



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“INVERNADERO GEOTÉRMICO DE BAJA
ENTALPIA PARA CULTIVO DE JITOMATES”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

ANDREA JASSO RIVERA

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. Mx., 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



JURADO ASIGNADO

Presidente: Ing. Agustín Nieves Saavedra

Vocal: M. I. Héctor Miguel Aviña Jiménez

Secretario: Dr. Rogelio Soto Ayala

Primer Suplente: Dr. William Vicente y Rodríguez

Segundo Suplente: Dr. Rafael Chávez Martínez

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

En primer lugar le quiero agradecerle a una gran dama que es mi madre, Juana Rivera Ruiz, sinónimo de fortaleza que pocas veces se doblega, ejemplo a seguir pues has pasado gran parte de tu vida sacrificándote para que yo tuviera una vida llena de luz y sin alejarme de la realidad; y aunque pocas veces te lo digo te amo mamá con todo mi ser y más, sin tu ayuda el seguir con mis estudios hubiera sido sólo un sueño y no una realidad tangible.

A mi padre, Juan Pablo Jasso, que hace mucho tiempo dejó este mundo terrenal pero que siempre está conmigo como un ángel que cuida y guía mis pasos, que me enseñó que en este mundo: “Nada es cosa de suerte, que la suerte es para los tontos al no haberse preparado para enfrentar lo que se les ponga enfrente”, que todo se puede lograr con trabajo duro, esfuerzo constancia y que nada es gratis en esta vida; que nada ni nadie nos puede detener más que nosotros mismos con temores absurdos y que no importa cuántas veces toquemos fondo lo de vital importancia es ser capaces de levantarnos más fuertes y con más hambre de triunfar.

Gracias hermanos, Brenda, Claudia Daniela y Juan Pablo que desde siempre me alegran el día y se preocupan de maneras distintas por mí y me traen de vuelta a la realidad cuando pierdo el piso y me quieren tal cual soy de manera incondicional. A mis hermanas de vida, Nidia y Jocelin, que siempre tienen algo nuevo que enseñarme y siempre me motivan a ser mejor, que me escuchan y acompañan cuando ni con migo misma estoy en paz y con quienes estoy segura aún nos quedan muchas historias por vivir.

De manera muy especial a ti, Eduardo Pérez González, que eres mi amigo, mi colega, mi hermano, mi terapeuta, y mi jefe chulo, eres un ser muy importante para mí que llego a mi vida cuando menos lo esperaba y como tú dices un poder supremo entrelazo nuestros caminos, pero por elección propia nos hicimos inseparables, me has acompañado y cuidando. Y si bien es codicioso de mi parte espero seguir navegando esta travesía en tu compañía Vicealmirante del Golfo de México.

Al grupo iiDEA liderado por Héctor Aviña, por confiar en mí y darme la oportunidad de desarrollar este proyecto sin más garantías que ideas directas y sin experiencia, a los chic@s iiDEA: Víctor, Misael, Roberto, Alfredo, Gerardo, Ricardo, Pablo, Maricela, Luis, Bairon, Rodrigo, Cesar, Daniel, Anaid, Miguel Ángel, Pedro, que siempre me sacan una sonrisa. Y a ti ojitos por ponerle sal, pimienta y mucha aventura a mi vida.

RESUMEN

Del consumo energético mundial, cerca del 86% proviene de la quema de combustibles fósiles (carbón y petróleo), sin embargo esa generación de energía contamina el aire y emite gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento de la Tierra y a cambios climáticos.

Debido a la incierta existencia futura de reservas fósiles y el creciente deterioro terrestre, se ha optado por incrementar la explotación de energías renovables, como son la energía hidráulica, biomasa y biocombustibles en general, energía solar, eólica y la energía geotérmica, así como la creación de nuevas políticas energéticas, las cuales tienen como principal objetivo el disminuir las emisiones contaminantes liberadas al ambiente.

Siendo la energía geotérmica donde centraremos nuestro principal interés, pues si bien no es una energía nueva, al ser utilizada desde hace siglos por diferentes culturas para su beneficio, desde aplicaciones sencillas y caseras, hasta otras muy sofisticadas, como la minería, sigue siendo una energía con un gran potencial, no solamente como un recurso para la generación de energía eléctrica, sino también para usos directos, los cuales en nuestro país comienzan a dar apertura al desarrollo de la industria agroalimentaria principalmente con plantas desaladoras, deshidratado de alimentos e invernaderos. Se generarán proyectos que pueden ser integrales haciéndolos sustentables, sostenibles e indirectamente haciendo a los productores más competitivos a nivel mundial.

Entre sus principales ventajas se encuentran en que es una energía duradera con un flujo constante ya que no está en función de la irradiación ni de las condiciones climáticas, baja emisión de contaminantes, disponible en gran parte del mundo justo debajo de nuestros pies, es decir, al interior de la corteza terrestre.

Pero no todo son ventajas, debido a que la energía geotérmica se encuentra en el interior de la tierra, es necesario el uso de técnicas tanto eficientes como económicas para la explotación de dicho recurso.

En conclusión, la energía geotérmica es una solución viable para disminuir la dependencia energética de los combustibles fósiles, capaz de competir con las energías existentes que están en vías de desarrollo, pues aún tienen un largo camino por recorrer, aun se tiene el reto de la implementación de métodos amigables con el medio ambiente.

OBJETIVOS

GENERAL:

Diseñar un invernadero que aproveche la energía térmica del subsuelo, presente en la ciudad de Mexicali, la cuál será utilizada tanto en el sistema de refrigeración, calefacción y riego con el fin de brindar las condiciones óptimas para el cultivo de jitomates.

PARTICULAR:

- ❖ Mostrar un panorama general de la energía geotérmica disponible en México así como sus diversas aplicaciones y usos directos.
- ❖ Definir y analizar los requerimientos necesarios para la implementación de un invernadero, de igual modo determinar las condiciones óptimas para el cultivo de jitomate y los sistemas que serán necesarios implementar.
- ❖ Cuantificar la cantidad de energía necesaria para mantener un cultivo de jitomate en óptimas condiciones durante todo el año, considerando el clima en la ciudad de Mexicali.
- ❖ Generar una aproximación de la temperatura del recurso geotérmico requerido para climatizar el invernadero.

ÍNDICE

JURADO ASIGNADO.....	2
AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS	3
RESUMEN	4
OBJETIVOS.....	5
ÍNDICE	6
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS Y GRÁFICOS	11
NOMENCLATURA	13
CAPÍTULO 1. ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	19
1.1 DEFINICIÓN.....	19
1.2 ESTRUCTURA DE LA TIERRA	19
1.2.1 MODELO DE BULLARD.....	20
1.2.2 GRADIENTE Y FLUJO GEOTÉRMICO	21
1.2.3 TECTÓNICA DE PLACAS	22
1.3 BREVE HISTORIA.....	23
1.4 CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	28
1.4.1 RECURSOS GEOTÉRMICOS.....	28
1.5 USOS DIRECTOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	34
1.5.1 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.....	34
1.5.2 USOS TÉRMICOS.....	35
1.6 GEOTERMIA EN MÉXICO.....	42
CONCLUSIONES.....	44
CAPÍTULO 2. INVERNADEROS	45
2.1 INTRODUCCIÓN	45
2.2 BREVE HISTORIA.....	46
2.3 AGRICULTURA PROTEGIDA	50
2.4 TIPOS DE INVERNADEROS	51
2.4.1 INVERNADERO CASA SOMBRA.....	52
2.4.2 INVERNADERO TIPO TÚNEL.....	52
2.4.3 INVERNADERO TIPO CAPILLA	53
2.4.4 INVERNADERO GÓTICO	54
2.4.5 INVERNADERO ASIMÉTRICO.....	55

2.4.6 INVERNADERO TIPO VENLO	56
2.5 PARÁMETROS DE CULTIVO Y DISEÑO DE INVERNADEROS	57
2.5.1 TIPO DE CULTIVO	57
2.5.2 TEMPERATURA.....	58
2.5.3 RADIACIÓN SOLAR	59
2.5.4 HUMEDAD.....	60
2.5.5 VENTILACIÓN	60
2.5.6 CALIDAD CULTIVO	62
2.6 INVERNADEROS EN MÉXICO Y SU POTENCIAL	63
2.7 SELECCIÓN DE CULTIVO.....	67
2.7.1 JITOMATE	69
2.8 CULTIVO DE JITOMATE CARACTERÍSTICAS Y NECESIDADES	70
2.8.1 PARÁMETROS CLIMÁTICOS.....	70
2.8.2 PARÁMETROS DE NUTRICIÓN Y RIEGO	71
2.8.3 VARIEDADES CONOCIDAS	75
2.8.4 PRINCIPALES PLAGAS Y ENFERMEDADES DEL CULTIVO DE JITOMATE.....	75
2.9 CONSUMO DE JITOMATE A NIVEL MUNDIAL.....	77
2.9.1 TOMATE FRESCO.....	77
2.9.2 TOMATE INDUSTRIALIZADO.....	78
CONCLUSIONES.....	81
CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE DISEÑO DE INVERNADERO IIDEA	82
3.1 DATOS OPERATIVOS.....	82
3.1.1 TEMPERATURAS REQUERIDAS	82
3.1.2 ÁREA DEL INVERNADERO Y DISTRIBUCIÓN DE CULTIVOS.....	83
3.1.3 TIPO DE CUBIERTA PLÁSTICA	84
3.1.4 TIPO DE SUELO Y MARCO DE PLANTACIÓN.....	87
3.1.5 RADIACIÓN SOLAR	88
3.1.6 VENTILACIÓN	89
3.1.7 RIEGO	90
3.1.8 SOMBREO.....	93
3.1.9 ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO	95
3.2 SISTEMAS DE CALEFACCIÓN.....	97
3.2.1 SISTEMA DE VAPOR.....	98
3.2.2 SISTEMA DE AGUA CALIENTE	99

3.2.3 SISTEMA DE AIRE CALIENTE	100
3.3 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN	101
3.4 BALANCE DE ENERGÍA	103
3.4.1 RADIACIÓN NETA, R_n	105
3.4.2 CALOR POR CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN, Q_{cc}	108
3.4.3 CALOR SENSIBLE Y LATENTE PERDIDO POR LA RENOVACIÓN DEL AIRE EN EL INTERIOR DEL INVERNADERO, Q_{ren}	109
3.4.4 CALOR LATENTE CONSUMIDO EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LAS PLANTAS Y EL SUELO, Q_{evp}	112
3.4.5 FLUJO DE CALOR PERDIDO POR CONDUCCIÓN A TRAVÉS DEL SUELO, Q_{sue}	113
3.4.6 ENERGÍA CALORÍFICA QUE SERÁ NECESARIA APORTAR Q_{cal} O ELIMINAR Q_{ref} DEL INVERNADERO Q_{cli} ..	114
CONCLUSIONES	115
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	116
4.1 DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO	116
.....	116
4.2 PARÁMETROS DE DISEÑO	117
4.2.1 CALEFACCIÓN	117
4.2.2 REFRIGERACIÓN	118
4.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	121
4.3.1. SISTEMA DE CALEFACCIÓN	122
4.3.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	122
CONCLUSIONES	125
CAPÍTULO 5. CAD Y PLANOS	126
5.1 PRESENTACIÓN	126
5.2 PLANOS	128
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	130
ANEXO I. PROPIEDADES CUBIERTA INVERNADERO	133
ANEXO II. BALANCE DE ENERGÍA COMPLETO	134
ANEXO III. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA DEL RECURSO GEOTÉRMICO	136
BIBLIOGRAFÍA	142

