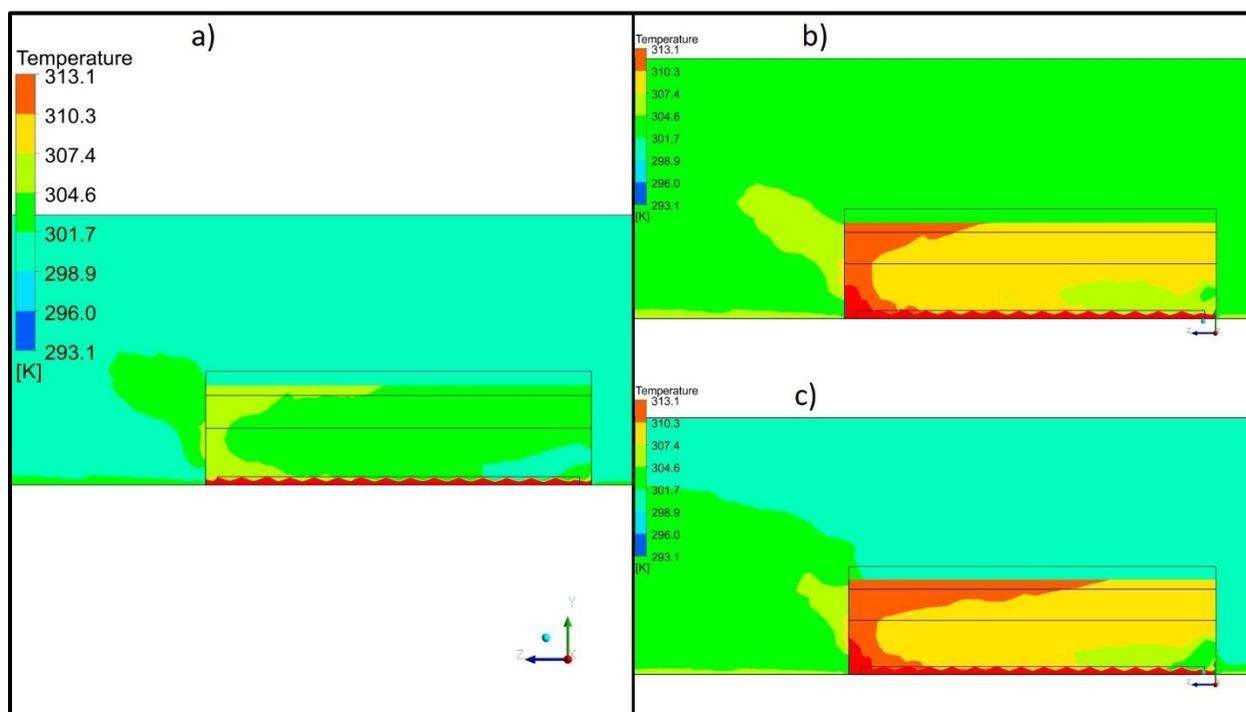


Figura 2.85. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo cálido con ventilación forzada en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa.

## 2.7.2. Periodo frío

### 2.7.2.1. Estado de México

Un invernadero construido para zonas frías, donde se requiere captar la mayor cantidad de luz y mitigar los efectos de las bajas temperaturas no puede relacionarse con un invernadero que debe construirse en lugares calurosos, donde el principal problema será la ventilación en las épocas cálidas.

En varios periodos la ventana de entrada es la principal entrada de aire. Las ventanas cenitales funcionan como salida del viento. Las dimensiones del invernadero, posición de las ventanas y la dirección del viento exterior determinan el patrón de intercambio de masa dentro del invernadero.

El periodo frío fue determinado con la temperatura mínima anual del estado de México. La velocidad del viento fue tomada de la base de datos de INIFAP, resultado del promedio de las velocidades del viento en el Estado de México.

La **Figura 2.86** muestra los gradientes de temperatura durante un periodo frío en el Estado de México, en la imagen se observa como la temperatura dentro del invernadero no es completamente uniforme, siendo la entrada de aire al invernadero, la zona más fría y por lo tanto la zona con mayor preocupación para el cultivo, cabe destacar que la función principal del

invernadero en periodos fríos, es la de mantener un gradiente de temperatura mayor, por lo que un manejo correcto del invernadero permitirá un mejor clima dentro de él.

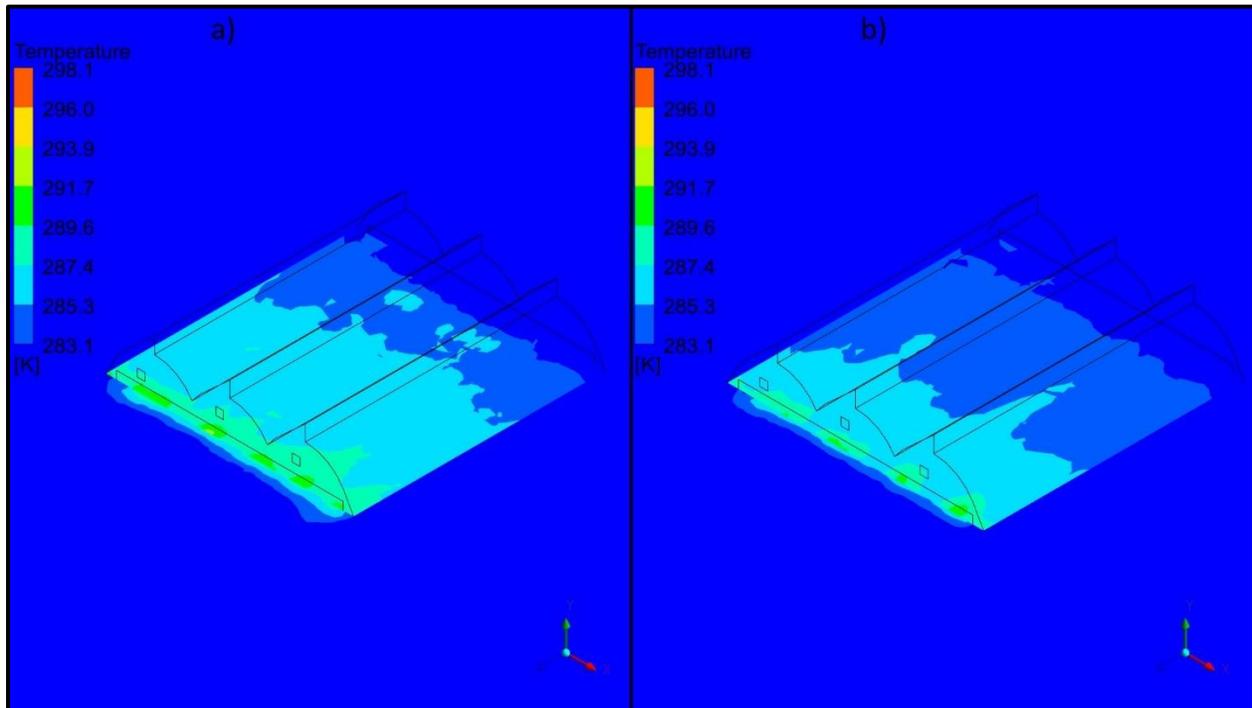


Figura 2.86. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano horizontal: a) ventilación natural y b) ventilación forzada.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La temperatura en el periodo frío es más homogénea que en el periodo cálido, con valores cercanos a los 283 K en la zona de las ventilas y no supera los 291 K en la zona más alejada de la entrada de aire. La zona de mayor temperatura en estas condiciones de frío se encuentra en el cultivo.

La **Figura 2.87** muestra los contornos de temperatura en el plano vertical, corroborando lo mostrado en la **Figura 2.86**, se observa, como en la entrada y principalmente en la zona baja cercana al cultivo, se encuentran la zona fría del invernadero, esta zona no es uniforme dentro del invernadero.

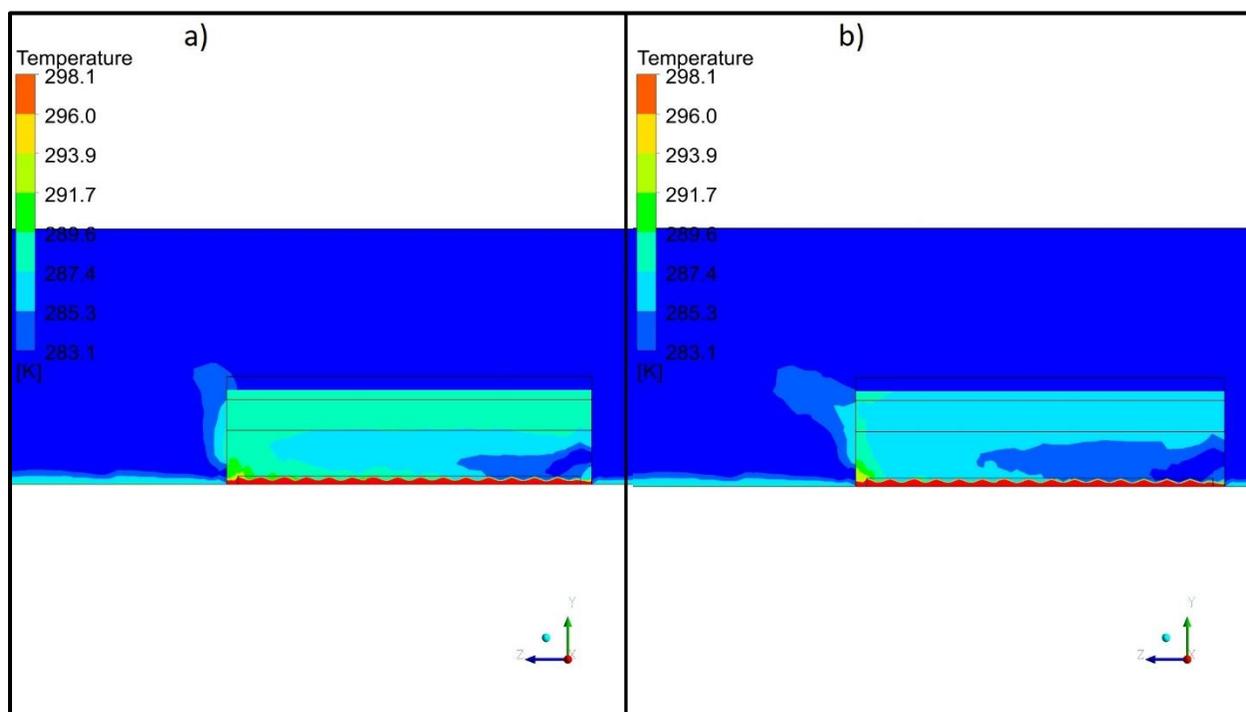


Figura 2.87. Contornos de temperatura en el periodo cálido en el interior del invernadero en el plano vertical: a) ventilación natural y b) ventilación forzada.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

En la **Figura 2.88** se observa que las corrientes de aire de mayor velocidad rodean el invernadero, formando remolinos en la parte opuesta de la dirección del viento. El aire que pasa por las ventilas mantiene la tendencia del flujo externo. La velocidad del viento es mucho mayor en el exterior del invernadero, reduciendo drásticamente en el momento de pasar por la malla de la ventilla.

El viento en el invernadero cumple la función de transferir vapor atmosférico al interior del invernadero. Dentro del cultivo remueve el vapor alrededor de las hojas y evita la saturación del ambiente con el consecutivo cierre de estomas (Vega-García, 2015). Además, con la acción del viento, el  $\text{CO}_2$  y la temperatura se distribuyen más uniformemente. La ausencia de ventilación ocasionaría una acumulación de vapor de agua y la reducción de la transpiración.

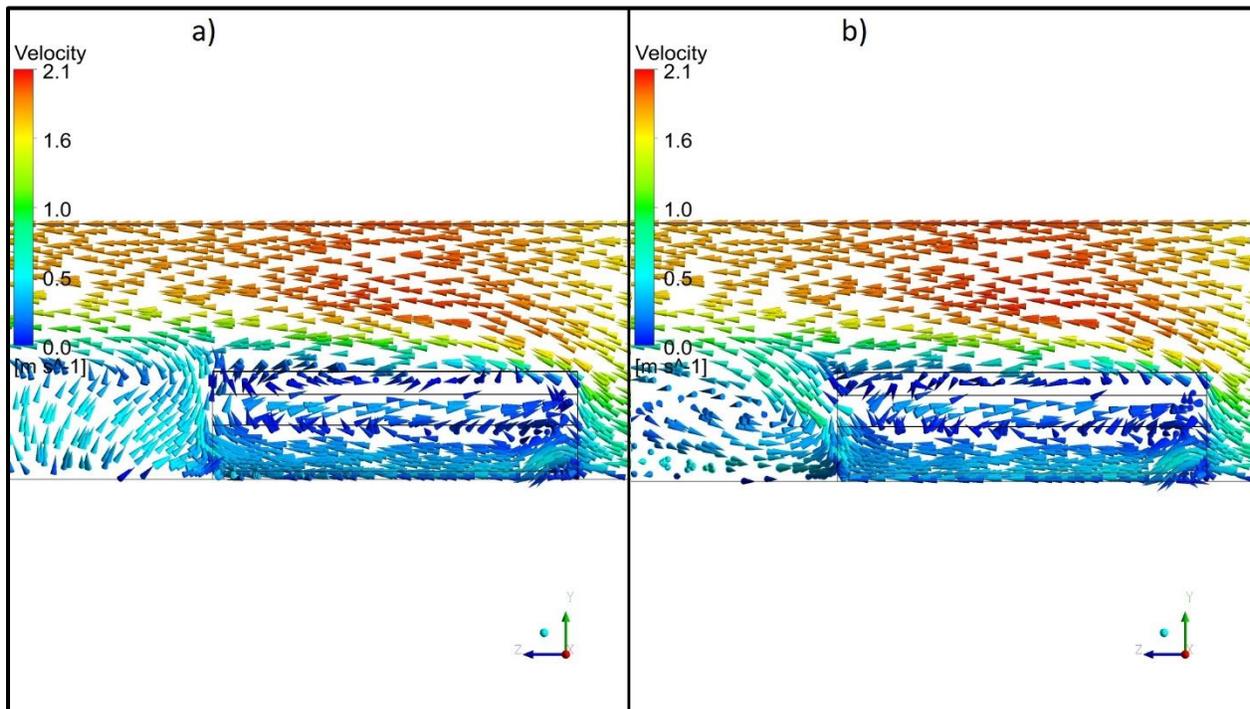


Figura 2.88. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero en el periodo frío. a) Ventilación natural y b) forzada, para el Estado de México.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

En los resultados se observa que con solamente abrir las ventanas no es suficiente para ventilar el invernadero. Aunque se pretenda captar la mayor cantidad de aire es necesario considerar que debe haber un área suficiente de ventanas para expulsar dicho aire y con ello favorecer una mayor tasa de ventilación.