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

FIG. 1. 1 CAPAS CONCÉNTRICAS DE LA TIERRA, SEGÚN BULLARD [2]	20
FIG. 1. 2 SECCIÓN TRANSVERSAL DONDE SE MUESTRA LOS PROCESOS DE LA TECTÓNICA DE PLACAS [2]	22
FIG. 1. 3 MAPA QUE MUESTRA LAS PLACAS TECTÓNICAS [3]	23
FIG. 1. 4 ACANTILADO CON MANANTIALES DE AGUAS TERMALES, TURQUÍA [2]	24
FIG. 1. 5 PRIMERA INSTALACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTICA, LARDERELLO 1904 [2]	25
FIG. 1. 6 PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE ENERGÍA GEOTERMOELÉCTRICA EN EL AÑO 2000 [2]	27
FIG. 1. 7 PAÍSES PRODUCTORES DE ENERGÍA USOS DIRECTOS EN EL AÑO 2000 [2]	27
FIG. 1. 8 RECURSOS GEOTÉRMICOS MUNDIALES [2]	29
FIG. 1. 9 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL MODELO DE YACIMIENTO GEOTÉRMICO [2]	30
FIG. 1. 10 ESQUEMA DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO ESTIMULADO [2]	32
FIG. 1. 11 ESQUEMA VENTILA HIDROTHERMAL [FUENTE: OCEANOGRAFÍA GEOLÓGICA, UABCS]	33
FIG. 1. 12 CORTE TRASVERSAL DE UN SISTEMA MAGMÁTICO	33
FIG. 1. 13 CALEFACCIÓN DE INVERNADEROS [4]	36
FIG. 1. 14 INVERNADERO GEOTÉRMICO MÁS GRANDE DEL MUNDO EN MOKAI, NUEVA ZELANDA [2]	37
FIG. 1. 15 PRINCIPALES ESPECIES CRIADAS EN PISCIFACTORÍAS	37
FIG. 1. 16 GRANJA DE CAIMANES CLIMATIZADA CON RECURSO GEOTÉRMICO [2]	38
FIG. 1. 17 COMPLEJO INDUSTRIAL DE KOWERAU, BAHÍA DE PLENTY NUEVA ZELANDA [2]	39
FIG. 1. 18 INDUSTRIAS QUE APLICAN RECURSOS GEOTÉRMICOS DENTRO DE SUS PROCESOS	40
FIG. 1. 19 ESQUEMA DE UN EDIFICIO CON PILOTES INTERCAMBIADORES DE CALOR [2]	41
FIG. 1. 20 PRINCIPALES CAMPOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO	43

Capítulo 2

FIG. 2. 1 DESARROLLO DE LA AGRICULTURA EN DIVERSAS CIVILIZACIONES	46
FIG. 2. 2 PALACIO DE CRISTAL SITUADO EN INGLATERRA, EN 1851 ALBERGO "LA GRAN EXPOSICIÓN UNIVERSAL"	47
FIG. 2. 3 UTILIZACIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS EN LA AGRICULTURA PROTEGIDA	48
FIG. 2. 4 INVERNADEROS LÍDERES A NIVEL MUNDIAL	49
FIG. 2. 5 COMPARACIÓN ENTRE CULTIVOS AL AIRE LIBRE Y EN INVERNADEROS	51
FIG. 2. 6 INVERNADERO CASA SOMBRA	52
FIG. 2. 7 INVERNADERO TIPO TÚNEL	53
FIG. 2. 8 ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO TIPO CAPILLA A DOS AGUAS	54
FIG. 2. 9 ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO GÓTICO	55
FIG. 2. 10 INVERNADERO TROPICAL O ASIMÉTRICO	56
FIG. 2. 11 INVERNADERO TIPO VENLO (HOLANÉS) [36]	57
FIG. 2. 12 TEXTURA DEL SUELO, CLASIFICACIÓN GENERAL	58
FIG. 2. 13 ACTIVIDAD FOTOSINTÉTICA A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA [43]	59
FIG. 2. 14 VENTILACIÓN NATURAL Y FORZADA	61
FIG. 2. 15 GRUPOS Y SUBGRUPOS DE CLIMAS EN MÉXICO	63
FIG. 2. 16 FLORA Y FAUNA MEXICANA	64
FIG. 2. 17 PRODUCCIÓN DE JITOMATE, PORCENTAJE POR ENTIDAD FEDERATIVA [8]	68
FIG. 2. 18 PRINCIPALES TIPOS DE JITOMATE	69
FIG. 2. 19 MORFOLOGÍA DE LA PLANTA DE JITOMATE	69
FIG. 2. 20 INFLUENCIA DEL PH SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES ESENCIALES EN EL SUELO	71

FIG. 2. 21 PRINCIPALES NUTRIENTES PRESENTES EN EL SUSTRATO, NECESARIOS PARA EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.....	72
FIG. 2. 22 PRINCIPALES DAÑOS CAUSADOS AL CULTIVO DE JITOMATES DEBIDO AL EXCESO Y DEFICIENCIAS DE NUTRIENTES EN EL SUELO.	72
FIG. 2. 23 PRINCIPALES ESPECIES DE JITOMATE.	75
FIG. 2. 24 PLAGAS Y ENFERMEDADES QUE ATACAN EL CULTIVO DE JITOMATE	77

Capítulo 3

FIG. 3. 1 CLIMA BAJA CALIFORNIA [FUENTE: INEGI, MARCO GEOESTADÍSTICO, 2010]	82
FIG. 3. 2 ÁREA DEL INVERNADERO, PROPUESTA DE LA SUPERFICIE A SEMBRAR.....	84
FIG. 3. 3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS EN CUBIERTAS DE POLIETILENO [FUENTE: GINEGAR, PRODUCTOS PLÁSTICOS LTD.]	87
FIG. 3. 4 MARCO DE PLANTACIÓN PROPUESTO	88
FIG. 3. 5 CANTIDAD DE RADIACIÓN MEDIA DIARIA	89
FIG. 3. 6 SISTEMAS DE RIEGO MÁS USADOS EN INVERNADEROS.....	91
FIG. 3. 7 SISTEMA DE RIEGO LOCALIZADO AUTOMATIZADO	92
FIG. 3. 8 PANTALLAS Y SOMBREO – PANTALLAS TÉRMICAS [47]	93
FIG. 3. 9 PANTALLA DE SOMBREO [47]	94
FIG. 3. 10 PANTALLA TÉRMICA [47]	94
FIG. 3. 11 PANTALLA TERMOREFLECTIVA [47]	95
FIG. 3. 12 PRINCIPALES SISTEMAS PARA LA GENERACIÓN DE BIÓXIDO DE CARBONO.....	96
FIG. 3. 13 DIVERSOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN	98
FIG. 3. 14 SISTEMAS DE CALEFACCIÓN, MEDIANTE AGUA CALIENTE.....	99
FIG. 3. 15 CALEFACCIÓN CENTRAL, FUNCIONAMIENTO GENERAL	100
FIG. 3. 16 PROCESOS DE REFRIGERACIÓN.....	102
FIG. 3. 17 SISTEMA TÍPICO DE REFRIGERACIÓN VAPOR - COMPRESIÓN.....	102
FIG. 3. 18 BALANCE DE ENERGÍA EN EL INVERNADERO.....	104
FIG. 3. 19 RADIACIÓN EN INVERNADERO	105

Capítulo 4

FIG. 4 1 DIAGRAMA DE LOS PROCESOS TÉRMICOS INVOLUCRADOS DENTRO DEL INVERNADERO.....	116
---	-----

Capítulo 5

FIG. 5 1 INVERNADERO IIDEA (SURCOS Y CUBIERTA PLÁSTICA, ENSAMBLE).....	126
FIG. 5 2 INVERNADERO GEOTÉRMICO IIDEA, DIFERENTES VISTAS.....	127
FIG. 5 3 DISTRIBUCIÓN DE SURCOS DENTRO DEL INVERNADERO	128
FIG. 5 4 CUBIERTA PLÁSTICA Y DISTRIBUCIÓN DE VENTANAS	129

LISTA DE TABLAS Y GRÁFICOS

Capítulo 1

TABLA 1. 1 CAPACIDAD GEOTÉRMICA INSTALADA EN EL MUNDO, 2000 – 2005. [19]	26
TABLA 1. 2 EMISIONES CONTAMINANTES DIFERENTES FUENTES TÉRMICAS	28
TABLA 1. 3 POTENCIA GEOTERMOELÉCTRICA INSTALADA A NIVEL MUNDIAL, 2013.	42

Capítulo 2

TABLA 2. 1 ÁREA PROTEGIDA, ESTIMADA PARA LA PRODUCCIÓN DE HORTALIZAS EN EL MUNDO. [FUENTE: INSTITUTO DE ALIMENTOS Y CIENCIAS AGRÍCOLAS (IFAS) DE LA UNIVERSIDAD DE FLORIDA]	50
TABLA 2. 2 EXIGENCIAS DE TEMPERATURA DE DIVERSOS CULTIVOS [4]	58
TABLA 2. 3 VALORES DE HUMEDAD ADECUADOS PARA CULTIVOS EN INVERNADERO [39]	60
TABLA 2. 4 VALORES ÓPTIMOS DE TEMPERATURA, ENRIQUECIMIENTO CO_2 Y HUMEDAD RELATIVA [39]	62
TABLA 2. 5 SUPERFICIE NACIONAL DE INVERNADEROS Y CASA SOMBRA [7]	66
TABLA 2. 6 PRODUCCIÓN ALIMENTICIA ANUAL, 2011 [45]	67
TABLA 2. 7 ESTIMACIÓN DE EXPORTACIÓN DE JITOMATE POR ENTIDADES [FUENTE: SAGARPA] [38]	67
TABLA 2. 8 PRINCIPALES EFECTOS DE LOS MACRONUTRIENTES EN EL CULTIVO DE TOMATES	74
TABLA 2. 9 CONSUMO PROMEDIO DE AGUA, JITOMATE	74
TABLA 2. 10 PRINCIPALES EFECTOS PROVOCADOS POR PLAGAS Y ENFERMEDADES EN CULTIVO DE JITOMATE.	76
GRAFICO 2. 1 CULTIVO DE TOMATE ENRIQUECIDO CON CO_2 [7]	62
GRAFICO 2. 2 EXPORTACIÓN DE ALIMENTOS, 2011 [38]	67
GRAFICO 2. 3 IMPORTACIONES DE JITOMATE PELADO A NIVEL MUNDIAL, 2010 [11]	79
GRAFICO 2. 4 IMPORTACIONES MUNDIALES DE PASTA DE TOMATE, 2010 [11]	80

Capítulo 3

TABLA 3. 1 RANGOS DE EFECTIVIDAD DE DIVERSAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS [FUENTE: BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL]	83
TABLA 3. 2 CONDICIONES CLIMÁTICAS DE DISEÑO PARA EL EJIDO GUADALAJARA	83
TABLA 3. 3 MEDIDAS ESTÁNDARES INVERNADERO ASIMÉTRICO	84
TABLA 3. 4 CUBIERTA PLÁSTICA, PROPIEDADES FÍSICAS	85
TABLA 3. 5 COMPARACIÓN ENTRE LOS PRINCIPALES MATERIALES PLÁSTICOS UTILIZADOS EN CUBIERTA DE INVERNADERO [6]	86
TABLA 3. 6 RADIACIÓN SOLAR GLOBAL PROMEDIO, “RANCHO WILLIAMS” EN MEXICALI, B. C.	88
TABLA 3. 7 LITROS DE COMBUSTIBLE PARA GENERAR CO_2	96
TABLA 3. 8 COEFICIENTES DE ABSORCIÓN PARA LA RADIACIÓN SOLAR EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR [4]	106
TABLA 3. 9 VALORES DE ALBEDO PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO [4]	107
TABLA 3. 10 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS MATERIALES DE CUBIERTA [4]	108
TABLA 3. 11 FORMULAS EMPÍRICAS PARA EL COEFICIENTE DE CONVECCIÓN EN EL EXTERIOR [4]	109
TABLA 3. 12 TASA DE RENOVACIÓN POR INFILTRACIÓN EN LA ESTRUCTURA [4]	110
TABLA 3. 13 VALORES TÍPICOS DEL COEFICIENTE DE EFECTO EÓLICO [12]	111
TABLA 3. 14 VALORES DEL COEFICIENTE DE CAÍDA DE PRESIÓN [12]	112
TABLA 3. 15 COEFICIENTES DE CULTIVO DE CULTIVOS HORTÍCOLAS EN INVERNADEROS DE PLÁSTICO EN ALMERÍA. [12]	113
TABLA 3. 16 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE SUELOS [12]	114

Capítulo 4

TABLA 4. 1 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	117
TABLA 4. 2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	118
TABLA 4. 3 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	119
TABLA 4. 4 TEMPERATURAS CRÍTICAS A CONSIDERAR PARA EL SISTEMA DE CALEFACCIÓN	120
TABLA 4. 5 TEMPERATURAS CRÍTICAS A CONSIDERAR PARA EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	121
TABLA 4. 6 RESULTADOS FINALES OBTENIDOS DEL BALANCE DE ENERGÍA	121
GRAFICO 4. 1 SISTEMA DE CALEFACCIÓN	122
GRAFICO 4. 2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	123
GRAFICO 4. 3 CARGAS TÉRMICAS PICO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN	124

NOMENCLATURA

A	<i>Área</i>
a	<i>Altura</i>
AF	<i>Área foliar</i>
A_G	<i>Conducción del suelo del invernadero</i>
A_H	<i>Área de la superficie del invernadero</i>
A_h	<i>Ancho máximo hoja</i>
A_s	<i>Superficie de suelo</i>
A_{tb}	<i>Área propuesta en función del diámetro exterior de la tubería</i>
A_v	<i>Superficie de ventana</i>
b	<i>Base</i>
°C	<i>Grados Celsius</i>
CO₂	<i>Dióxido de carbono</i>
COP_R	<i>Coefficiente de desempeño</i>
C_p	<i>Coefficiente de calor específico a presión constante</i>
c_{pa}	<i>Calor específico del aire</i>
c_{pv}	<i>Calor específico del vapor recalentado</i>
C_v	<i>Coefficiente de calor específico a volumen constante</i>
C_{viento}	<i>Coefficiente adimensional del efecto del viento</i>
C_d	<i>Coefficiente de caída de presión debido al efecto eólico</i>
C_{pw}	<i>Calor específico del agua</i>
DPV_i	<i>Déficit de presión de vapor en el interior del invernadero</i>
e_c	<i>Espesor de la cubierta</i>

e_s	<i>Presión parcial del vapor en saturación</i>
e_{se}	<i>Presión parcial del vapor saturante en el aire del exterior</i>
F	<i>Coefficiente de pérdidas en una ventana con malla anti-insectos</i>
f_n	<i>Factor de nubosidad</i>
f_p	<i>Fracción del suelo cubierto por las plantas</i>
G	<i>Flujo de aire en el invernadero</i>
g	<i>Aceleración de la gravedad</i>
H	<i>Altura de la apertura de ventilación o profundidad característica</i>
h	<i>Hora</i>
ha	<i>Hectárea</i>
h_{conv}	<i>Coefficiente de calor perdido por convección</i>
h_e	<i>Coefficiente de convección para el exterior del invernadero</i>
h_i	<i>Coefficiente de convección interior del invernadero</i>
h_{12}	<i>Diferencia de alturas entre las ventanas laterales</i>
k_c	<i>Coefficiente de cultivo</i>
$k_{c_{ini}}$	<i>Coefficiente de cultivo inicial</i>
$k_{c_{fin}}$	<i>Coefficiente de cultivo final</i>
$k_{c_{med}}$	<i>Coefficiente de cultivo medio</i>
kg	<i>Kilogramo</i>
hPa	<i>Hecto Pascales</i>
HR_e	<i>Humedad relativa exterior</i>
IAF	<i>Índice de área foliar</i>
HR	<i>Humedad Relativa</i>

K	<i>Coeficiente global de transmisión de calor</i>
k	<i>Conductividad térmica</i>
K_{cc}	<i>Coeficiente global de pérdidas por conducción y convección</i>
k_s	<i>Conductividad térmica del suelo</i>
kW	<i>Kilowatt</i>
L	<i>Longitud de la apertura de ventilación</i>
L_h	<i>Largo máximo hoja</i>
L_{tb}	<i>Longitud propuesta</i>
M	<i>Flujo de aire</i>
m	<i>Metro</i>
m²	<i>Metro cuadrado</i>
m³	<i>Metro cubico</i>
nm	<i>Nano metro</i>
Nu	<i>Nusselt promedio</i>
P_{atm}	<i>Presión en el invernadero</i>
ppm	<i>Partes por millón</i>
p_t	<i>Profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura</i>
P_{tb}	<i>Perímetro tubería</i>
ρ_{sue}	<i>Reflexión solar o albedo</i>
ρ	<i>Densidad del aire</i>
Q	<i>Carga de calor</i>
Q₁	<i>Calor suministrado en el acondicionado</i>
q_c	<i>Calor transmitido por la superficie de las tuberías</i>

Q_{cal}	<i>Calor suministrado por el sistema de calefacción</i>
Q_{cc}	<i>Calor perdido por conducción y convección</i>
Q_{cli}	<i>Energía climatización</i>
Q_{evp}	<i>Calor latente consumido por evapotranspiración plantas – suelo</i>
Q_H	<i>Cantidad de calor rechazado hacia el medio</i>
Q_L	<i>Calor absorbido</i>
q_r	<i>Calor transmitido por las tuberías mediante radiación</i>
Q_{ref}	<i>Calor de refrigeración o nebulización</i>
Q_{ren}	<i>Calor sensible y latente perdido por la renovación del aire</i>
Q_{sue}	<i>Flujo de calor perdido por conducción a través del suelo</i>
qu_{evp}	<i>Caudal emitido por las boquillas de nebulización</i>
qu_w	<i>Tasa de flujo másico del agua de calefacción</i>
R	<i>Tasa de renovación de aire estructura</i>
Re	<i>Número Reynolds</i>
R_n	<i>Radiación neta</i>
R_{sol}	<i>Radiación solar diurna</i>
S_1	<i>Superficie efectiva de ventilación lateral</i>
S_2	<i>Superficie efectiva de ventilación cenital</i>
S_c	<i>Superficie del suelo cubierta</i>
S_d	<i>Superficie de la cubierta plástica desarrollada</i>
T_{1a}	<i>Temperatura del aire que rodea las tuberías</i>
t	<i>Temperatura ambiente o de bulbo seco</i>
t_a	<i>Temperatura media de las temperaturas en el exterior</i>

T_{atm}	<i>Temperatura de la atmósfera</i>
t_d	<i>Temperatura del aire que sale de los difusores</i>
t_e	<i>Temperatura del agua a la entrada</i>
t_{ext}	<i>Temperatura del aire exterior</i>
t_i	<i>Temperatura a mantener en el espacio</i>
t_{inv}	<i>Temperatura requerida dentro del invernadero</i>
t_s	<i>Temperatura del agua a la salida</i>
t_{sue}	<i>Temperatura del suelo del invernadero</i>
T_{∞}	<i>Temperatura del recurso geotérmico a la entrada</i>
u	<i>Velocidad del viento</i>
UV	<i>Radiación ultra violeta</i>
V_{inv}	<i>Volumen del invernadero</i>
v_v	<i>Velocidad del viento</i>
W_1	<i>Gasto de agua</i>
x_i, x_e	<i>Humedades absolutas interiores y exteriores</i>
α	<i>Absorbidad</i>
$\circ \alpha$	<i>Ángulo de apertura de una ventana con alerón</i>
α_{pla}	<i>Coefficiente de absorción de radiación en las plantas</i>
α_s	<i>Coefficiente de absorción de las plantas y del suelo</i>
α_{sue}	<i>Coefficiente de absorción de radiación solar en el suelo</i>
γ	<i>Constante psicométrica</i>
Δ	<i>Pendiente curva de presión de vapor</i>
δ	<i>Reflectividad</i>

ϵ	<i>Emisividad</i>
ϵ_{atm}	<i>Emisividad atmosférica</i>
ϵ_{tb}	<i>Emisividad de las tuberías de calefacción</i>
λ_0	<i>Calor latente de vaporización del agua</i>
λ_c	<i>Conductividad térmica de la cubierta</i>
τ	<i>Transmisividad</i>
φ	<i>Porosidad de malla anti-insectos</i>

CAPÍTULO 1. ENERGÍA GEOTÉRMICA

En este capítulo se definirá qué es la energía geotérmica, sus inicios, tipos de recursos, usos – aplicaciones directas, panorama general de la geotermia en México. La importancia de la geotermia en México radica en su enorme potencial a nivel mundial, así como la versatilidad de los recursos geotérmicos presentes en gran parte del territorio nacional, que lamentablemente sólo son utilizados para la generación de energía eléctrica, restándole importancia a las aplicaciones directas siendo estas las bases de estudio para el presente trabajo.

1.1 DEFINICIÓN

La palabra geotermia proviene del griego “*geos*” que significa *tierra* y “*thermos*” que significa *calor*, por lo que su significado es “*calor de la tierra*”, aunque resulte confuso, este término engloba a la ciencia que estudia los fenómenos del interior de la tierra, como son: vulcanismo, sismos, fallas en la corteza terrestre; así como los procesos industriales que buscan emplear este calor en forma de energía eléctrica, calefacción – climatización, agricultura entre otros. [1]

Por lo que, la energía que obtenemos del interior de la tierra se denomina energía geotérmica, que es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la tierra, es decir, por debajo de la corteza terrestre (definición oficial en Alemania adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica EGEC).

Este calor se encuentra contenido en rocas, suelos y aguas subterráneas según su extracción se puede clasificar en directa e indirecta. Generalmente el calor en rocas y suelos no suele ser extraído de forma directa debido a su elevada difusividad, por lo que es necesario utilizar un fluido que por lo general es agua, para transportar el calor a la superficie mediante sondeos, colectores horizontales o mediante intercambiadores de calor tierra - aire enterrados en el subsuelo. Mientras que en aguas subterráneas la extracción es de forma directa.