#### Valores escalares

La **Figura 2.89** muestra la distribución de la temperatura al exterior del invernadero y a lo largo del invernadero, partiendo de la ventila de entrada de aire a la ventila de salida. La temperatura externa es inferior a la del invernadero. Inmediatamente después de la entrada, la temperatura se incrementa en hasta 5 K y después de un metro al interior del invernadero el aumento de temperatura es menor (hasta 4 K) hasta llegar a la salida, donde el descenso de temperatura es significativo (hasta 4 K).

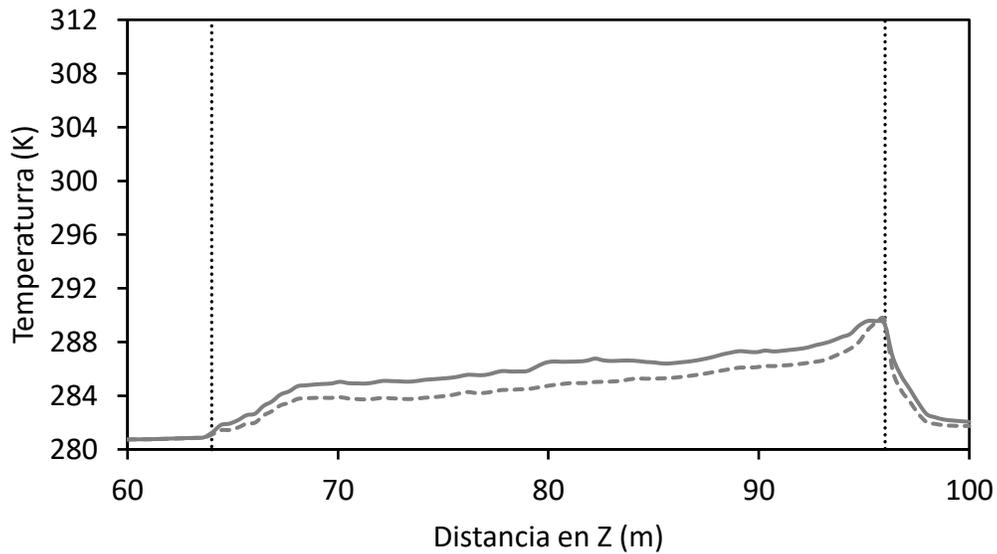


Figura 2.89. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para Estado de México en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La **Figura 2.90** muestra los valores escalares en la entrada al invernadero, esta zona es una de las principales zonas de riesgo, debido a las bajas temperaturas que se tienen, siendo necesario realizar modificaciones en el manejo del control del clima.

Para la zona de salida, tal es el caso de la figura x la temperatura alcanza temperaturas de 288 K, hasta 8 K por arriba de la temperatura de entrada.

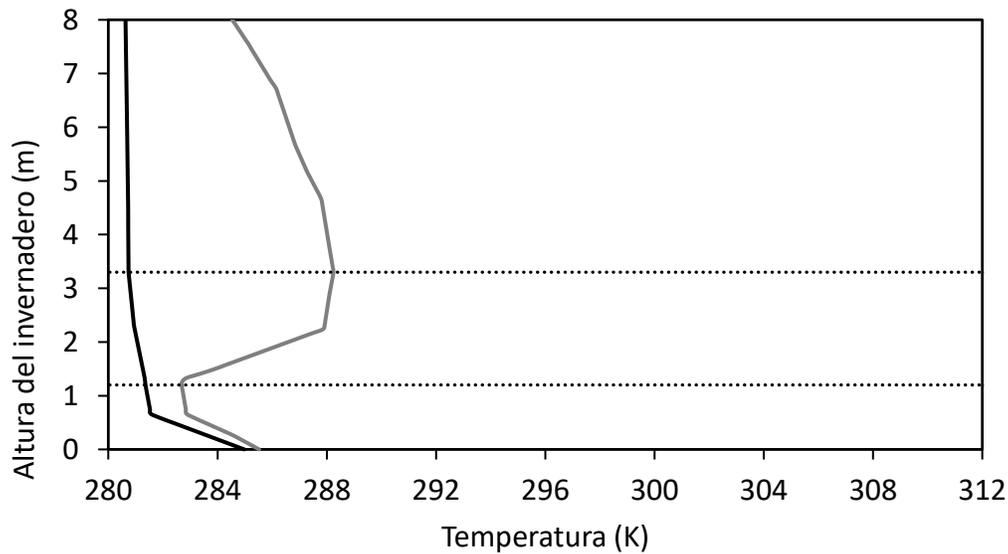


Figura 2.90. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La velocidad del viento se comporta de manera similar en todos los escenarios, caracterizándose por la disminución cercana al 10% de la velocidad global en el dominio. En el caso de San Luis Potosí, se observa que la velocidad en la ventilación natural cerca de la ventila de entrada es superior a la velocidad provocada por la ventilación forzada. Sin embargo, a lo largo del invernadero la velocidad de la ventilación forzada tiende a superar la velocidad de la ventilación natural y finalmente a la salida del invernadero, la velocidad de la ventilación forzada es mayor que la natural (**Figura 2.91**).

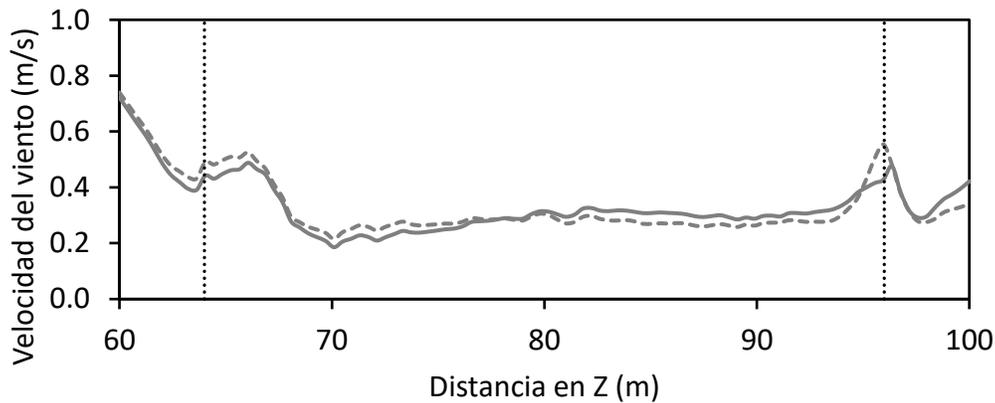


Figura 2.91. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El análisis de la velocidad en la parte superior del invernadero muestra que, si bien las velocidades cercanas a la entrada de aire son similares tanto para la ventilación natural como para la forzada, ésta última es hasta 45 % superior dentro del invernadero (**Figura 2.92**).

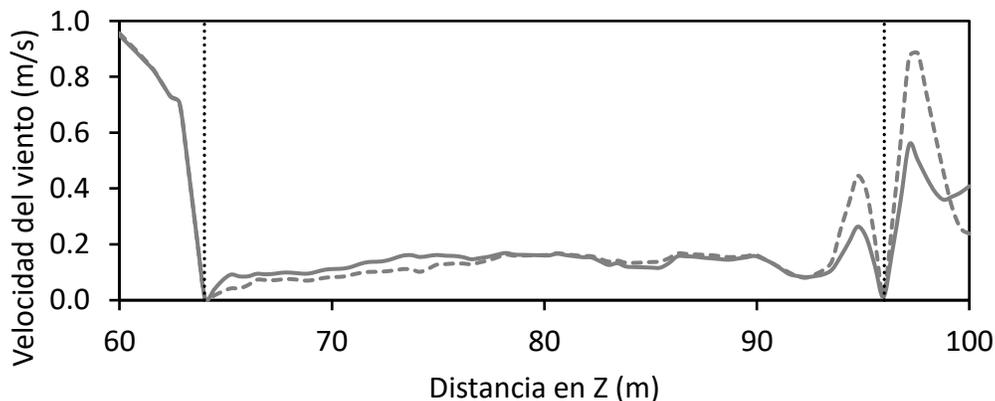


Figura 2.92. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para el Estado de México en el periodo frío a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Al comparar la temperatura contra la velocidad del viento, se tiene un patrón similar al observado en el Estado de México. La temperatura tiende a disminuir cuando la velocidad del viento aumenta y se incrementa cuando la velocidad del viento disminuye (**Figura 2.93**). Este

comportamiento sucede principalmente en las zonas cercanas a las ventilas de entrada y salida, ya que, en el interior del invernadero, debido a su longitud, la velocidad del viento se mantiene con poca variación mientras que la temperatura tiende a aumentar a lo largo del invernadero.

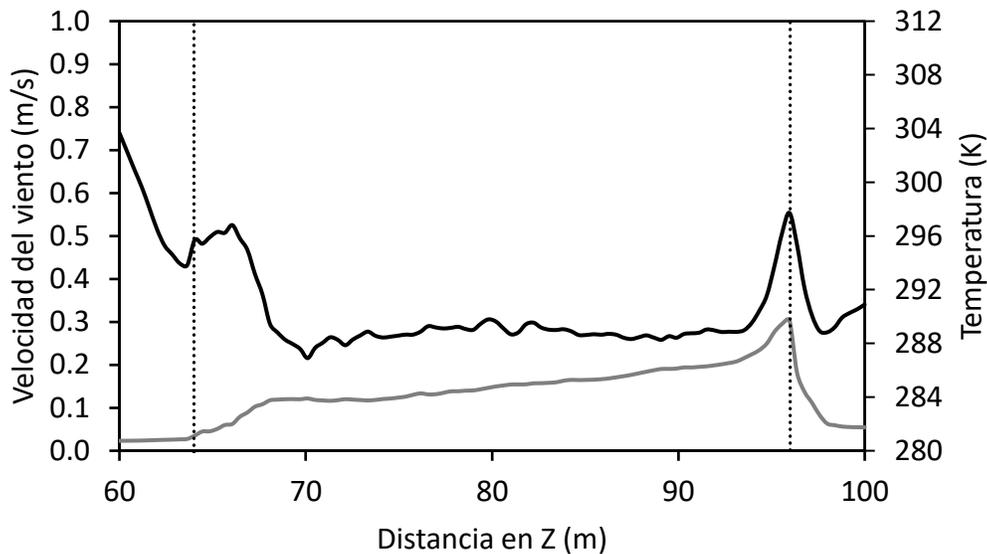


Figura 2.93. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en el Estado de México con ventilación forzada en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La ventilación natural durante el periodo cálido San Luis Potosí muestra comportamientos similares a los observados en el estado de México respecto a la velocidad de entrada y salida. El pico de velocidad máxima alcanzada en la ventila de entrada del invernadero es cercano a los 0.4m/s, mientras que la velocidad máxima alcanzada en la ventila de salida es del orden de los 0.65 m/s en la parte central de la ventila (**Figura 2.94**).

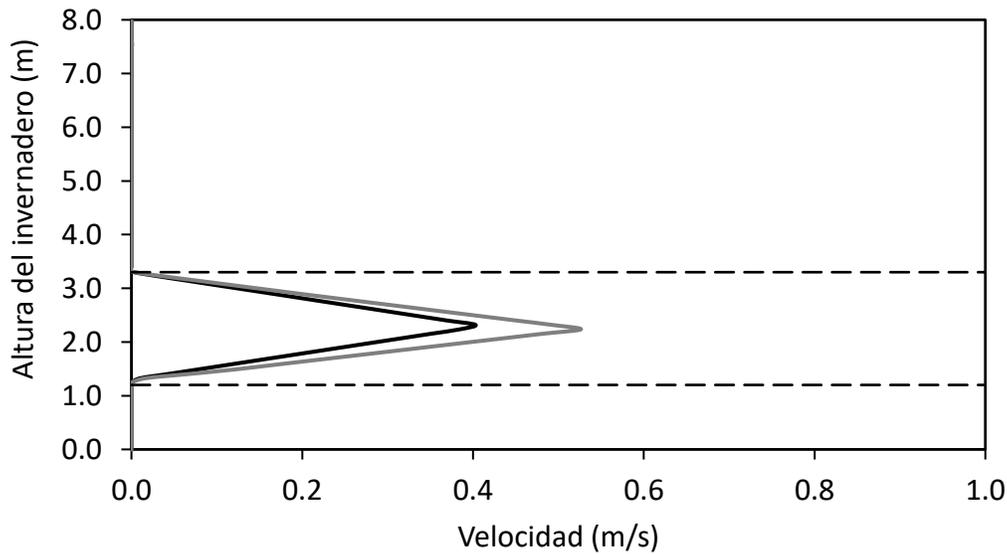


Figura 2.94. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en el Estado de México en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Para la obtención de los valores escalares se realizó un isoclip en las tres zonas relevantes del invernadero (entrada, salida, cultivo). El **Cuadro 2.43** muestra los valores escalares de temperatura distribuidos en el plano del cultivo. El valor de Z representa la distancia de la entrada del invernadero hasta la salida. Se observa que hay zonas de cultivo que están por debajo de los 20 °C y cercana a los 10 °C, para este caso es posible modificar el manejo del control del clima del invernadero, para incrementar la temperatura en ciertas zonas y evitar problemas con el cultivo.

Cuadro 2.43. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo para el periodo frío.

Z [m]	Temperatura [°C]	Z [m]	Temperatura [°C]	Z [m]	Temperatura [°C]
65.0	32.4	67.0	41.0	65.9	14.4
65.9	14.9	66.0	14.1	64.9	13.7
65.9	15.0	66.1	14.6	65.0	32.7
69.9	18.4	67.0	41.3	64.8	13.4
70.1	18.5	66.1	14.6	67.0	42.6
70.2	18.6	67.9	15.4	67.9	16.8
66.0	15.0	68.0	15.4	68.0	16.8
66.0	15.0	68.1	15.5	65.0	32.5
66.0	15.0	69.0	43.4	65.9	15.0
64.6	20.0	68.1	15.9	69.9	18.2

Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]
64.2	20.2	68.2	16.2	69.1	44.2
64.0	24.3	64.7	34.1	70.0	18.4
66.0	15.0	64.2	20.4	67.2	24.5
65.0	32.8	64.2	20.3	67.3	29.6
66.0	15.0	72.1	19.5	67.9	29.0
65.9	14.8	72.2	19.5	67.0	42.6
68.0	16.3	71.9	19.4	66.2	15.5
68.0	16.3	68.1	16.6	66.1	15.3
68.1	16.3	68.1	16.6	65.0	32.4
66.0	27.0	68.1	16.6	69.0	44.1
66.5	23.0	68.0	16.5	69.0	43.5
65.8	26.0	68.1	16.8	68.2	16.2
69.9	16.7	68.0	16.9	65.3	26.6
70.0	16.8	68.8	56.8	69.1	44.0
70.1	16.9	65.3	20.9	69.1	43.7
68.1	16.3	65.6	27.7	69.9	17.2
65.0	32.4	64.9	13.3	69.9	17.3
68.0	15.8	64.6	20.0	67.0	42.7
67.0	42.4	66.0	14.1	64.5	11.5
67.9	16.1	65.0	31.3	64.9	11.7

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

#### 2.7.2.2. *San Luis Potosí*

La región potosina ha visto el establecimiento constante de invernaderos y un desarrollo agrícola que se ha venido adaptando con nuevas tecnologías a los sistemas de producción. Por sus características climáticas, el tomate (saladette, bola, cherry, roma) sigue siendo el principal producto agrícola cultivado, seguido del pimiento de colores.

A pesar de las diferencias climáticas que imperan en San Luis Potosí, existen desarrollos agrícolas en prácticamente todo el estado; sin embargo, las mayores tecnologías están siendo implantadas en las regiones semiáridas del centro y meseta, entre los que se encuentran fincas bien establecidas y con reconocimiento nacional por su administración y tecnología, tal es el caso de El sureño, El Huevo, Eco Agri Tec, Agro Parque, Invernaderos Potosinos, etc. solo por mencionar algunos, en los municipios de Villa de Arista, Villa de Pozos, Matehuala, Rio Verde, etc.

El periodo frío fue determinado con la temperatura mínima anual del estado de San Luis Potosí. La velocidad del viento fue tomada de la base de datos de INIFAP, resultado del promedio de las velocidades del viento en el estado de San Luis Potosí.

Los contornos de temperatura (**Figura 2.95**) durante el periodo frío en el estado de San Luis Potosí muestran que un correcto manejo del invernadero puede generar un adecuado control dentro del clima del invernadero durante periodos con temperaturas bajas.

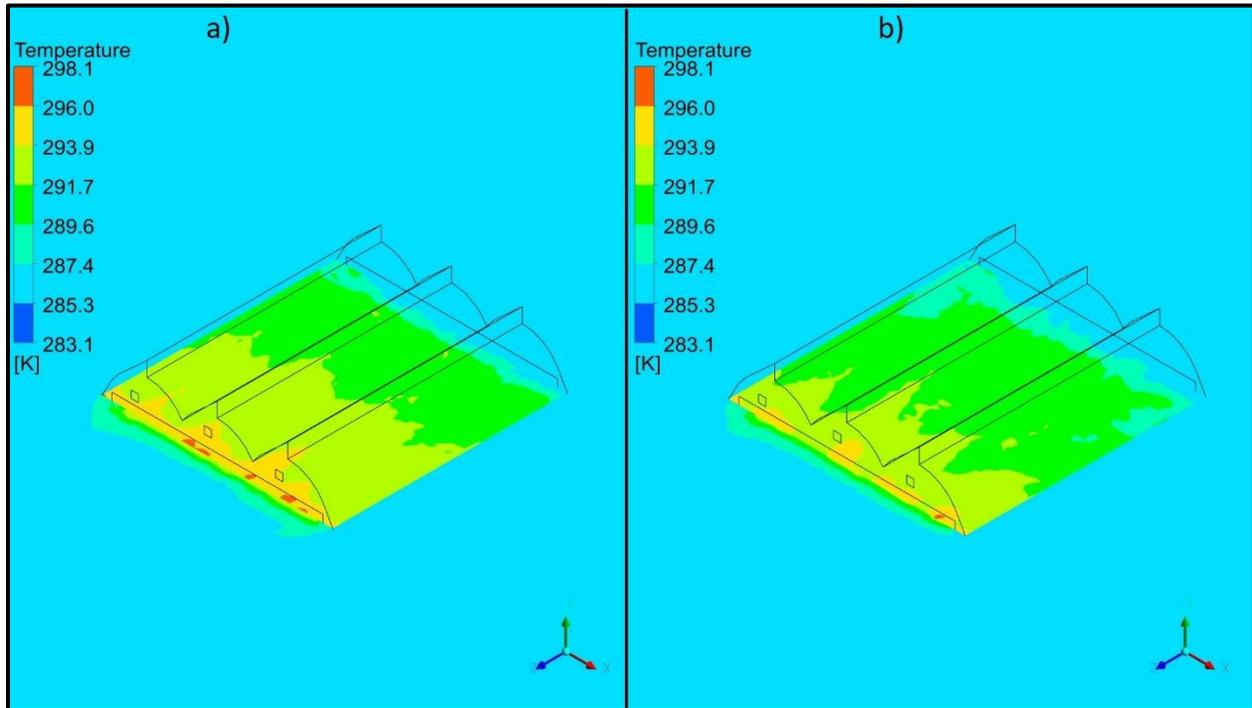


Figura 2.95. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero en el plano horizontal. a) Ventilación natural y b) ventilación forzada en San Luis Potosí.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El buen manejo del invernadero durante periodos fríos puede generar ambientes adecuados para el cultivo, tal es el caso de la **Figura 2.96** en la cual se observa dentro del invernadero temperaturas idóneas que se pueden tener debido a buen manejo del invernadero. Los gradientes de temperatura en la zona de cultivo muestran temperaturas más adecuadas para el cultivo, siendo este caso uno de los mejores, debido al adecuado manejo del invernadero que se tiene respecto a las variables climáticas de la zona.

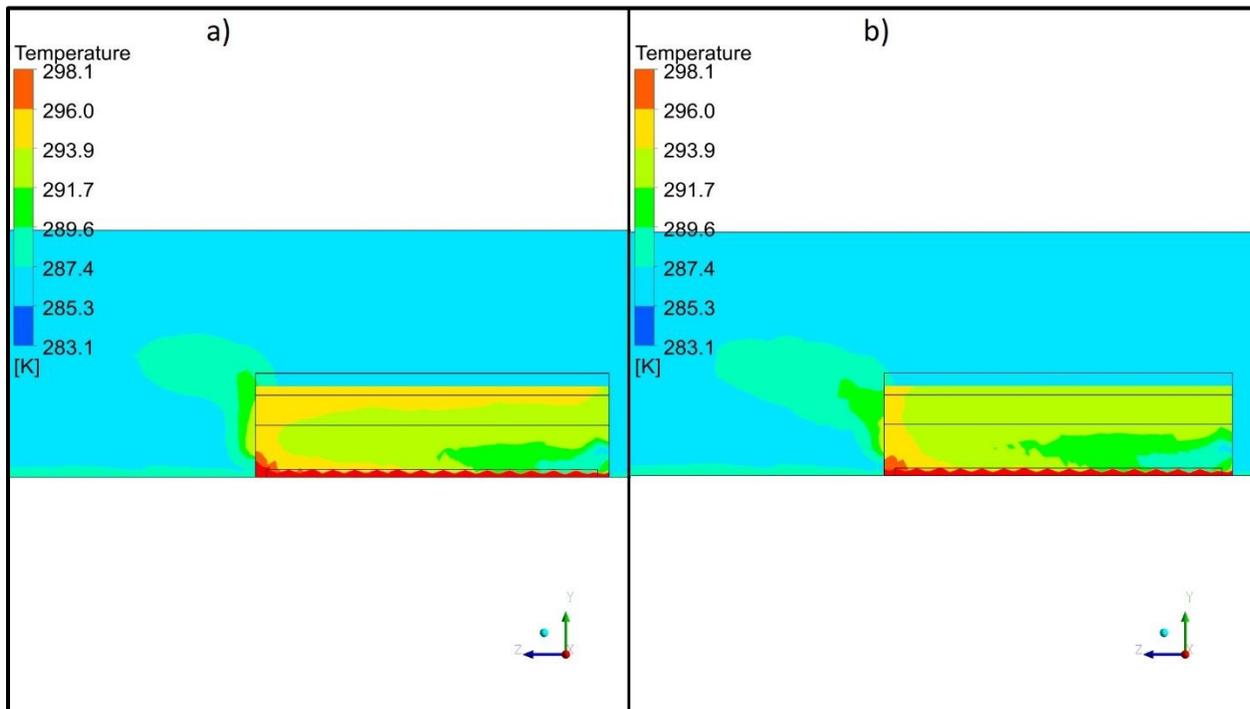


Figura 2.96. Contornos de temperatura en el interior del invernadero en el plano vertical. a) Ventilación natural, b) ventilación forzada en San Luis potosí.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Aun cuando la velocidad exterior del invernadero es relativamente alta, la velocidad al interior es mucho menor, debido a los diferentes sistemas de control de clima con que se cuenta, en el caso de que se requiera aumentar los gradientes de temperatura al interior del invernadero bastara, con cerrar las ventilas de manera parcial o completa.

El movimiento del aire al exterior del invernadero en este caso es muy similar a los anteriores, caracterizado por la generación de vórtices en los laterales y la salida del invernadero. Gran parte de la reducción o aumento de la temperatura del invernadero se debe al flujo de aire (**Figura 2.97**). Un buen manejo del invernadero puede conservar e incrementar la temperatura al interior del invernadero durante periodos fríos, este manejo consiste, desde cerrar las ventanas cenitales, hasta apagar los ventiladores del invernadero en caso de haberlos.

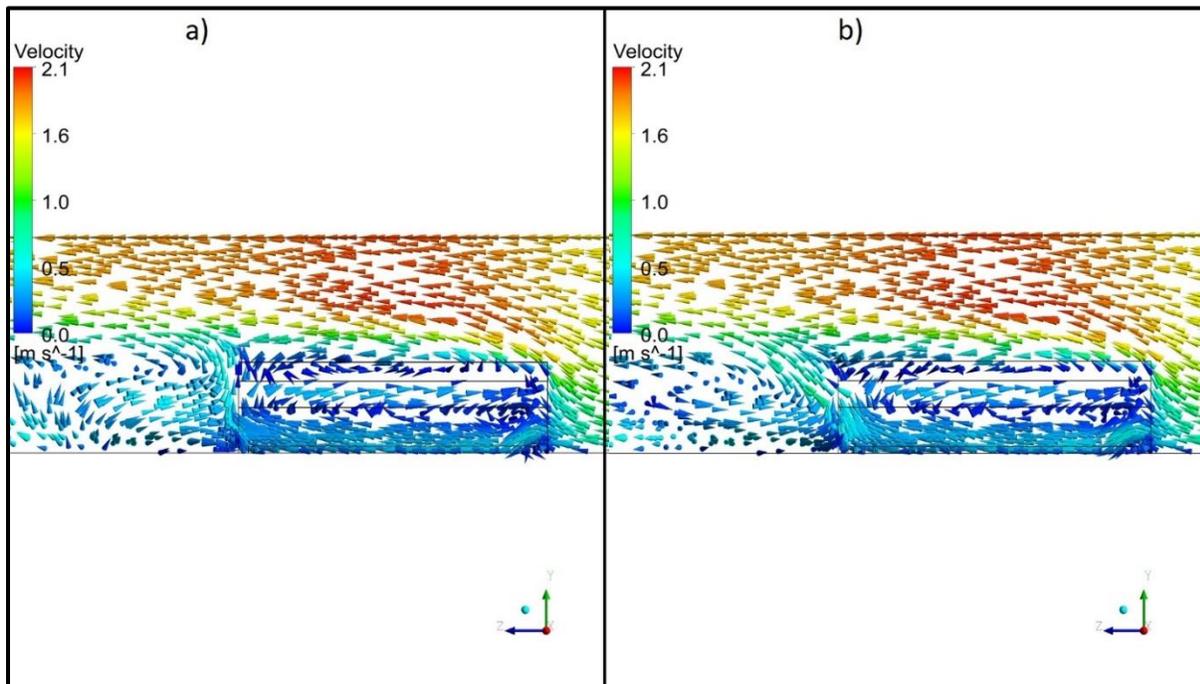


Figura 2.97. Velocidad y dirección del viento en el interior del invernadero. a) Ventilación natural y b) ventilación forzada en San Luis Potosí.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

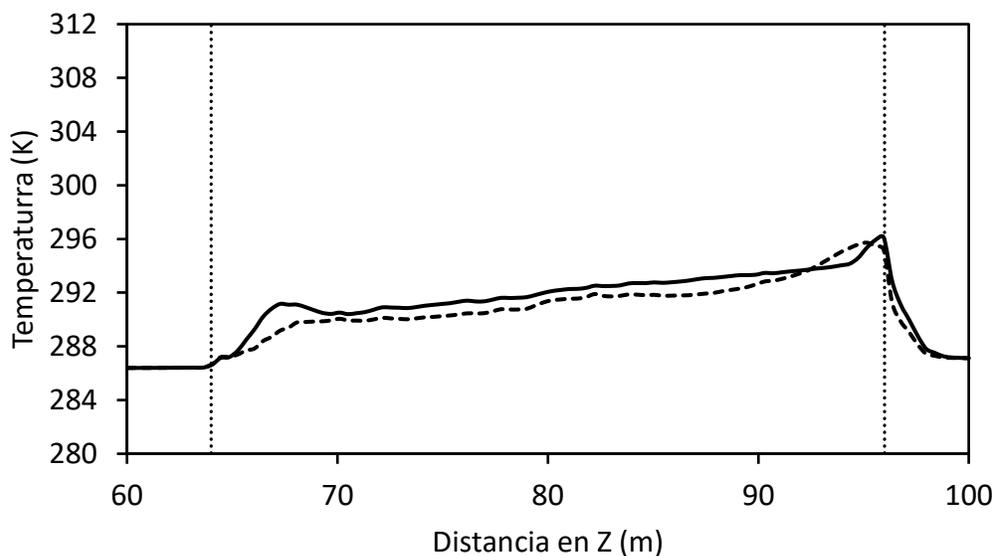


Figura 2.98. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Los valores mostrados por la **Figura 2.99** muestran que en la zona de entrada del invernadero se registran las temperaturas menores, siendo estas temperaturas cercanas a los 16 °C y la temperatura promedio cercana a los 30 °C.

Para la salida durante el periodo frío (Cuadro 3.18) las temperaturas rondan entre los 33 °C y 42 °C con algunos puntos irregulares un poco más elevados.