1.2 ESTRUCTURA DE LA TIERRA

Para comprender los fenómenos geotérmicos es indispensable conocer la estructura interna de la tierra, así como las manifestaciones termales en la superficie y su localización en diferentes partes del mundo, debidas principalmente a que la tierra es un sistema activo que recibe y transmite energía en forma de calor del interior hasta la superficie.

1.2.1 MODELO DE BULLARD

Según el modelo estático, la Tierra está formada por cinco capas concéntricas como se observa en la **Fig. 1. 1**. Donde sólo el 0.5% lo conforman la corteza y la atmósfera, mientras que el 99.5 % se encuentra debajo de la corteza a temperaturas que van desde los 1000 – 6000 °C.

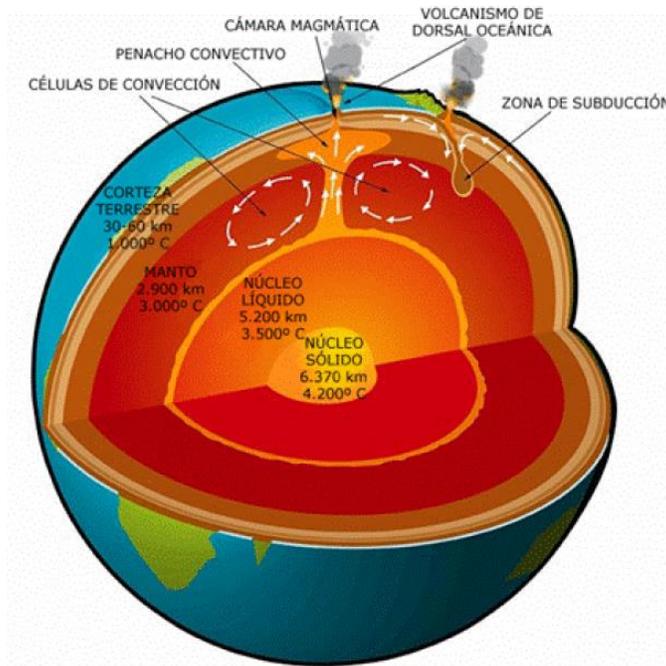


Fig. 1. 1 Capas concéntricas de la Tierra, según Bullard [2]

- a) **Atmósfera.** Es la parte más externa de la tierra, es gaseosa, por ende la capa con menor densidad, constituida por varios gases: oxígeno (21 %), nitrógeno (78 %), otros (1 %), protege la vida sobre la tierra pues actúa como un escudo absorbiendo gran parte de la radiación solar ultravioleta.
- b) **Corteza.** Está formada por tierra, mares y casquetes polares de espesor deforme que va de los 5 a 70 km, su temperatura varía de los 15 °C a 20 °C en la superficie a 1,000 °C en la zona que tiene contacto con el manto, actúa como aislante debido a su baja conductividad.
La zona que une al manto con la corteza se denomina Mohorovicic (se abrevia como “*Moho*”), en esta zona existe un cambio súbito de composición del material así como de su estado, se encuentra a una temperatura de 600 °C
- c) **Manto.** Envuelve al núcleo, se encuentra a temperaturas que van de los 1,000 °C a 3,000 °C, de textura plástica bajo esfuerzos y sólida al transmitir ondas sísmicas.

- d) **Núcleo Líquido.** Compuesto fundamentalmente por hierro y níquel, su temperatura varía de los 3,000 °C a 4,000 °C y se encuentra en estado líquido, se sitúa a 5,200 km por debajo de la corteza terrestre.
- e) **Núcleo Sólido.** Compuesto por hierro y níquel, su temperatura varía de 4,000 °C a 6,000 °C y se encuentra en estado sólido, situado a 6,300 km de la superficie terrestre. [2]

Se cree que los orígenes del calor interno de la tierra se deben principalmente a tres fenómenos:

- Calor inicial de la tierra que se liberó durante la formación de la tierra hace 4500 millones de años, donde gran parte quedó encerrado dentro de la corteza terrestre.
- Desintegración de isótopos radioactivos presentes en la corteza como son: Uranio 235, Uranio 238, Torio 232.
- Movimientos diferenciales entre las capas de la tierra, principalmente en el manto – núcleo
- Cristalización del núcleo líquido que se encuentra en contacto con el núcleo sólido, generando la liberación de calor.

1.2.2 GRADIENTE Y FLUJO GEOTÉRMICO

Debido a la diferencia de temperaturas que existe a lo largo de las diferentes capas de la tierra se genera un flujo de calor que va del cuerpo más caliente al más frío, es decir, de las capas interiores a la superficie. Este fenómeno es muy fácil de apreciar al interior de las minas, conforme aumenta la profundidad, aumenta también la temperatura, aproximadamente 1 °C por cada 30 m este incremento de la temperatura se le conoce como gradiente de temperatura geotérmico normal, por lo que dicho gradiente de temperatura se encuentra en función de la profundidad y de la zona.

El “*gradiente de temperatura geotérmico*” en regiones muy delimitadas y específicas puede alcanzar hasta 200 a 800 °C por kilómetro, como los que se registran en Larderello Italia, es una medida fácil de obtener que nos permite conocer el “*flujo de calor*”, que no es otra cosa que la estimación de la cantidad de calor que se transmite de las zonas internas de la corteza hacia el exterior, sus unidades son metro-Watt por metro cuadrado $\left[\frac{\text{m}\cdot\text{W}}{\text{m}^2}\right]$ el promedio del flujo de calor en la tierra es de $60 \left[\frac{\text{m}\cdot\text{W}}{\text{m}^2}\right]$.

El flujo de calor es el producto entre el gradiente geotérmico y la conductividad térmica de la roca en el punto donde se desea calcular, es importante no confundir el “*gradiente de temperatura*” con el “*flujo de calor*”, pues

son medidas completamente diferentes, pero son de ayuda para conocer la tasa de energía en forma de calor que se transmite de las capas internas hacia el exterior. Esta transferencia de energía se da por medio de conducción, convección y radiación, es de 42×10^{12} [J], donde casi el 77 % de esta energía se genera en el manto, 19% proviene de la corteza, mientras que sólo el 4 % proviene del núcleo.

1.2.3 TECTÓNICA DE PLACAS

La corteza terrestre se encuentra formada por placas principales y secundarias. Estas placas se encuentran en constante movimiento, ocasionando que en los lugares donde se separan las placas la corteza se parte, como en el cinturón sísmico que al dividirse la corteza asciende magma caliente, rellenando la grieta; mientras que en donde las placas chocan la corteza se desmorona como en los Andes, donde a lo largo del tiempo se han formado pliegues, dando origen a enormes cordilleras, ver **Fig. 1. 2**.

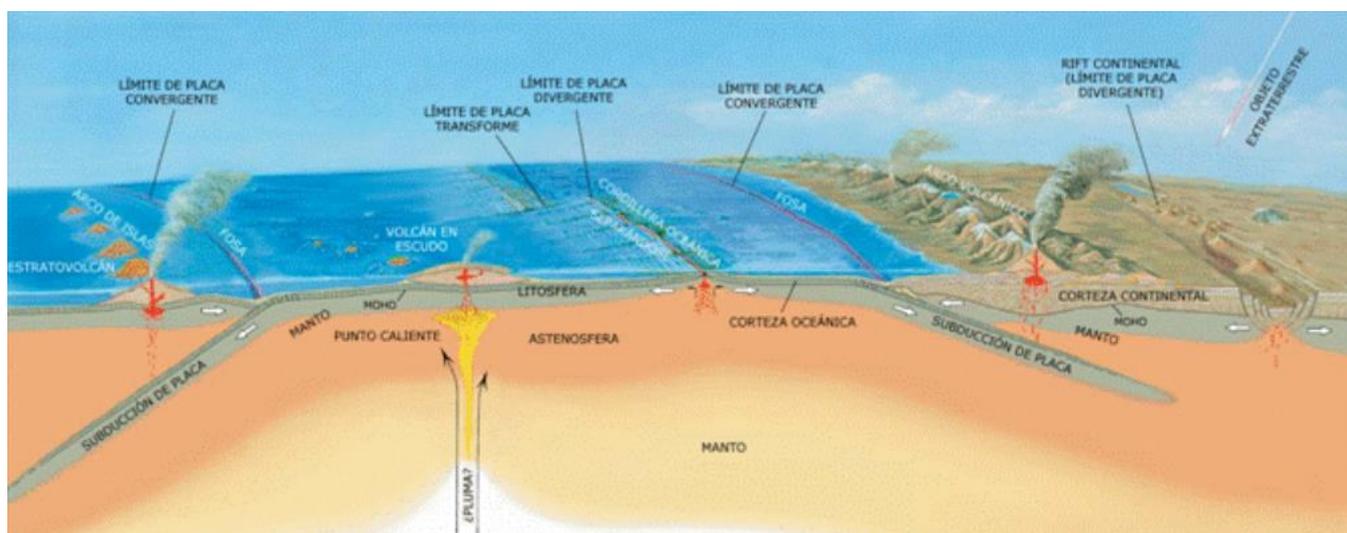


Fig. 1. 2 Sección transversal donde se muestra los procesos de la tectónica de placas [2]

De acuerdo con la teoría de la “tectónica de placas” o también conocida como “*deriva continental*”, el cinturón sísmico no es más que una línea que sigue la trayectoria por donde chocan o separan las placas tectónicas, esta teoría señala que el movimiento de las placas da lugar a sismos y terremotos por medio de sacudidas. La energía que generan estas sacudidas es originada por corrientes de convección en el manto, debido a que el material del manto fluye bajo la influencia de elevadas temperaturas y esfuerzos.

En general la teoría establece que “*las placas de la corteza terrestre se han mantenido en estado de movimiento todo el tiempo, generando que estas placas se creen de forma continua en las zonas de división y destruyéndose*”

en las zonas de colisión. Las placas flotan sobre el manto y a lo largo de cientos de años pueden cambiar de forma así como la dirección de su desplazamiento”, ver Fig. 1. 3.

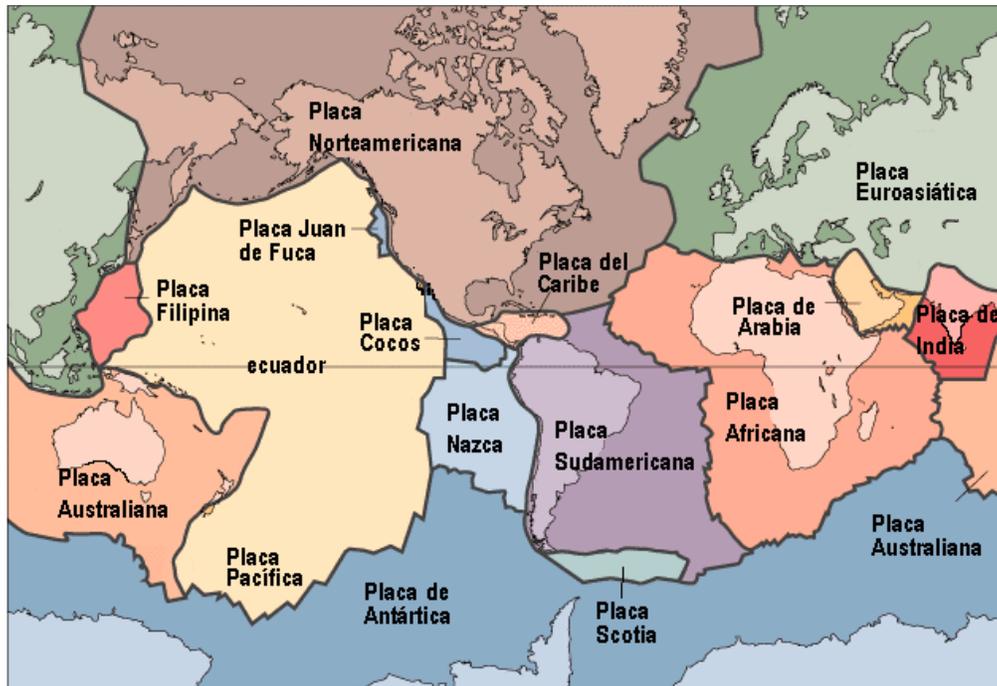


Fig. 1. 3 Mapa que muestra las placas tectónicas [3]

1.3 BREVE HISTORIA

Hace aprox. 4500 millones de años la tierra era sólo una bola ardiente formada por gases y polvo, que al enfriarse, hace aproximadamente 3800 millones de años, se formó una capa dura, que hoy en día denominamos corteza terrestre, que atrapó en su interior una enorme cantidad de calor, que perdura hasta nuestros días, por lo que es natural que muchos autores nombren a la tierra como “caldera natural” o “maquinar de calor”.²

El calor interno de la tierra siempre ha estado ligado al desarrollo de la vida tanto vegetal, como animal y por supuesto también al hombre, es conocido que muchas especies animales se resguardan del frío en invierno y del calor en verano excavando madrigueras en la tierra, así como los hombres prehistóricos buscaban protección de las inclemencias del clima en cuevas o cavernas subterráneas, donde los decesos y aumentos de la temperatura son menores o más lentos que en la superficie. A continuación se enlistaran de manera cronológica acontecimientos ligados al desarrollo de la geotermia:

- Restos arqueológicos tallados en piedra volcánica relacionados con la energía geotérmica, fueron encontrados en Japón que datan de la tercera glaciación hace 15,000 a 20,000 años, utilizaban el calor que emanaba de la tierra para cocinar alimentos.
- Hace 10,000 años Paleo – Indios Americanos cocinan sus alimentos con ayuda de aguas termales, e incluso les atribuían propiedades medicinales.
- Hace 3,500 años a.C., desde griegos, romanos, japoneses, etruscos, utilizan las aguas termales para la creación de: centros de ocio, baños públicos (también conocidos como termas), así como la utilización de barros termales para la salud, ver **Fig. 1. 4**.



Fig. 1. 4 Acantilado con manantiales de aguas termales, Turquía [2]

Pero fueron los griegos quienes también implementaron sistemas de calefacción urbana y extracción de minerales como azufre, caolines y óxidos de hierro.

- En 1330 Francia dotó de una distribución de agua caliente a los hogares, mientras que en Serbia utilizaban el agua caliente para lavar lana y pieles. En Volterra existían lagunas de agua caliente en donde escapaba vapor a más de 100 °C, el cual era utilizado para extraer ácido sulfúrico que se encuentra presente en fertilizantes, tratamiento de aceros y alumbre sustancia utilizada por tintoreros pues sirve para fijar colores. preservar pieles y como base para obtener lacas.

Fue hasta el siglo XIX con los nuevos avances técnicos y mayores conocimientos del subsuelo que comenzaron las exploraciones a mayor profundidad, con el único fin de mejorar el aprovechamiento del recurso geotérmico.

- En 1818 en Larderello Toscana, se inició la utilización de los recursos geotérmicos en la industria, con las sales de boro.
- En 1827 François Larderel utilizó el calor de fluidos en procesos de evaporación, en lugar de quemar madera o carbón.
- En 1833 en Francia se llevó a cabo el primer sondeo profundo, un pozo de 548 m de profundidad que captó agua potable a 30 °C
- En 1892 Boise, Idaho EE. UU., la primera red de calefacción urbana entra en funcionamiento.
- En 1904 Larderello dio paso a la generación de energía eléctrica a partir de vapor geotérmico, **ver Fig. 1. 5.**



Fig. 1. 5 Primera instalación de generación de energía eléctrica, Larderello 1904 [2]

- Fue hasta el año de 1913 que entró en funcionamiento una central de 250 KW.
- Entre 1910 y 1940 vapor de baja presión es utilizado en invernaderos, edificios industriales y edificios residenciales.
- A finales de la segunda Guerra Mundial tropas alemanas destruyeron por completo la central, los pozos y las tuberías de Larderello.
- En 1919 en Beppu, Japón perforan los primeros pozos geotérmicos que dieron lugar en 1924 a una planta experimental de 1 KW de capacidad.
- En 1921 en California EE. UU., se producía energía eléctrica para un establecimiento termal
- En 1930 en Reiljavik Islandia, se construyó la primera red moderna de calefacción urbana alimentada por energía geotérmica, en donde hoy en día 95 % de la población tiene calefacción, gracias a una red de

700 km de agua caliente. Desde entonces estas redes se instalaron y encuentran aún en funcionamiento en Francia, Italia, Hungría, Rumania, Rusia, Turquía, Georgia, China, Estados Unidos.

- En 1945 en Indianápolis EE. UU, se instaló la primera bomba de calor geotérmica en la casa de Robert C. Webber.
- En 1947 en Kemler, E. N., publican esquemas de los diferentes métodos de conexión de bombas de calor.
- En 1948 en Ohio, EE. UU se instala otra instalación con bomba de calor geotérmica al igual que en Toronto Canadá, se instala una casa experimental en 1949.
- En la década de los 70's debido a la alza en los precios del petróleo inicia un aumento en la exploración e investigación de recursos geotérmicos con el fin de utilizarlos para la generación de energía eléctrica y calefacción, pero desafortunadamente esta iniciativa pierde fuerza e interés.
- Es hasta 1990 debido a exigencias medioambientales, básicamente en la reducción de emisiones contaminantes como son CO₂, cuando se retoma el desarrollo de bombas de calor geotérmicas.
- Actualmente se cuenta con más de un millón de instalaciones en América del Norte, Suecia, Suiza, Alemania, Austria. En la **Tabla 1. 1** se muestra la capacidad geotérmica instalada.

Año	Capacidad Instalada	
	Usos eléctricos	Usos no eléctricos
2000	8000 MWe	15000 MW
2005	9000 MWe	28000 MW

Tabla 1. 1 Capacidad Geotérmica instalada en el mundo, 2000 – 2005. [19]

- Para el año 2005 de la capacidad para usos no eléctricos cerca de 15000 MW corresponden a bombas de calor geotérmicas.
- Distribución mundial de los principales países productores de energía eléctrica de origen geotérmico, ver **Fig. 1.6**.



Fig. 1. 6 Principales países productores de energía geotermoeléctrica en el año 2000 [2]

- Distribución mundial de los principales países que aprovechan la energía geotérmica para usos directos del calor, ver Fig. 1. 7.

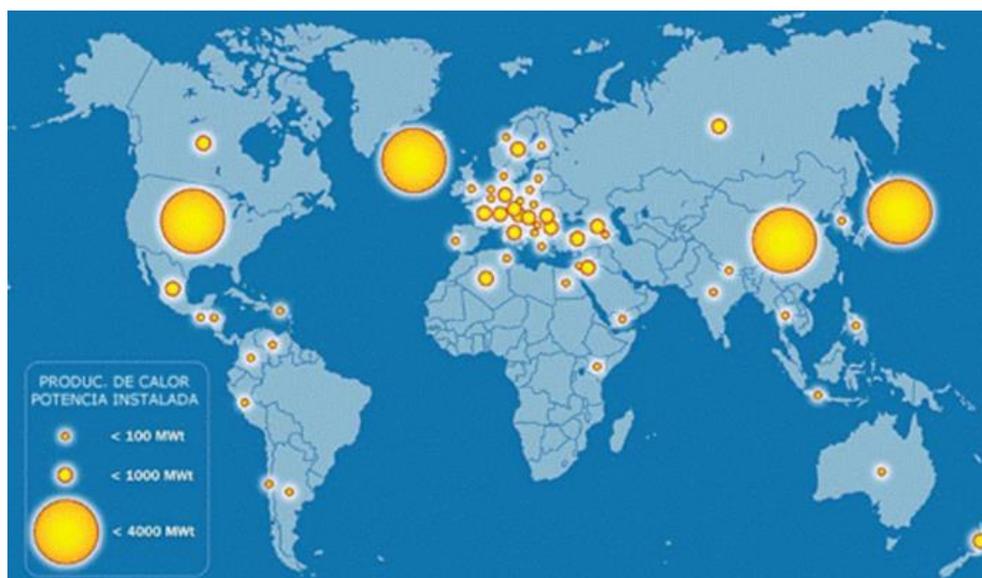


Fig. 1. 7 Países productores de energía usos directos en el año 2000 [2]

1.4 CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Como hemos analizado en los apartados anteriores debido a los movimientos tectónicos, se generan grietas en la corteza terrestre que permiten el ascenso de magmas procedentes del manto, que llegan a formar cámaras magmáticas capaces de calentar las rocas circundantes que al ser permeables o encontrarse fracturadas permiten la circulación de aguas subterráneas capaces de captar el calor de las rocas, de esta manera llega la superficie el recurso geotérmico o energía geotérmica. Es una energía limpia, genera pocas emisiones contaminantes en comparación con otras fuentes térmicas como se puede apreciar en la **Tabla 1. 3.**

<u>g/kWh</u>	NO _x	SO ₂	CO ₂
Carbón	2.0	4.7	996
Petróleo	1.8	5.5	760
Gas Natural	1.3	0.1	551
Geotermia (Flash)	0	0.1	27
Geotermia (Ciclo Binario y Flash-Binario)	0	0	0

Tabla 1. 2 Emisiones Contaminantes diferentes fuentes térmicas

En conclusión, la energía geotérmica es una solución local, ecológica, sostenible y eficiente para reducir la actual demanda energética y dicho recurso puede aprovecharse en casi cualquier parte del mundo.

1.4.1 RECURSOS GEOTÉRMICOS

Según el Departamento de Energía de EE. UU., establece que un *“recurso geotérmico, es la concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción y potencial es posible”*, esta definición implica que no es un recurso que se obtiene de forma natural como lo es el petróleo, sino que necesita de la acción humana, este concepto es tan amplio que engloba el calor que se encuentra en las capas más superficiales de la corteza hasta el calor que proviene del interior de la tierra como por ejemplo el agua caliente, piedras calientes, entre otros. En el siguiente mapa podemos observar las zonas con mayores probabilidades de encontrar recursos geotérmicos, ver **Fig. 1. 8.**



Fig. 1. 8 Recursos geotérmicos mundiales [2]

Las zonas en donde las condiciones geológicas y geotérmicas son favorables para la extracción de recursos geotérmicos del subsuelo se denominan “yacimientos geotérmicos”, dependiendo de sus atributos, estos yacimientos pueden clasificarse en función de las siguientes características:

- a) Naturaleza del fluido dominante (agua caliente o vapor).
- b) Concentración de componentes químicos.
- c) Componente dominante en la fase gaseosa.
- d) Entalpía del fluido.
- e) Descarga superficial de calor.
- f) Naturaleza de las rocas encajonantes y su permeabilidad.
- g) Naturaleza de la fuente de calor.