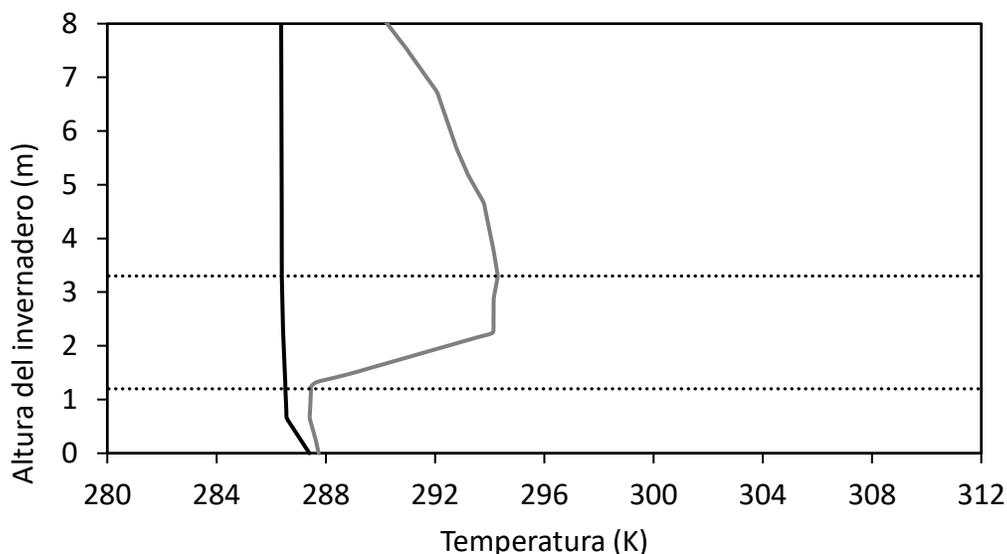


Figura 2.99. Temperatura en la zona de barlovento (●) y sotavento (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo frío. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El estudio de la temperatura en el periodo cálido muestra temperaturas que van desde los 302 K, hasta temperaturas mayores alcanzando puntos de temperatura cercanos a los 312 K o más, estas temperaturas están fuera del rango óptimo para el cultivo. La ventilación natural presenta valores de temperatura superiores a los alcanzados por la ventilación forzada. La activación de los extractores logra disminuir la temperatura en hasta 2 K en el interior del invernadero, y cerca de 4 K en las zonas próximas a la ventilas (**Figura 2.100**).

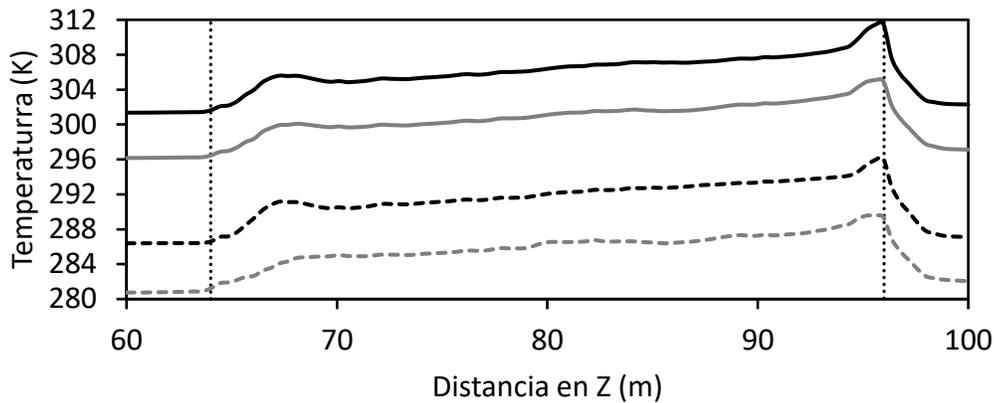


Figura 2.100. Temperatura dentro del invernadero con ventilación natural en el periodo cálido (—) y periodo frío (---) para San Luis potosí (●) y Estado de México (●).

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La velocidad del viento se comporta de manera similar en todos escenarios, caracterizándose por la disminución cercana al 10% de la velocidad global en el dominio. En el caso de San Luis Potosí (**Figura 2.101**), se observa que la velocidad en la ventilación natural cerca de la ventila de entrada es superior a la velocidad provocada por la ventilación forzada. Sin embargo, a lo largo del invernadero la velocidad de la ventilación forzada tiende a superar la velocidad de la ventilación natural y finalmente a la salida del invernadero, la velocidad de la ventilación forzada es mayor que la natural.

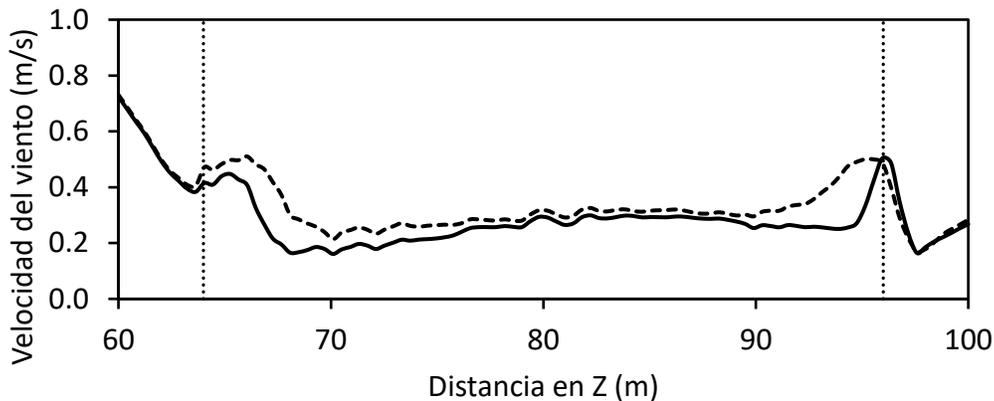


Figura 2.101. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

El análisis de la velocidad en la parte superior del invernadero muestra que, si bien las velocidades cercanas a la entrada de aire son similares tanto para la ventilación natural como para la forzada, ésta última es hasta 45 % superior dentro del invernadero (**Figura 2.102**).

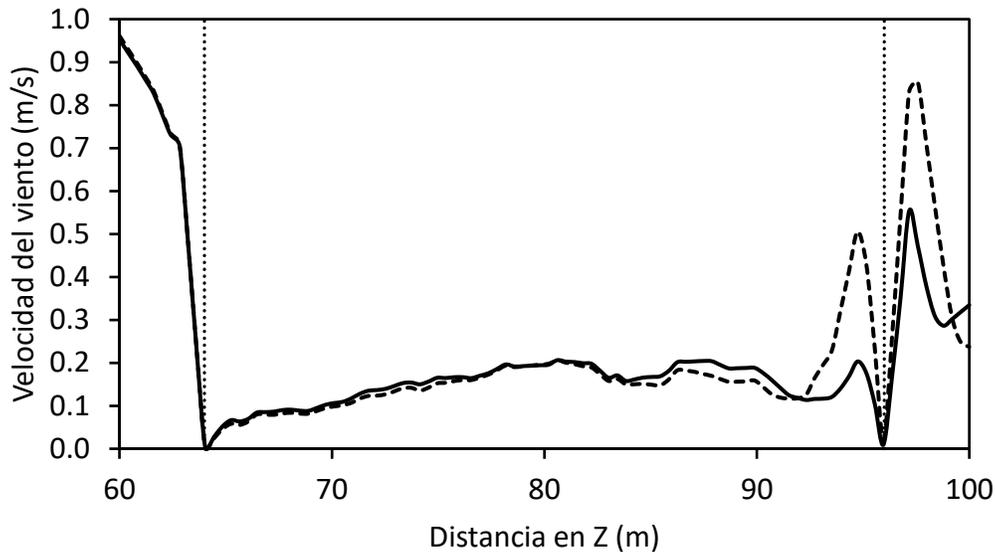


Figura 2.102. Velocidad del viento dentro y fuera del invernadero con ventilación natural (—) y ventilación forzada (---) para San Luis Potosí en el periodo cálido a 5.2 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

La ventilación natural durante el periodo cálido San Luis Potosí muestra comportamientos similares a los observados en el estado de México respecto a la velocidad de entrada y salida. El pico de velocidad máxima alcanzada en la ventila de entrada del invernadero es cercano a los 0.4m/s, mientras que la velocidad máxima alcanzada en la ventila de salida es del orden de los 0.65 m/s en la parte central de la ventila (**Figura 2.103**).

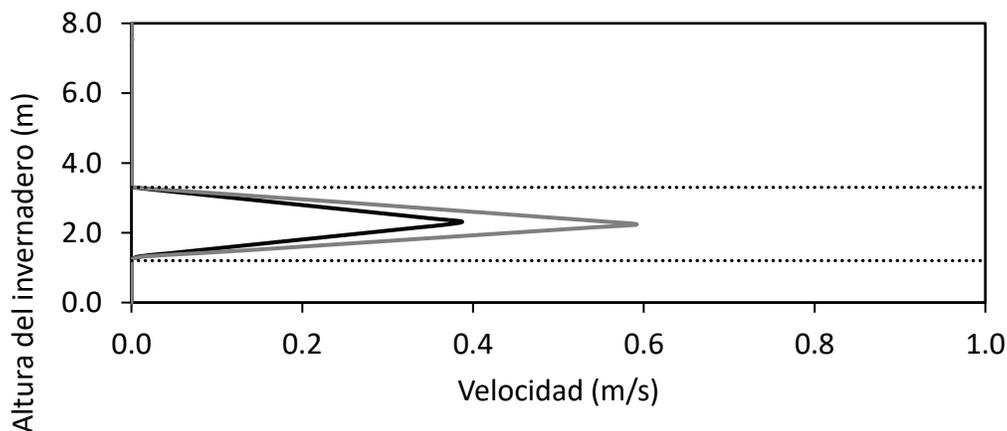


Figura 2.103. Velocidad del viento en la ventila de entrada (●) y ventila de salida (●) del invernadero con ventilación natural en San Luis Potosí en el periodo cálido. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Al comparar la temperatura contra la velocidad del viento, se tiene un patrón similar al observado en el Estado de México. La temperatura tiende a disminuir cuando la velocidad del viento aumenta y se incrementa cuando la velocidad del viento disminuye (Figura 2.104). Este comportamiento sucede principalmente en las zonas cercanas a las ventilas de entrada y salida, ya que, en el interior del invernadero, debido a su longitud, la velocidad del viento se mantiene con poca variación mientras que la temperatura tiende a aumentar a lo largo del invernadero.

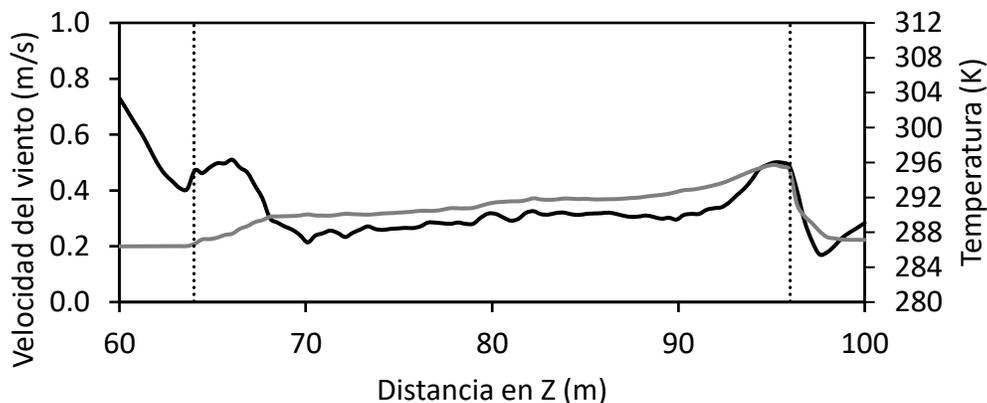


Figura 2.104. Temperatura (●) y velocidad del viento (●) dentro del invernadero en San Luis Potosí con ventilación forzada en el periodo frío a 2.3 m de altura. La línea punteada representa la ubicación de las ventilas de entrada y salida.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

Para la obtención de los valores escalares se realizó un isoclip en la zona del cultivo. El Cuadro 2.44 muestra los valores escalares de temperatura distribuidos en el plano del cultivo. El valor de Z representa la distancia de la entrada del invernadero hasta la salida.

Cuadro 2.44. Valores escalares de temperatura en la zona del cultivo para el periodo frío.

Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]
65.0	40.6	67.0	48.0	65.9	21.3
65.9	23.1	66.0	20.9	64.9	20.8
65.9	23.1	66.1	21.5	65.0	40.2
69.9	26.4	67.0	48.2	64.8	22.3
70.1	26.6	66.1	21.5	67.0	50.1
70.2	26.6	67.9	23.0	67.9	25.2
66.0	22.4	68.0	23.0	68.0	25.0

Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]	Z [ m ]	Temperatura [ °C ]
66.0	22.4	68.1	23.1	65.0	40.1
66.0	22.4	69.0	49.9	65.9	22.9
64.6	27.8	68.1	23.2	69.9	25.6
64.2	27.9	68.2	23.5	69.1	50.8
64.0	32.3	64.7	42.3	70.0	25.9
66.0	22.4	64.2	28.8	67.2	32.2
65.0	39.6	64.2	28.3	67.3	36.8
66.0	22.4	72.1	27.0	67.9	36.2
65.9	21.8	72.2	27.1	67.0	50.4
68.0	23.5	71.9	26.9	66.2	23.5
68.0	23.5	68.1	23.8	66.1	23.4
68.1	23.5	68.1	23.8	65.0	39.6
66.0	34.0	68.1	23.8	69.0	50.6
66.5	30.6	68.0	23.8	69.0	50.1
65.8	33.1	68.1	25.0	68.2	23.5
69.9	24.5	68.0	25.3	65.3	33.7
70.0	24.5	68.8	64.3	69.1	50.6
70.1	24.6	65.3	28.8	69.1	50.4
68.1	23.5	65.6	34.6	69.9	24.5
65.0	39.7	64.9	19.6	69.9	24.8
68.0	23.1	64.6	27.1	67.0	50.3
67.0	49.0	66.0	20.9	64.5	18.6
67.9	23.3	65.0	38.2	64.9	18.9

Fuente: Elaboración propia con datos simulados.

### 2.7.2.3. Jalisco, Michoacán y Sinaloa

El periodo frío fue determinado con la temperatura mínima anual de los estados de Jalisco, Michoacán y Sinaloa. La velocidad del viento fue tomada de la base de datos de INIFAP, resultado del promedio de las velocidades del viento de los tres estados antes mencionados.

La **Figura 2.105** muestra los gradientes de temperatura durante un periodo frío en los estados de Jalisco, Michoacán y Sinaloa, en la imagen se observa como la temperatura dentro del invernadero no es completamente uniforme, siendo la entrada de aire al invernadero, la zona más fría y por lo tanto la zona con mayor preocupación para el cultivo, cabe destacar que la función principal del invernadero en periodos fríos, es la de mantener un gradiente de temperatura mayor, por lo que un manejo correcto del invernadero permitirá un mejor clima dentro de él.

La temperatura en el periodo frío es más homogénea que en el periodo cálido, con valores cercanos a los 287 K (Jalisco y Sinaloa) y 283 K (Michoacán) en la zona de las ventilas y no supera los 293 K en la zona más alejada de la entrada de aire (en el caso de Michoacán). La zona de mayor temperatura en estas condiciones de frío se encuentra en el cultivo.

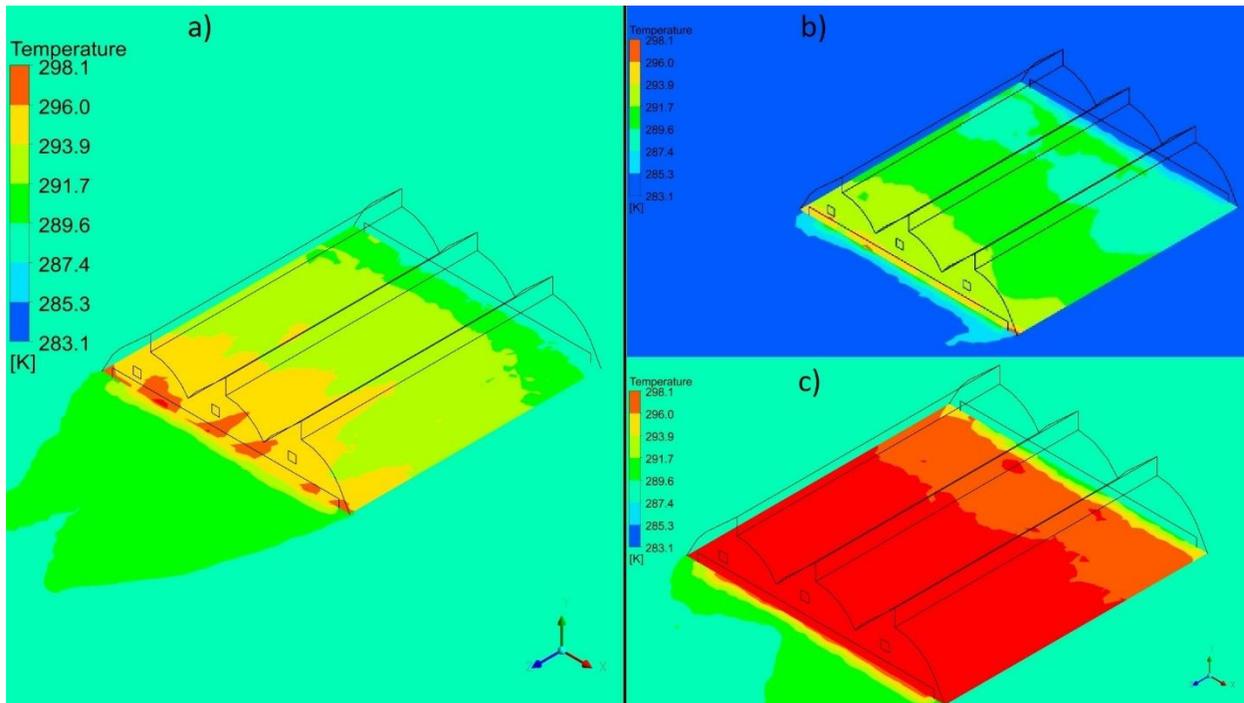


Figura 2.105. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación natural en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados

La **Figura 2.106** muestra los contornos de temperatura en el plano vertical para los tres estados analizados (Jalisco, Michoacán y Sinaloa). Se observa como en la entrada y principalmente en la zona baja cercana al cultivo, se encuentran la zona fría del invernadero (en el estado de Michoacán), esta zona no es uniforme dentro del invernadero. A pesar de estar en un periodo de temperaturas bajas en el estado de Sinaloa, no se observan zonas dentro del invernadero con temperaturas inferiores 289 K, además, las temperaturas máximas alcanzadas en el periodo frío del estado de Sinaloa son cercanas a los 298 K.

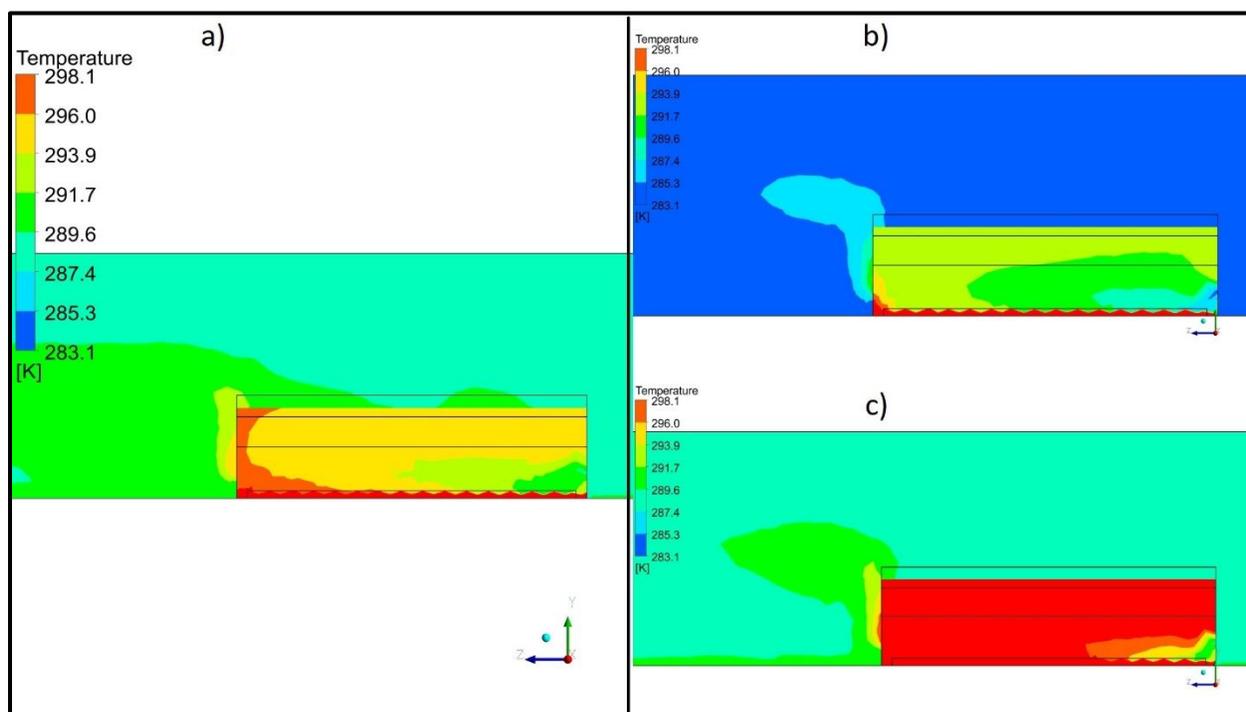


Figura 2.106. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación natural en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados

Los contornos de temperatura (**Figura 2.107**) dentro del invernadero con ventilación forzada durante el periodo frío en los estados de Jalisco, Michoacán y Sinaloa muestran que un correcto manejo del invernadero puede generar un adecuado control dentro del clima del invernadero durante periodos con temperaturas bajas.

La temperatura en el periodo frío es más homogénea que en el periodo cálido, con valores cercanos a los 287 K (en los estados de Jalisco y Sinaloa) y 283 K (Michoacán) en la zona de las ventilas. En los tres estados ocurren gradientes de temperaturas similares, siendo el más caliente el estado de Sinaloa, donde las temperaturas más altas son del orden de los 294 K.

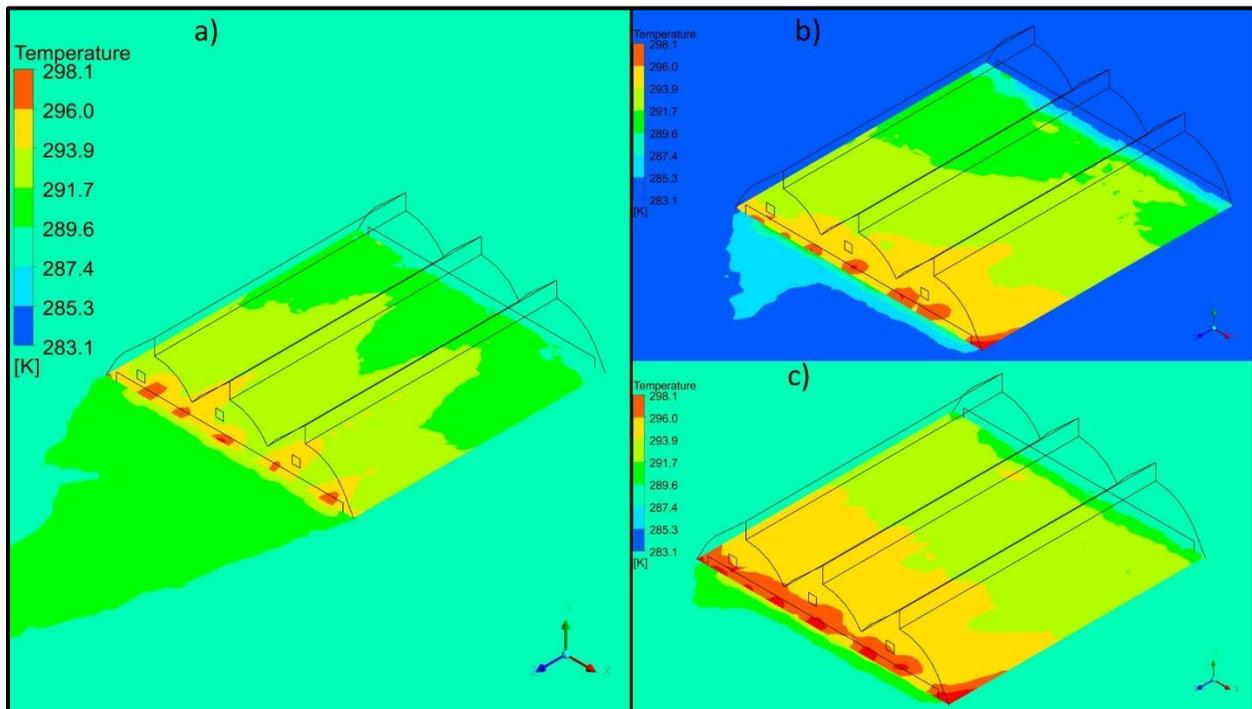


Figura 2.107. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación forzada en el plano horizontal. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa. Fuente: Elaboración propia con datos simulados

La **Figura 2.108** muestra la comparativa de los contornos de temperatura en el plano vertical en los estados de Jalisco, Michoacán y Sinaloa para el escenario de ventilación forzada. Se observa que las mayores temperaturas se encuentran en la parte superior del invernadero, que en el estado de Sinaloa pueden alcanzar los 298 K en la zona cercana a la salida de aire. La zona más fría del invernadero se localiza inmediatamente después de la ventila de entrada, principalmente en el estado de Michoacán, donde las temperaturas más bajas dentro del invernadero son del orden de los 285 K.

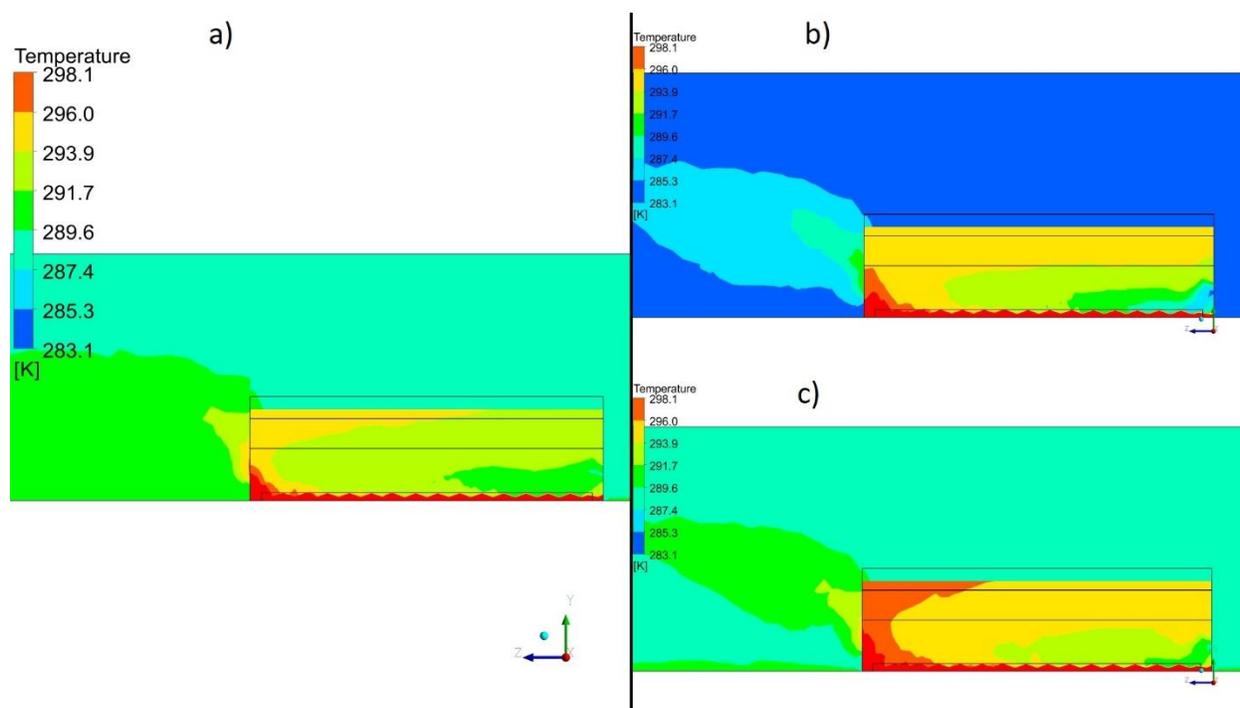


Figura 2.108. Contornos de temperatura en el interior y exterior del invernadero durante el periodo frío con ventilación forzada en el plano vertical. a) Jalisco, b) Michoacán, c) Sinaloa.

Fuente: Elaboración propia con datos simulados

## 2.8. Costos de la ventilación forzada

El uso de ventiladores favorece el intercambio de aire en el invernadero, con lo cual se favorece el control ambiental del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación natural. La ventilación natural es el método de control climático preferido por los productores, ya que es más barato, sin embargo, cuando la ventilación natural no es suficiente por si sola para mantener el ambiente óptimo para el cultivo, se requieren alternativas, tal como el uso de ventiladores. El impacto de la ventilación mecánica se da de manera inmediata con un efecto directo en el costo de la producción.