La clasificación más común es en función de los niveles energéticos que alberga el yacimiento. Pero es de vital importancia conocer que la naturaleza de la fuente de calor presente en los sistemas se divide en cinco tipos de yacimientos geotérmicos: ¹

I. Sistemas hidrotermales

¹ Las Manifestaciones termales en la superficie de la tierra. “El calor de la Tierra”. Rosa María Prol – Ledesma. Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/058/htm/sec_5.htm

También llamados reservorios geotérmicos, son sistemas de agua o vapor muy caliente, donde las condiciones geotérmicas permiten la intrusión de magma en la corteza terrestre que calienta rocas aledañas que al tener contacto con una corriente de agua subterránea se forman acuíferos termales protegidos por una capa de roca sello que presuriza el sistema e impide fugas de energía, ver **Fig. 1. 9**.

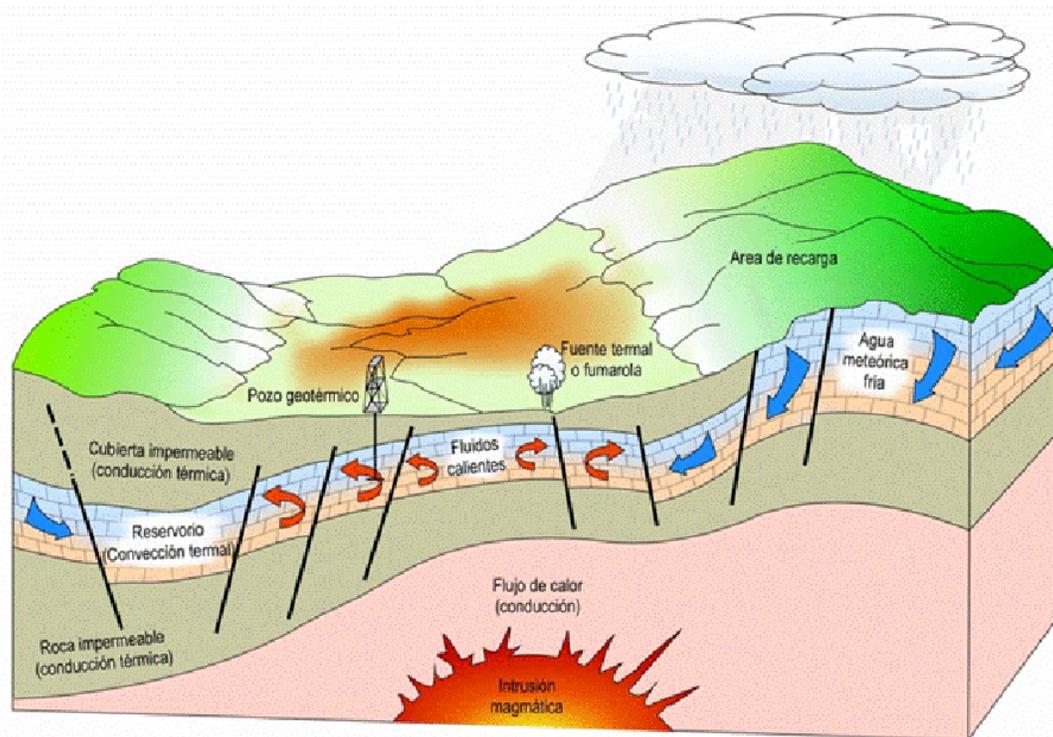


Fig. 1. 9 Representación esquemática del modelo de yacimiento geotérmico [2]

Estos sistemas a su vez pueden clasificarse en función de su temperatura:

a) Yacimientos de muy baja temperatura: menos de 30 °C

Como pudimos apreciar en la **Fig. 1. 8**, casi toda la corteza terrestre a excepción de las masas continentales, forman parte de los yacimientos geotérmicos de muy baja temperatura, ya que en cualquier parte de la superficie de la Tierra es posible captar el calor almacenado para climatización de casas – edificios por medio de bombas de calor, ya que a una profundidad de 5 [m], la temperatura permanece parcialmente constante a lo largo del año, entre 7 – 13 °C, esta variación estará en función del clima de la región, vegetación, estaciones del año, las cuales llegan a afectar la temperatura del subsuelo hasta una profundidad de 10 [m] y del tipo de suelo. A partir de los 15 [m] de profundidad, no hay una dependencia de las variaciones estacionales, ni del clima, sólo de las condiciones geológicas y

geotérmicas. Pero es hasta por debajo de los 20 [m] de profundidad cuando la temperatura aumentara a razón de 3 °C por cada 100 [m].

b) Yacimientos de baja temperatura: entre 30 a 90 °C

Suelen encontrarse en cuencas sedimentarias a una profundidad máxima de 2,000 [m], que no son más que grandes regiones de corteza donde se acumulan sedimentos con espesores de cientos de miles de metros, que durante miles de millones de años han estado comprimidas; para que este recurso sea utilizado, debe guardar un equilibrio entre la permeabilidad del yacimiento y la impermeabilidad en los alrededores, evitando así su pérdida por todo el subsuelo, cabe mencionar que tienen un origen tectónico, con gradientes de temperatura de 3 °C, aunque existen zonas que alcanzan los 5 – 6 °C como la Cuenca Panónica.

c) Yacimientos de media temperatura: entre 90 a 150 °C

Este recurso es albergado por cuencas sedimentarias a una profundidad entre 2,000 – 4,000 [m], en zonas donde la litosfera ha sufrido adelgazamientos y en zonas con elevadas concentraciones de isótopos radioactivos, e inclusive en yacimientos de alta temperatura pero a profundidades de 1000 [m]. Generalmente se encuentran en zonas donde el agua puede ascender a la superficie, por lo que el primer signo de un yacimiento son las manifestaciones geotermales.

Los yacimientos más representativos se encuentran en las cuencas de Alemania, el recurso extraído tiene una temperatura de 97 °C, de una profundidad de 2250 [m], mientras que en Austria, en la cuenca de Haute-Autriche, el agua es extraída a 106 °C de una profundidad de 2300 [m] para una planta termoeléctrica que genera 1 MW.

d) Yacimientos de alta temperatura: más de 150 °C

Se caracterizan por tener fluidos geotermales y rocas calientes a temperaturas que rebasan los 150 °C, localizados a una profundidad de entre 1500 – 3000 [m] y con gradientes de temperatura de hasta 30 °C por cada 100 [m]; estas zonas se localizan principalmente donde existen fenómenos geológicos, como son la alta actividad sísmica, formación de cordilleras, regiones volcánicas y generalmente situadas en los bordes de las placas tectónicas como se muestra en la **Fig. 1. 8**, también están asociados generalmente con los géiseres, fuentes termales y fumarolas, las cuales suelen ser de dos tipos:

- Yacimientos de vapor húmedo: se generan cuando el agua asciende por el pozo de extracción y disminuye bruscamente su temperatura generando enormes cantidades de vapor con la presencia de agua líquida. Un ejemplo es Cerro Prieto en México, Otake en Japón y Wairakei en Nueva Zelanda.
- Yacimientos de vapor seco: se dan cuando la temperatura de estos yacimientos es mayor a la saturación del recurso geotérmico, generando sobrecalentamiento libre de agua líquida, generando vapor seco. Por ejemplo los yacimientos de Larderello en Italia y los Géiseres en California EE.UU.

II. Sistemas de roca seca caliente (HDR)

Conocidos también como sistemas geotérmicos estimulados, actualmente son empleados para generar energía eléctrica siempre y cuando se encuentren poco profundos, el suelo sea permeable y se cuente con un suministro de agua suficiente, de ahí que se les otorgue el nombre de “estimulados”, pues el hombre es capaz de generar corrientes de agua así como hacer que el subsuelo sea permeable de forma artificial por medio de un proceso llamado hidrofracturación generalmente usado para la producción de gas, ver Fig. 1.

10.

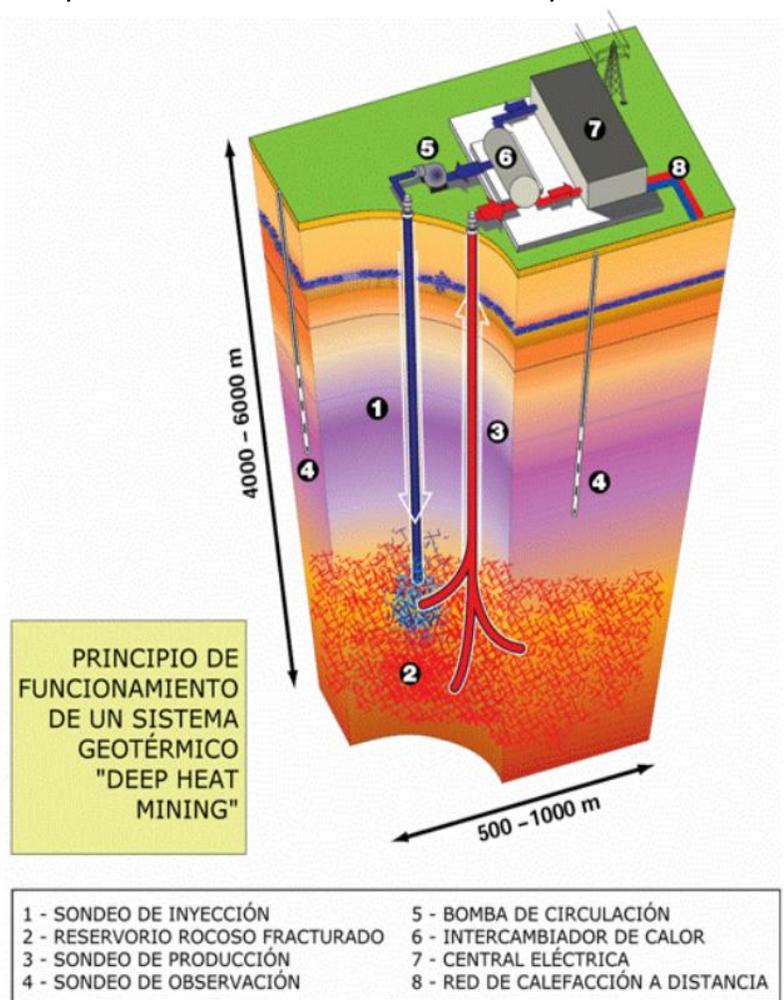


Fig. 1. 10 Esquema de un sistema Geotérmico Estimulado [2]

III. Sistemas marinos

Son sistemas de agua muy caliente que se encuentran en el fondo de los océanos, también llamados ventilas hidrotermales, que son fisuras del suelo oceánico de las que sale agua calentada geotérmicamente, se encuentran cerca de sitios volcánicos activos, esta agua sale en forma de géiser submarino a temperaturas mayores a 300 °C, las ventilas hidrotermales se encuentran a profundidades mayores de 1500 [m] donde el

agua que sale de las ventilas se encuentra cargada de minerales, como son sulfatos de hierro y cobre, ver **Fig. 1. 11.**