Para la ventilación combinada, adicionalmente a la ventilación natural, se recreó el uso de ventiladores al interior del invernadero con el fin de incrementar el flujo de aire y con ello aumentar la tasa de ventilación que controle de mejor manera la temperatura al interior del invernadero.

La Comisión Federal de Electricidad CFE, establece distintas tarifas para el uso de energía eléctrica para el sector agrícola. La tarifa 9-N se aplica para energía eléctrica utilizada en la operación de los equipos de bombeo y rebombeo de agua para riego agrícola, pero podría ser aplicable también en el funcionamiento y operación de sistemas de control climático en invernaderos. Por

otro lado, la tarifa 1 de uso doméstico, como su nombre lo dice, esta tarifa contempla todos los servicios que destinen energía de uso exclusivamente doméstico, esto es en cada residencia, apartamento en condominio o vivienda (CFE, 2015)

Con el fin de mostrar las implicaciones del uso de un motor en este tipo de sistemas, se realiza un análisis del costo implicado en el control del microclima del invernadero; para tal caso se usó la tarifa agrícola 9-N y la tarifa doméstica. Los ventiladores que operan al interior del invernadero son modelo EX 36"-0,5; se seleccionaron del catálogo de sistemas de extracción de aire Exafan. Las características del ventilador se muestran en el **Cuadro 2.45**.

Cuadro 2.45. Datos técnicos del ventilador modelo EX 36"-0,5.

MODELO	CAUDAL (m <sup>3</sup> /h)	DIÁMETRO (mm)	DIMENSIONES (mm)			MOTOR	
			A	B	C	CV	Kw
EX 36"-0,5	19.1	915	1090	1090	450	0.5	0.38

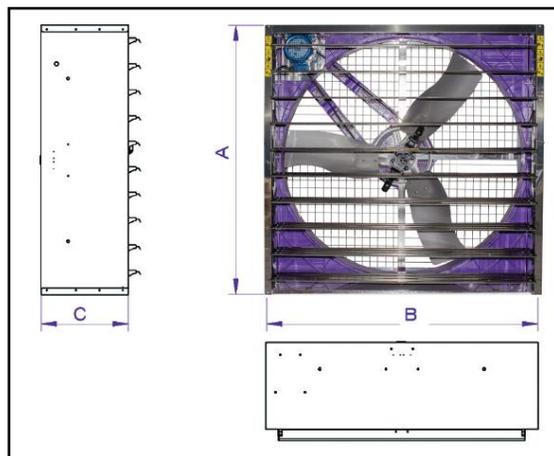


Figura 2.109. Dimensiones del ventilador modelo EX 36"-0,5

Para la tarifa agrícola (9-N) se muestra el **Cuadro 2.46**:

Cuadro 2.46. Tarifas por kilowatt/hora para los periodos diurno y nocturno.

AÑO	CARGO POR KILOWATT-HORA DE ENERGÍA CONSUMIDA EN EL PERIODO DIURNO	CARGO POR KILOWATT-HORA DE ENERGÍA CONSUMIDA EN EL PERIODO NOCTURNO
2017	\$0.58	\$0.29

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2017.

Si la necesidad de usar ventiladores es variable o solo se requieren durante un tiempo en específico, los costos para la tarifa agrícola serían los siguientes (**Cuadro 2.47**):

Cuadro 2.47. Costo de uso de tres ventiladores por número de horas de uso en un día. Tarifa agrícola.

Periodo	Horas al día					
	1	2	4	6	8	24
Diurno	\$0.66	\$1.32	\$2.64	\$3.97	\$5.29	\$15.87
Nocturno	\$0.33	\$0.66	\$1.32	\$1.98	\$2.64	\$7.93

La **Figura 2.110** muestra que, a mayor tiempo de uso, se tiene un mayor costo. El tiempo de uso de la ventilación mecánica está en función de las características climáticas exteriores locales y por consiguiente del comportamiento del clima al interior del invernadero. Para regiones de clima cálido, el tiempo de uso de esta alternativa de ventilación se verá incrementado debido a las altas temperaturas o bajas velocidades del viento exterior. Por otra parte, el tiempo de uso también se ve condicionado según los estándares óptimos de desarrollo que exige el cultivo que se desea producir.

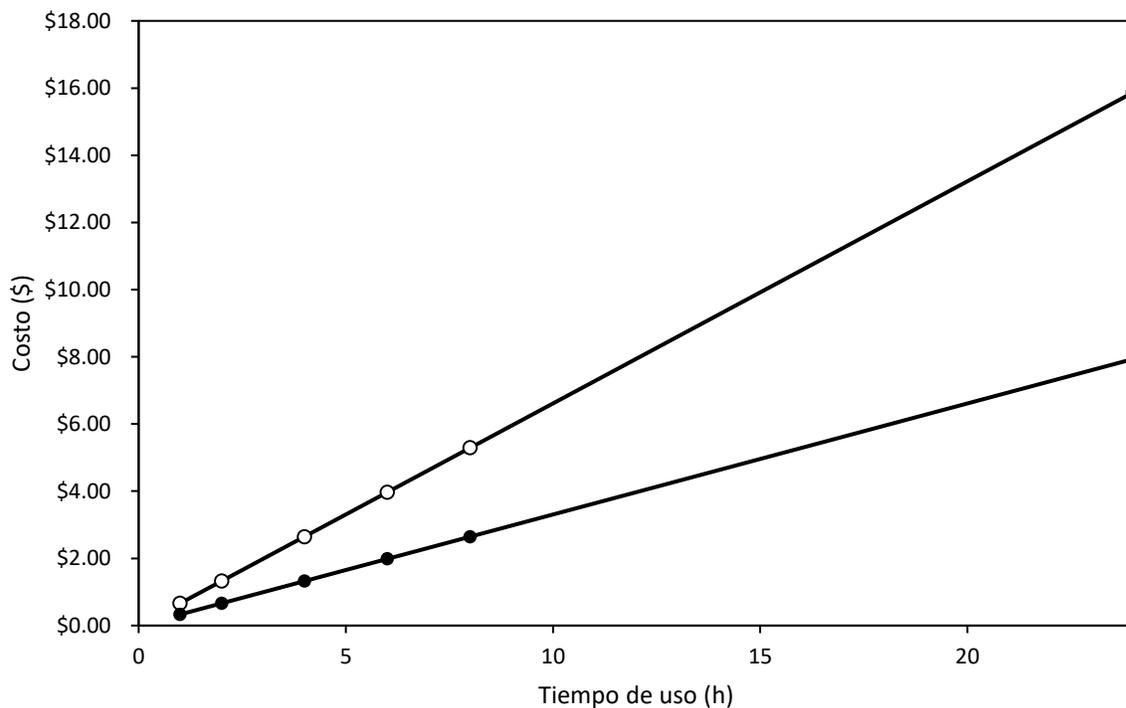


Figura 2.110. Costo de ventilación mecánica con base en el tiempo de uso para un día. Periodo nocturno (●) y Periodo diurno (○).

Una forma de calcular los costos de ventilación forzada es considerando el número de días con temperaturas superiores a 30 °C, ya que en estas condiciones es necesario hacer uso de la ventilación forzada para descender la temperatura interna del invernadero. En la **Figura 2.111** se muestran los costos calculados para el uso de tres ventiladores durante 8 horas en los municipios

de San Luis Potosí que presentaron días por arriba de 30 °C. El costo del uso de 8 horas de actividad de los ventiladores es de \$5.29. En los municipios con mayor número de días por debajo de 30 °C (El coco, San José de Limón, Santa Elena) los costos pueden ser superiores a los \$200 por el uso de 8 horas de ventilación forzada durante todos los días calurosos del año. El aumento en el número de horas de ventilación forzada, así como del número de ventiladores implica un aumento en el costo.

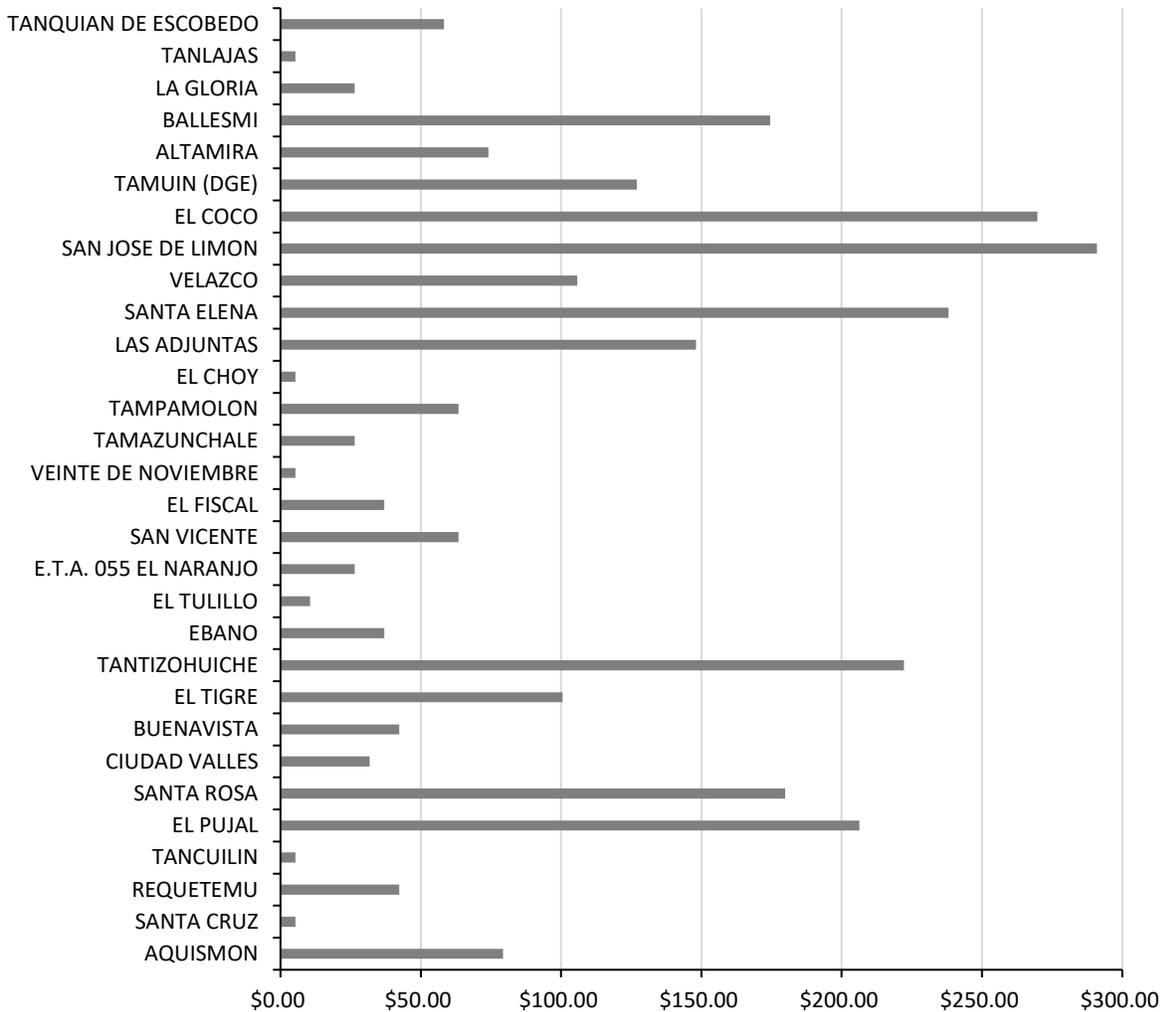


Figura 2.111. Costos de uso de ventilación forzada en municipios de San Luis Potosí.

Fuente: Elaboración propia

Los costos de ventilación forzada en el Estado de México (**Figura 2.112**) son generalmente inferiores a los del estado de San Luis Potosí, a excepción de la estación Bejucos, en la que pueden ser superiores a los \$600. La estación Bejucos se encuentra ubicada en el sur del Estado de México, donde las temperaturas son altas durante gran parte del año. También es notable que el número de municipios donde es necesario implementar la ventilación forzada es menor en el

Estado de México que en San Luis Potosí, esto debido a que solamente en el sur del Estado de México se presentan altas temperaturas, mientras que, en San Luis Potosí, los lugares con temperaturas altas abarcan principalmente el centro y sur del estado.

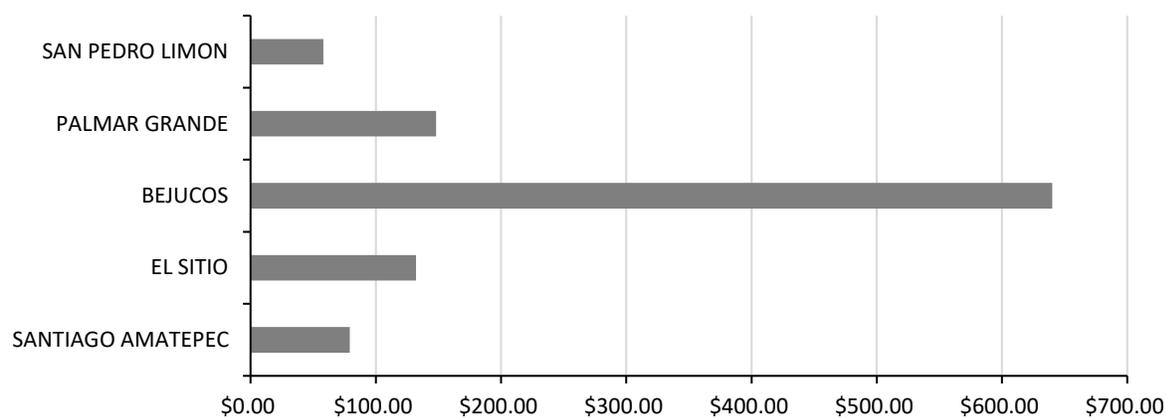


Figura 2.112. Costos de uso de ventilación forzada en municipios del Estado de México.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3. PRESENTACIÓN Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Diagnóstico de la Agricultura protegida

##### 3.1.1. Condiciones templadas (Estado de México)

Las condiciones climatológicas de las regiones productoras en agricultura protegida son muy variadas, si las condiciones se asemejan a las requeridas por los cultivos manejados el costo de climatización y manejo será menor. La construcción de invernaderos adecuados a cada región con las condiciones naturales de cada lugar favorece el aprovechamiento de las ventajas climatológicas para adaptarse y aprovechar los beneficios. En lugares templados y fríos se requiere aumentar la temperatura interna del invernadero, principalmente durante las noches. En estos casos se ha implementado el uso de doble capa a la altura del canal para establecer una capa térmica entre el ambiente interno y el exterior del invernadero. Esto permite amortiguar los cambios de temperatura, debido al calentamiento de un menor volumen (Bastida, 2006).