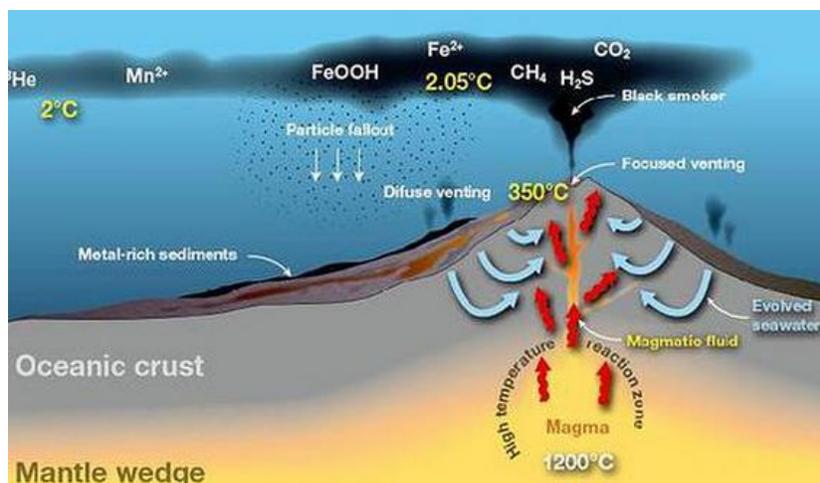


Fig. 1. 11 Esquema Ventila Hidrotermal [Fuente: Oceanografía Geológica, UABCS]

Actualmente se propone utilizar esta fuente calorífica para activar ciclos binarios de generación de energía eléctrica, en el mundo existen cuatro zonas en las que se producen ventilas hidrotermales: Nueva Guinea, Vancouver, Galápagos y en el Golfo de California.²

IV. Sistemas magmáticos

Son sistemas de roca fundida confinada dentro de las cámaras magmáticas de los volcanes, su importancia radica en las elevadas temperaturas a las que se encuentra el recurso geotérmico, que oscilan entre 800 – 1225 °C, lamentablemente, aún no es posible utilizar este recurso debido a que no se cuentan con materiales disponibles en la actualidad, ver **Fig. 1. 12.**

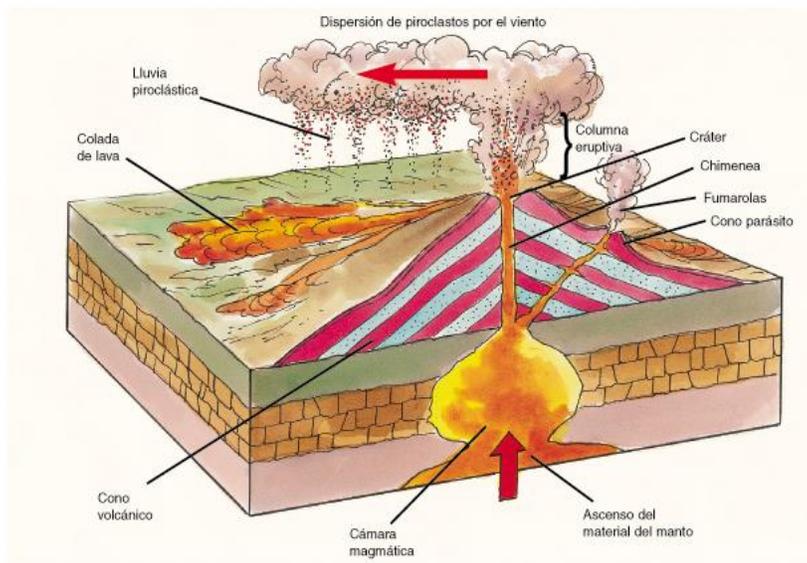


Fig. 1. 12 Corte trasversal de un sistema magmático

² “Ventilas Hidrotermales”. Disponible en: <http://www.puma.unam.mx/festival/index.php/ventilas-hidrotermales>

V. Sistemas geopresurizados

Dentro de los sistemas geopresurizados el agua se encuentra sometida a elevadas presiones, en nuestro país se encuentran a lo largo del Golfo de México, también en Luisiana, Texas y Hungría; Pueden localizarse en áreas no termales, que son superficies con gradientes de temperatura que varían de 10 a 40 °C por kilómetros de profundidad, en algunos lugares se encuentran a 6000 [m] de profundidad a presiones que van de 40–90 % de la presión hidrostática correspondiente a dicha profundidad.

Se cree que los campos presurizados se deben al hundimiento de fallas en crecimiento con bolsas de agua atrapadas que soporta el peso de las capas superiores, teniendo presiones de hasta 871 atmósferas en el fondo.

Estos campos son versátiles ya que pueden generar energía de tres formas: “*térmica*” debido a la temperatura del fluido, “*hidráulica*” por la presión del vapor de agua y “*química*” por el poder calorífico del gas metano asociado a este tipo de yacimientos.

1.5 USOS DIRECTOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Actualmente los yacimientos geotérmicos que son empleados principalmente para la generación de energía eléctrica y con fines térmicos, es importante recalcar que los usos están directamente relacionados con la temperatura del recurso geotérmico.

1.5.1 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Generalmente los yacimientos de alta temperatura son utilizados para la generación de energía eléctrica mediante turbinas de vapor convencionales utilizadas en ciclos Rankine y mediante plantas de ciclo binario. Utilizan el recurso geotérmico como fuente de calor motriz, así que en la medida que disminuye el nivel energético del recurso, disminuye el rendimiento de la planta. Existen tres tipos de plantas geotermoeléctrica, donde su funcionamiento depende de las características y naturaleza del fluido geotérmico: ³

- **Plantas de vapor seco:** el fluido geotérmico llega a la superficie es vapor ligeramente recalentado (vapor seco), por lo que este vapor se introduce directamente a la turbina que acciona el generador eléctrico.
- **Plantas flash:** el fluido geotérmico llega a la superficie es una mezcla vapor – líquido a una presión que depende del pozo y los cambios bruscos de temperatura que sufre el recurso al ascenso, por lo que es

necesario contar con separadores de vapor – agua, donde sólo el vapor es conducido a la turbina para generar electricidad.

- **Plantas de ciclo binario:** este tipo de plantas son implementadas cuando la temperatura del recurso geotérmico no es demasiado alta o el fluido geotérmico contiene alta cantidad de sales disueltas, por lo que es necesario utilizar un fluido secundario, normalmente orgánico que se caracterice por tener un bajo punto de ebullición a alta presión.

El fluido geotérmico transfiere su calor al fluido secundario a través de un intercambiador de calor, el fluido es vaporizado, y es este vapor el que acciona turbina, posteriormente es enfriado (condensado), cerrando así el ciclo.

1.5.2 USOS TÉRMICOS

Debido a la alta disponibilidad geográfica de los recursos geotérmicos de baja y media temperatura, hoy en día existen diversas aplicaciones que aprovechan la energía del recurso geotérmico de manera directa, este uso se remonta a tiempos antiguos, por lo que las aplicaciones más comunes son: balneología, calefacción residencial, agricultura, acuicultura y usos industriales. Actualmente la utilización directa de la energía geotérmica se utiliza en dos ámbitos.

I. Sector Industrial

Es posible utilizar los recursos geotérmicos dentro de la industria, debido a que sus instalaciones son de gran tamaño lo que implica un elevado consumo de energía para llevar a cabo procesos de calefacción, evaporación, secado, esterilización, destilación, descongelamiento, extracción de sales, entre otros. Dentro de las industrias que actualmente utilizan los recursos geotérmicos destacan: industria papelera, industria textil, industria agroalimenticia. Por lo que los usos más comunes de recursos geotérmicos de baja entalpia son:

a) Invernaderos

El uso más común de la energía geotérmica de baja entalpia es en la agricultura, donde los fluidos geotermiales son aplicados en sistemas de calefacción y refrigeración que en conjunto con los sistemas de riego controlado se crean condiciones de temperatura y humedad ideales en lugares que no los poseen de manera natural e incluso fuera de estación, entre las ventajas que aporta un invernadero se encuentran:

- Producción de especies “*no naturales*” de la zona.

- Elección de la época de siembra en función de las demandas del mercado.
- Aumento del número de cosechas y abundancia de los frutos.
- Disminuyen las pérdidas de cosechas debido a parásitos y enfermedades.

El rango de temperaturas utilizado para aumentar el rendimiento de cultivos oscila entre los 40 °C para el calentamiento de suelos, hasta 80 – 90 °C para crear corrientes convectivas en circuitos secundarios que calentarán el ambiente dentro del invernadero, ver **Fig. 1. 13**.

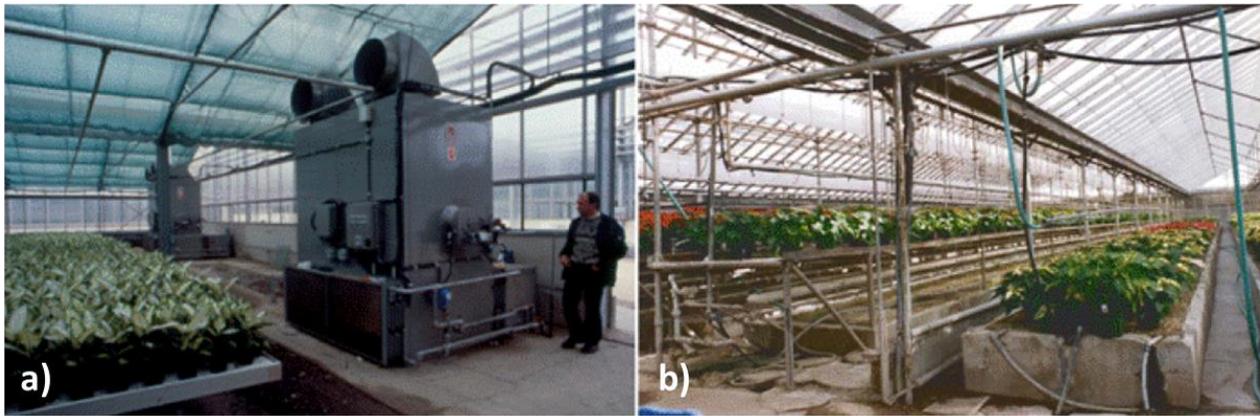


Fig. 1. 13 Calefacción de invernaderos [4]

Entre los países que han aprovechado recursos geotérmicos de baja – media temperatura en la agricultura protegida destacan: EE. UU. (Boise, Idaho), Grecia (Negrita), Australia, Nueva Zelanda, entre muchos otros que se suman año con año, ya que cerca de las dos terceras partes de la capacidad total instalada a nivel mundial (aproximadamente 2,020 MW_t instalados en el 2005) es utilizada en los sistemas de calefacción de invernaderos.

En la siguiente **Fig. 1. 14** se muestra el invernadero más grande del mundo climatizado con energía geotérmica, situado en Nueva Zelanda, consta de una estructura acristalada de 50,000 m², se encuentra encima de una planta de generación de energía geotermoeléctrica.



Fig. 1. 14 Invernadero Geotérmico más grande del mundo en Mokai, Nueva Zelanda [2]

b) Acuicultura y crianza de animales

Otra aplicación de los recursos geotérmicos de baja y media temperatura se encuentra en la climatización de instalaciones donde se crían diversas especies de peces y mariscos, tanto de agua dulce como salada, con fines comerciales, ver **Fig. 1. 15**.