En regiones frías, se explota el efecto invernadero que ejerce el aire junto con el material (Vidrio, polietileno, policarbonato, etc.) que conforma la cubierta aislante de estas estructuras, el hermetismo a la salida de energía (longitudes de onda entre 5,000 a 35,000 nm) promueve el calentamiento gradual a lo largo del día, primero de las capas de aire superiores y progresivamente de las inferiores, ante la falta de movimiento del aire por convección en el interior. Un principio básico característico de los invernaderos es su aislamiento termodinámico que restringe la convección y la conducción térmica para equilibrar la temperatura del interior con la ganancia térmica y así propiciar un ambiente cálido para el crecimiento de plantas bajo condiciones de frío (Bustamante-Orañegui, Vázquez-Alvarado, Trujillo-Campos, Reyes-Reyes, & Escalona-Flores, 2013).

##### 3.1.2. Condiciones semiáridas (San Luis Potosí)

En zonas de clima cálido se requiere la construcción de invernaderos altos para una mejor aireación. Además, debe ponerse atención en la resistencia de la estructura al embate de los vientos (Bastida, 2006).

Las condiciones climáticas adversas son uno de los principales problemas que limitan la producción de jitomate en el estado de San Luis Potosí. El conjunto de este y otros factores generan bajos rendimientos y como consecuencia una rentabilidad limitada. Por tal motivo se han desarrollado variedades híbridas con alto potencial de rendimiento y adaptabilidad a las condiciones climáticas del estado de San Luis Potosí (Ficha tecnológica SAGARPA-INIFAP).

La mayoría de las estructuras establecidas para el cultivo de jitomate modifican el clima interno por medios pasivos y se han construido con fundamentos propios de invernaderos y Bioespacios intentando, sin conseguirlo, romper el aislamiento termodinámico y conservar el hermetismo hacia patógenos e insectos mediante la sustitución de la cubierta periférica y la de las ventilas

cenitales, con mallas antiáfidos, cuya trama muy cerrada, obstaculiza la convección aumentando en consecuencia la temperatura. En la estación cálida, este aumento térmico incrementa las condiciones de estrés y susceptibilidad de la planta a patógenos e insectos que en estas condiciones ineludiblemente penetran al interior de la estructura, como las cenicillas, la mosquita blanca, trips y en menor escala algunas especies de ácaros (Bustamante-Orañegui et al., 2013).

### 3.2. Documentos técnicos

Se elaboró el artículo:

**Characterization of Rainwater Utilization Potential in Mexico's Protected Agriculture**  
Gómez L. Luis<sup>1</sup>, Ojeda B. Waldo<sup>1</sup>, Flores V. Jorge<sup>1</sup> y García V. Nahún H.<sup>1</sup>  
(1) Mexican Institute of Water Technology, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Mor.  
(777) 3293600  
lgomez@tlaloc.imta.mx, wojeda@tlaloc.imta.mx, jorge\_flores@tlaloc.imta.mx, and  
nahung@tlaloc.imta.mx

#### **Abstract**

Securing water for irrigation sustainably is a prime challenge for Mexican agriculture, since this activity consumes 77% of the volume allocated for the different uses of water in the country. In this sustainability exercise, the National Water Plan (2014–2018) seeks strategically to improve water productivity in agriculture by relying in the technification of irrigation systems and in the advancement of surface water storage infrastructure.

In the particular context of the security and increase of water productivity in productive systems, in this paper we limited our scope to the utilization potential of rainwater in Mexico's protected agriculture. Currently there is no region-, state- or nationwide information on this utilization potential. In regions where supply sources for irrigation are limited, protected agriculture can also be limited; such is the case of the arid and semiarid zones of Mexico.

Protected agriculture is a closed productive system covered with plastic canopies and meshes that enable adequate conditions for optimal crop development, allowing to control climate variables and to apply very efficient irrigation systems. However, in general, the water supply for these systems comes from deep or shallow wells, with negative impacts that alarmingly contribute to the process of aquifer overexploitation in Mexico. According to SAGARPA reports, in the year 2015, this type of agriculture covered 23,251 hectares, including 12,000 hectares of greenhouses; an important area of opportunity to be explored.

This paper presents the potential of protected agriculture in Mexico for utilizing rainwater as the main supply source for irrigation. In the process, water from rainfall can be collected on the roofs of productive systems and conducted through gutters and pipes to a storage for its later use in crop irrigation. This link of water supply source with the efficient utilization of spaces enables the determination, from precipitation data recorded in climatological stations defined by region and space, of rainwater volumes potentially collected according to the characteristics, typology, and size of the roofed structures of protected agriculture. With these values of harvested water volumes it is possible to analyze scenarios of rainwater utilization considering different values of consumptive uses, land areas, and number of cultivation cycles. All of this is fully developed and presented in the paper.

**Keywords:** Water productivity, Protected agriculture, Rainwater harvesting, Volumes of water abstracted and irrigation.

Figura 3.1. Resumen artículo presentado y publicado en el 23 Congreso Internacional ICID, CDMX, México.

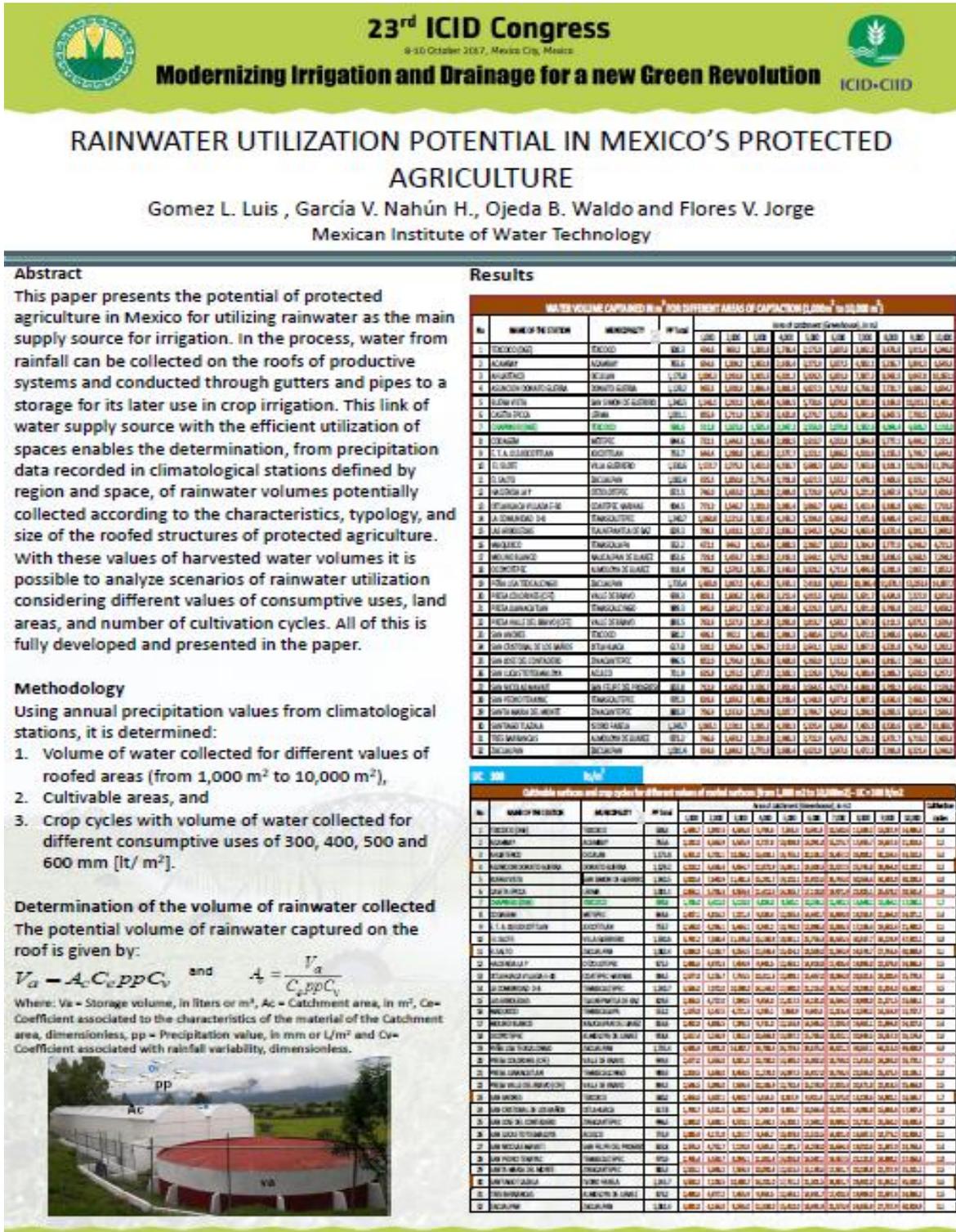


Figura 3.2. Presentación artículo 23 Congreso Internacional ICID, México.



## 23<sup>rd</sup> International Congress on Irrigation and Drainage

8-14 October 2017, Mexico City, Mexico

**Modernizing Irrigation and Drainage for a New Green Revolution**

**La Modernisation de l'irrigation et du Drainage pour une Nouvelle Révolution Verte**



**Transactions**  
Question 60 and 61



INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE  
COMMISSION INTERNATIONALE DES IRRIGATIONS ET DU DRAINAGE

Figura 3.3. Publicación artículo 23 Congreso Internacional ICID, México. - ISBN: 978-81-89610-24-1

23 <sup>rd</sup> ICID Congress, Mexico City, 2017		Q.60.3 – Contents
R.60.3.15	<b>A Critical Analysis of the Historic Water Apportionment Accord among Four Provinces of Pakistan</b> Une Analyse Critique de L'accord de Répartition Historique de l'eau entre les Quatre Provinces du Pakistan <i>Asjad Imtiaz Ali, Javeed Iqbal Bokhary, Ahmed Kamal, and Qazi Tallat M. Siddiqui (Pakistan)</i>	222
R.60.3.16	<b>Perspectives of irrigation with unconventional water resources in China</b> Perspectives de l'irrigation avec des ressources en eau non conventionnelles en Chine <i>Wenyong Wu, Yaqi Hu, and Renkuan Liao (China)</i>	224
R.60.3.17	<b>Hydrological Drought Variation along the Yom River, Thailand</b> Variation de la Sécheresse Hydrologique le long de La Rivière Yom, Thaïlande <i>Kanokporn Sawatpru, and Supasit Konyai (Thailand)</i>	226
R.60.3.18	<b>Irrigation Intensity, Environmental Conditions and Crop Production in the Rio Grande-Bravo Basin (Mexico)</b> Intensité de l'irrigation, conditions environnementales et organisation de la production de cultures dans le bassin rio grande-bravo (Mexique) <i>Nicholas P. Sisto, and Sergei Severinov (Mexico)</i>	228
R.60.3.19	<b>Water Security and Land-Use Changes in Small-Scale Hydro-Agricultural Infrastructure</b> Sécurité de l'eau et Changements d'affectation des Terres dans les Infrastructures Hydro Agricoles a Petite Echelle <i>Mauro Íñiguez-Covarubias, Waldo Ojeda-Bustamant, and Sergio Iván Jiménez-Jiménez (Mexico)</i>	229
R.60.3.20	<b>Irrigation Water Security Indicators at the River Basin Level in the Northern Part of West Java</b> Indicateurs de sécurité de l'eau d'irrigation au niveau de la baie de la rivière dans la partie nord de west java <i>Waluyo Hatmoko, and Radhika Andrendy Firmansyah (Indonesia)</i>	231
R.60.3.21	<b>Rainwater Utilization Potential in Mexico's Protected Agriculture</b> Caractérisation du potentiel d'utilisation de l'eau de pluie dans l'agriculture protégée du Mexique. <i>Gómez L. Luis, García V. Nahún H, Ojeda B. Waldo, and Flores V. Jorge (Mexico)</i>	232
R.60.3.22	<b>A Simulation Model for Water Level Management in the Reclaimed Tidal Peatswamp</b> Modèle De Simulation pour la Gestion du Niveau d'eau dans les Tourbières a Maree Récupérées <i>Aswandi, Robiyanto H. Susanto, Andi Sudirman, and M. R. Abdillah (Indonesia)</i>	234

Figura 3.4. Publicación artículo 23 Congreso Internacional ICID, México. –pág. 232

#### 4. REFERENCIAS

- Abdelhafeez, A. T., Harssema, H., Veri, G., & Verkerk, K. (1971). Effects of soil and air temperature, on growth development and water use for tomatoes. *Neth J. Agric.Sci.*, 19(67-75).
- Abramowitz, M., & Stegun, I. (1972). Handbook of mathematical function. Dover. New York, USA. pp 299.
- Aladenola O. y Madramootoo C., 2014. Response of greenhouse-grown bell pepper (*Capsicum annum* L.) to variable irrigation, Canadian Journal of Plant Science, vol. 94, pp.303-310.
- Alarcón, A. L., & Egea, C. (2000). Consumos hídricos en cultivos hortícolas sin suelo bajo invernadero. *Horticultura*, 145, 16-23.
- AMHPAC. (2013). SIAP/SAGARPA, 2016; AMHPAC, 2016.Consultado el 07 de julio de 2017. <http://www.amhpac.org/es/index.php/homepage/agricultura-protegida-en-mexico>
- Armendáriz-Erives, S. (2007). Desafíos y riesgos agrícolas ante el calentamiento global. En Oportunidades y retos de la Ingeniería Agrícola ante la globalización y el cambio climático. UACH-URUZA. Pp. 73-79.
- ASHRAE. (1993). Infiltration and ventilation. ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, GA, EE.UU.
- Atherton, J. G., & Rudich, J. (1986). *The tomato crop*. London, New York: Chapman and Hall.
- Bakker, J. (1995). *Greenhouse climate control: an integrated approach*: Wageningen Academic Pub.
- Bakker, J. C. (1990). Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill. *Journal of Horticultural Science*, 65(323:331).
- Bastida, A. (2006). Manejo y operación de invernaderos agrícolas. *México: Serie de Publicaciones Agribot*.
- Bastida T., A. (2008). Panorama General de la Horticultura Protegida en México y su Tendencia Futura. Módulo II. Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos. Segundo Curso de Especialización en Horticultura Protegida. UACH. Departamento de Fitotecnia. 2008-2009.
- Brito, L. T. L., Silva, A. d. S., Porto, E. R., Amorim, M. C. C., & Leite, W. d. M. (2007). Cisternas domiciliarias: água para consumo humano. In: BRITO, Luiza T. L.; MOURA, Magna S. B. de; GAMA, Gislene F. B. (Eds.). Potencialidades da água de chuva no semi-árido brasileiro. EMBRAPA Semiárido, Petrolina, p. 79-101.
- Brouwer, C., & Heibloem, M. (1986). *Irrigation water needs*. Rome [etc.]: FAO [etc.].
- Brun, R., & Lagier, J. (1984). Etude d'un nouveau type d'abri mieux adapté au climat méditerranéen. P.H.M. 245: 25 - 32.
- Buozo, A. C., & Gariglio, F. N. (2009). *Tipos de invernaderos*. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina.
- Bustamante-Orañegui, J. d. D., Vázquez-Alvarado, J. M. P., Trujillo-Campos, A., Reyes-Reyes, J., & Escalona-Flores, O. (2013). *MANUAL PARA EL CULTIVO DEL JITOMATE EN BIOESPACIO E INVERNADERO*: SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERIA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS.  
Cajamar. (2005). *Dosis de riego para los cultivos hortícolas bajo invernadero en Almería. Estación experimental cajamar* (2a ed.).
- Calvert, A. (1973). Environmental responses. In H. G. Kingham (Ed.), *The U.K. tomato manual* (pp. 23-24): Grower books, London.
- CENTA. (2003). Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. Km. 33 1/2, carretera a Santa Ana, Ciudad Arce, La Libertad, El Salvador. Apartado Postal 885 San Salvador, El Salvador Teléfono: 338-4266.
- Cockshull, K. E. (1988). The integration of plant physiology with physical changes in greenhouse climate. *Acta Horticulturae*, 229, 113-123.
- Coleman, W. K., & Greyson, R. I. (1976). The growth and development of the leaf in tomato (*Lycopersicon esculentum*). II. Leaf ontogeny. *Can. J. Bot.*, 54: 2421-2428. .
- CONAGUA. (2017). Información Climatológica. Retrieved 15-08-2017 <http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42>
- Cooter, D. J., & Walker, J. N. (1967). *Ocurrences and biological effects of humidity in greenhouses*. Paper presented at the Proc.17th. Int. Hort. Congr.
- Critchley, W., Siegert, K., Chapman, C., & Finkel, M. (1996). Handbook on the catchment and utilization of rainwater. Vol. 1: technical bases and experiences in Africa and Asia. *Serie: Zonas Aridas y Semiaridas (FAO/PNUMA)*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hidrology. New York: McGraw-Hill.
- De Anda José y Hervey Shear. 2017. La agricultura protegida en México. Tecno Agro: Avances tecnológicos y agrícolas. No 117. 07 de junio de 217. Disponible en: <https://tecnoagro.com.mx/revista/2017/no-117/la-agricultura-protegida-en-mexico/>
- Díaz, P. G., Guajardo, P. R. A., Medina, G. G., Sánchez, C. I., Soria, R. J., Vázquez, A. M. P., & Ariel, R. C. J. (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. INIFAP. Publicación especial, (8).
- FAO. (1985). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Directivas: evaluación de tierras para la agricultura en secano. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas. Boletín de suelos de la FAO No. 52. Roma, Italia.
- FAO. (1990). Report on the expert consultation of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Land & Water Development Division. Roma. 37 p.
- FAO. (1997). (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Zonificación agroecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. FAO. Roma, Italia. 82 p.
- FAO. (2013). *CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. Pag. 65.*
- Flores-Velázquez, J. (2005). *Consideraciones ambientales para cultivar tomate (Lycopersicon Esculentum Mill) en invernadero: Caracterización climática, requerimientos de riego y modelación de temperatura.* (Maestro en Ciencias), Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
- Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 127-134.

- Greyson, R. I., & Sawhney, V. K. (1972). Initiation and early growth of flower organs of *Nigella* and *Lycopersicon*: insights from allometry. *Bot. Gaz.*, 133, 184-190.
- Haan, C. T. (1979). Risk analysis in environmental modifications. In B. J. Barfield & J. F. Gerber (Eds.), *Modification of the Aerial Environment of Crops* (pp. 30–51). St Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineering (ASAE).
- Hanan, J. J. (1990). The influence of greenhouse on internal climate with special reference to mediterranean regions. *Acta Hort*, 287, 23-34.
- Herrera-Alanís, J. L. (2012). Análisis de las olas de calor en la República Mexicana. D. F., México: UNAM.
- Horticultivos. (2017). Principales tipos de invernaderos. Retrieved from <https://www.horticultivos.com/5577/principales-tipos-invernaderos/>
- Hurd, R. G., & Sheard, G. F. (1981). *Fuel saving in greenhouses; the biological aspect*. London.
- Iglesias, N. (2015). *Tomate en invernadero: Estudios referidos a aspectos de ecofisiología de la producción forzada para las condiciones del norte de la Patagonia*. Argentina: INTA. EEA Alto Valle.
- IMTA. (2013). Eric III 2.0. Morelos, México.
- INEGI. (2017). Referencias geográficas y extensión territorial de México. Retrieved from [http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/1-geografiademexico/man\\_refgeog\\_extterr\\_vs\\_enero\\_30\\_2088.pdf](http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/1-geografiademexico/man_refgeog_extterr_vs_enero_30_2088.pdf)
- Infoagro. (2017). CONTROL CLIMÁTICO EN INVERNADEROS. Retrieved from [http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico.htm](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm)
- INIFAP. (2008). Uso de estaciones meteorológicas en la agricultura. Folleto informativo No. 50.
- INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2003. Boletín Bibliográfico. Climatización de invernaderos. *India XXI* 3(4):155-158.
- Íñiguez-Covarrubias, M., Ojeda-Bustamante, W., Díaz-Delgado, C., & Sifuentes-Ibarra, E. (2014). Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 101-114.
- Jensen, M. (2004). Agricultura en ambientes controlados en desiertos, trópicos, y regiones templadas – una revisión mundial. En notas del curso internacional de invernaderos. PUIMECI. Universidad A. Chapingo. Chapingo, México.
- Jiménez-Espinosa, M., Monroy Cruz, V., & Cordero-Devesa, D. A. (2017). *METODOLOGÍA PARA ELABORAR MAPAS DE RIESGO POR TEMPERATURAS MÁXIMAS (2ª ETAPA ONDAS DE CALOR): SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL. CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES*.
- Jiménez Espinosa, M., Baeza Ramírez, C., Matías Ramírez, G. L., & Eslava Morales, H. (2012). *MAPAS DE ÍNDICES DE RIESGO A ESCALA MUNICIPAL POR FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS*. México: CENAPRED.
- Jiménez Espinosa, M., Matías Ramírez, L. G., & Eslava Morales, H. (2009). *Mapas de riesgo a escala municipal por inundaciones y bajas temperaturas*. México, D. F. CENAPRED.
- Jones, J. W., Kenig, A., & Vallejos, C. E. (1999). Reduced state–variable tomato growth model. 42, 255-265.

- Juárez-López, P., Bugarín-Montoya, R., Castro-Brindis, R., Sánchez-Monteón, A. L., Cruz-Crespo, E., & Balois-Morales, R. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente Año*, 3(8).
- Kinet, J. M. (1989). Environmental and chemical controls of flower development. In F. Lord & G. Bernier (Eds.), *Plant Reproduction: from Floral induction to Pollination* (Vol. 1, pp. 95-105). Rockville, MD: American Society of Plant Physiologists Symposium Series.
- Körner, O., & Challa, H. (2003). Design for an improved temperature integration concept in greenhouse cultivation. *Computer and Electronics in Agr*, 39, 39-59.
- Leal-Iga, J. (2015). Factibilidad en sustentabilidad hídrica para invernaderos en Aramberri, Nuevo León. *CIENCIA UANL*, 18(74), 62-66.
- López-Gálvez, J., & López Hernández, J. C. (1991). *El clima se genera en el interior de los invernaderos*: FIAPA.
- López, J. C., Lorenzo, P., Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M. C., Pérez, J., Puerto, H. M., & Arco, M. (2000). Calefacción de invernaderos en el sudeste español: resultados experimentales para cultivos de pepino y judía. Caja Rural de Almería. Almería, España. 54 pp.
- Lorenzo, P. (1994). *Intercepción de luz, bioproductividad e intercambio gaseoso durante la ontogenia de un cultivo invernal de Cucumis sativus en Almería*. (Doctor), Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Lorenzo, P., Maroto, C., & Castilla, N. (1990). CO<sub>2</sub> in plastic greenhouse in Almeria (Spain). *Acta horticulturae*(268), 165-169.
- Martínez-García, R. A. (2013). *Mejoramiento del desempeño hidrodinámico de un digestor anaeróbico de laguna cubierta mediante CFD*. (Tesis de Maestría), Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.
- Miguel, A., Van de Braak, N., & Bot, G. (1997). Analysis of the airflow characteristics of greenhouse screening materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(2), 105-112.
- Monteith, J. L. (1973). Principles of Environmental Physics. *Edward Arnold*, 241 p.
- Moreno Reséndez, A., Aguilar Durón, J., & Luévano González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15(29).
- National Academy of Sciences. 1975. Understanding Climatic Change. p. 18.
- Navarro-Urbina, E. (2011). *PRODUCCIÓN DE TOMATE SALADETTE (Lycopersicum esculentum Mill.) BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO EN UNA UNIDAD DE PRODUCCIÓN CHAPARROSA, DE VILLA DE COS, ZACATECAS*. (Licenciatura), UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, 98(12), 2386-2414. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- Ojeda-Bustamante, W. (2004). Programación del riego bajo condiciones de invernadero. En notas del curso internacional de invernaderos. PUIMECI. Universidad A. Chapingo. Chapingo, México.

- Ojeda, W., Iñiguez, M., Sifuentes, E., Ontiveros, R., & López, B. (2012). Identificación de un portafolio de medidas de adaptación al cambio climático para el sector agrícola, mediante la evaluación del riesgo actual y el proyectado a 2030. RFQ-104-2011. Informe final. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 319 p.
- Reglamento Técnico. Documentos Fundamentales N° 2, (2008).
- OMM. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*.
- Ortiz, S. C. (1987). Evaluación de la aptitud de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo en condiciones de temporal. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México.
- Ould-Khaoua, S. A., Bournet, P. E., Migeon, C., Boulard, T., & Chasseriaux, G. (2006). Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosystem Eng.*, 95, 83-98.
- Picken, A. J. F., Stewart, K., & Klapwijk, D. (1986). Germination and vegetative development. In J. C. R. Atherton, J. (Eds.). (Ed.), *The Tomato Crop* (pp. 111-165). New York: Chapman and Hall Ltd.
- Ponce-Cruz, P. (2017). Producción de tomates en invernadero en México. Retrieved from <http://www.hortalizas.com>
- Prenger, J. J., & Ling, P. P. (2001). Greenhouse Condensation Control: Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD). Fact Sheet AEX-804-01. Ohio State University Extension, Columbus, OH. USA.
- Qiu R.; Songa J.; Dua T.; Kanga S.; Tonga L.; Chena R. y Wub L. 2013. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China, *Agricultural Water Management*, vol.130, pp.44– 51.
- Rodríguez-Díaz, F. (2002). Modelación y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. Almería España.
- Romo, G. J., & Arteaga, R. R. (1983). *Meteorología Agrícola*. Chapingo, Méx.: Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de IRRIGACION.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. I., & Verma, S. B. (1983). *Microclimate. The Biological Environment* (2ª ed.): John Wiley & Sons.
- Ruiz, C. J. A., Medina, G., González, A., Ortiz, T., Flores, L., Martínez, P., & Byerly, M. (1999). Requerimientos Agroecológicos de Cultivos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. Libro Técnico Núm. 3. Guadalajara, Jalisco., México.
- SAGARPA-INIFAP. FICHA TECNOLÓGICA POR SISTEMA PRODUCTO. JITOMATE. UTILIZACIÓN DE HÍBRIDOS DE JITOMATE CON ALTO POTENCIAL DE RENDIMIENTO PARA INVERNADERO EN SAN LUIS POTOSÍ.
- Sánchez-Salazar, M. T., & Martínez-Galicia, M. (2006). La vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos Ante el cambio climático global. Instituto de Geografía. UNAM.
- Seeman, J., Chirkov, I., Lomas, J., & Primault, B. (1979). *Agrometeorology*. Berlin.
- Segerer, C. D., & Villodas, E. R. (2006). HIDROLOGIA I. *Universidad Nacional de Cuyo, Argentina*.
- SIAP-SAGARPA. (2017). Boletín mensual de la producción. Tomate rojo (Jitomate).

- SIAP. (2017a). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Retrieved from [http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap\\_gb/icultivo/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp)
- SIAP. (2017b). *Aptitud agroclimática de México*. México.
- SIAP. (2017c). Superficie Agrícola Protegida. from SAGARPA [http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/superficie\\_agricola\\_protegida.aspx](http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/superficie_agricola_protegida.aspx)
- Sotelo, R. E. D., González, A. H., Cruz, G. B., Martínez, A. A. M., & Flores, R. L. (2012). Determinación del potencial productivo en cultivos prioritarios en el Estado de México. INIFAP. Libro técnico.
- Tamayo, J. L. (1993). Geografía moderna de México. México. Trillas.
- Turrent, F. A. (2009). El potencial productivo del maíz. *Ciencias* 92-93:126-129.
- Van de Vooren, J. G., Wellws, W. H., & Hayman, G. (1986). Glasshouse crop production. In J. G. Atherthon, Rudich, J. (Ed.), *The tomato crop* (pp. 581-623). London: Chapman and Hall.
- Varga, A., & Bruinsma, J. (1986). Tomato. In C. R. C. P. Inc. (Ed.), *Monselise, S.P. (De). Fruit set and development*. Boca Raton, Florida.
- Vega-García, M. (2015). *EVALUACIÓN DEL MICROCLIMA DE UN INVERNADERO CENITAL TÍPICO DE 3 NAVES USANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)*. (Licenciatura), UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, Chapingo, México.
- Vidal, R. (2007). Frecuencia de heladas, Carta NA-XIV-6, Naturaleza. Escala 1:16,000,000 *Nuevo Atlas Nacional de México*.
- Winspear, K. W., Postlethwaite, J. D., & Cotton, R. F. (1970). The restriction of Cladosporium and Botrytis cinerea, attacking glasshouse tomatoes by automatic humidity control. *Ann. Appl. Biol.*, 65, 75-83.
- Zamudio-González, B., & Flores-López, R. PRODUCCIÓN DE JITOMATE BAJO INVERNADERO E HIDROPONÍA: Mercado, biología, requerimientos agroclimáticos, suelos-sustratos, plantación, podas, conducción, polinización, nutrición, fertirriego manejo integrado de plagas y enfermedades y cosecha.