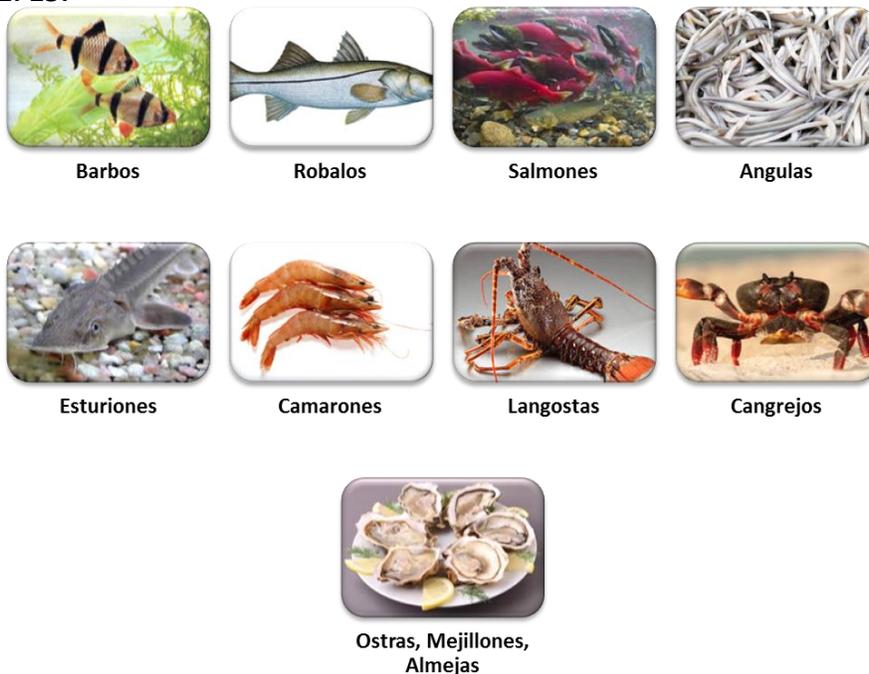


Fig. 1. 15 Principales especies criadas en piscifactorías

Es importante mencionar que casi todas las especies marinas requieren de temperaturas constantes para su adecuada crianza, sensibles a variaciones de temperatura que pueden llegar a favorecer e incluso perjudicar el crecimiento de las especies hasta en un 35 % en peces y crustáceos. Es por esto que la temperatura del recurso geotérmico será determinante para dimensionar la capacidad así como la especie a criar, al ser tan sensibles es necesario instalar un proceso previo de intercambio de calor geotérmico a un circuito que es el que alimenta los tanques y piscinas, que se encuentran entre 20 – 30 °C, por lo que en lugares fríos como Idaho (EE.UU.) se requiere una temperatura del recurso geotérmica entre 45 – 60 °C.

Dentro de los criaderos más importantes destacan una producción de 70 toneladas al año de esturión en Gironde (Francia), así como una granja de caimanes en Colorado (EE.UU.), ver **Fig. 1. 16**, que vende caimanes vivos, carne y pieles de calidad superior a los criados de forma natural, ya que en estas granjas pueden llegar a medir hasta 2 [m] en 3 años, lo que significa un crecimiento casi del 70 % mayor al conseguido naturalmente. Pero no sólo especies animales pueden criarse en piscinas sino también gran variedad de algas con un enorme aporte vitamínico y de gran demanda en países occidentales. [2]



Fig. 1. 16 Granja de caimanes climatizada con recurso geotérmico [2]

c) Otras aplicaciones de la Geotermia.

Una área de los usos de la geotermia es el secado de productos agrícolas (cereales, tubérculos, frutas y verduras), carnes, pescados y hoy en día también para el secado de maderas finas. Con el secado de alimentos es necesario evitar la descomposición biológica de éstos, que una vez secados es posible almacenarlos por largos periodos de tiempo. El proceso se lleva a cabo dentro de sistemas de convección con aire caliente, mediante

un previo intercambio de calor de aguas geotermales dentro de un intercambiador de placas planas, donde es el aire que absorbe el calor del agua el que deshidrata los alimentos por lo que es necesario conocer la cantidad de agua presente en los alimentos, ya que en función de esta concentración será necesaria una temperatura específica para cada alimento, generalizando el rango que suelen manejarse en estos deshidratadores oscila entre los 60 – 120 °C.

Para el secado de maderas que se hace de manera natural se requiere de periodos largos de tiempo, mientras que el secado hecho artificialmente conlleva costos altos de producción, debido a que es necesario generar corrientes de aire caliente durante largo tiempo lo que implica quema desmedida de combustibles fósiles; es aquí donde radica la importancia del recurso geotérmico ya que es una fuente de calor barata, ecológica y constante, que de implementarse disminuye la cantidad de emisiones contaminantes y se alcanzan altos índices de rentabilidad dentro de la industria de secado de maderas.

En Nueva Zelanda se encuentra la industria más grande del mundo que utiliza el calor geotérmico para la fabricación de papel, periódico, secado de madera y generación de energía eléctrica, ver **Fig. 1. 17**.



Fig. 1. 17 Complejo industrial de Kowerau, Bahía de Plenty Nueva Zelanda [2]

Si bien no se profundiza en el resto de las aplicaciones es importante conocer la “*versatilidad de las aplicaciones*”, que como se ha mencionado es una de las cualidades más importantes de la energía geotérmica, ya que cualquier proceso industrial que requiera de un tratamiento de calor o vapor de agua podrá beneficiarse del calor que proviene del interior del planeta, ver **Fig. 1. 18**.



Secado y envasado de alimentos



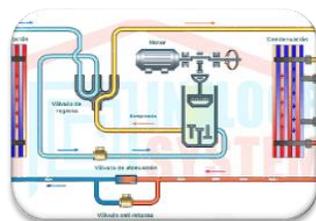
Secado de maderas finas



Industrial del papel



Industria de conservas



Sistemas de refrigeración por absorción



Industria química (extracción de minerales disueltos)



Industria minera (recuperación de metales)

Fig. 1. 18 Industrias que aplican recursos geotérmicos dentro de sus procesos

II. Sector residencial y servicios

Hoy en día 17 países tienen instalados sistemas que utilizan el calor geotérmico para calefacción – refrigeración de edificios y producción de agua caliente sanitaria con grandes instalaciones en países como: Islandia, Polonia, Hungría, Turquía, Japón, China, Rumania y EE.UU. Las instalaciones más grandes se encuentran en Islandia que abastece a una población de 190,000 personas, mientras que en Francia se suministra calefacción a 170,000 hogares lo que da un total de 500,000 personas.

Los sistemas de calefacción consisten en un sistema cerrado, donde al agua geotermal es extraída desde un pozo a más de 1000 [m] de profundidad, donde el agua caliente cede su calor a un circuito secundario, que se hace circular por tuberías que recorrerá un conjunto de edificaciones o conjunto de viviendas proporcionando calefacción y agua caliente sanitaria, por lo que la temperatura del recurso geotérmico oscila entre los 80 – 90

°C, es decir, se trabaja con recurso de baja entalpia. El tamaño de los complejos estará directamente relacionado con la capacidad del acuífero, número de pozos y la capacidad de extraer el recurso.

La entrega final suele realizarse a través de tuberías que no permiten las fugas de calor y están recubiertas de materiales con baja conductividad térmica, con el fin de disminuir al máximo las pérdidas de calor. En los sistemas de calefacción el recurso secundario entra a los radiadores, suelos radiantes, entre otros, ver **Fig. 1. 19**.



Fig. 1. 19 Esquema de un edificio con pilotes intercambiadores de calor [2]

1.6 GEOTERMIA EN MÉXICO

La importancia del estudio de la geotermia en México radica en el enorme potencial y versatilidad de los recursos geotérmicos presentes en gran parte del territorio, se han identificado 1380 manifestaciones termales a lo largo de 27 estados de la república mexicana

Debido a que nuestro país se encuentra al borde de la placa tectónica norteamericana y además alberga un eje volcánico conocido como cinturón de fuego, con gran actividad sísmica y volcánica, propicia que México sea un país rico en recursos geotérmicos.

	PAÍS	MW
1	Estados Unidos	3,389.00
2	Filipinas	1,848.00
3	Indonesia	1,341.00
4	México	1,017.40
5	Italia	875.5
6	Nueva Zelanda	842.6
7	Islandia	664.4
8	Japón	537
9	Kenia	248.5
10	Costa Rica	207.1
11	El Salvador	204.4
12	Turquía	166.6
13	Nicaragua	149.5
14	Rusia	81.9
15	Papúa-Nueva Guinea	56
16	Guatemala	48
17	Portugal (Islas Azores)	28.5
18	China (Incluye Tíbet)	27
19	Francia	17
20	Alemania	11.9
21	Otros	10.7
	TOTAL	11,772.00

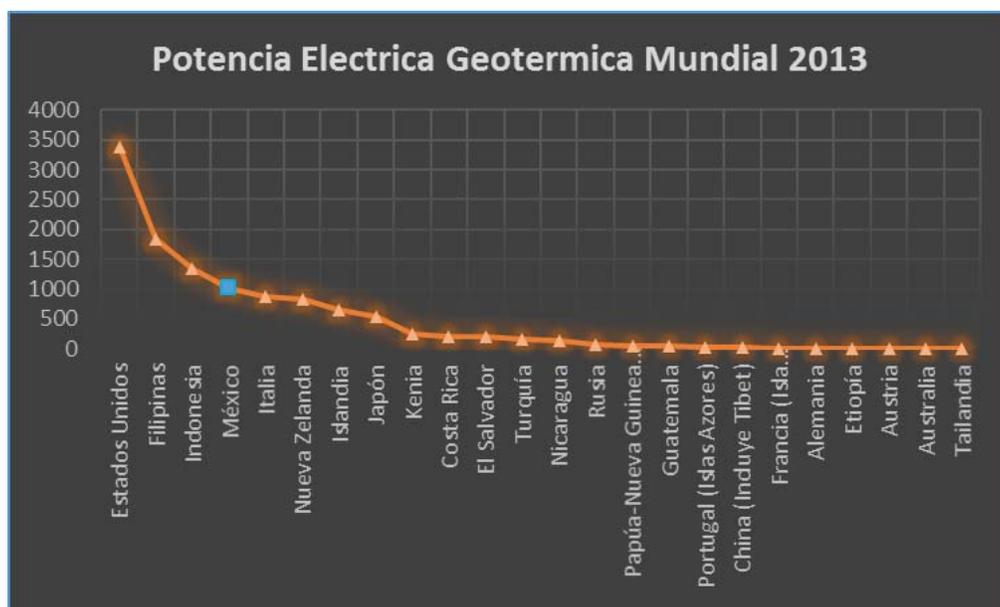


Gráfico 1. 1 Potencia Geotermoeléctrica instalada a nivel mundial, 2013.
[Fuente: Asociación Geotérmica]

Tabla 1. 3 Potencia Geotermoeléctrica instalada a nivel mundial, 2013.

Hoy en día cerca de 80 naciones emplean la geotermia, de éstas sólo 24 naciones la emplean para generar energía eléctrica con una capacidad instalada de 11,772 MW, quedando México en cuarto lugar según datos recabados en el 2013 por la Asociación Geotérmica Mexicana, ver **Tabla 1. 3**. Actualmente sólo cuatro campos geotérmicos son explotados, con una capacidad instalada de 1,017.4 MW, lo que representa cerca del 2% de la capacidad instalada por Comisión Federal de Electricidad (CFE), ver **Fig. 1. 20**:



Fig. 1. 20 Principales campos geotérmicos en México ³

- **Cerro Prieto, Baja California:** debe la manifestación del recurso geotérmico al Sistema de Fallas de San Andrés, cuenta con una capacidad neta de 720 [MW] dividida en cuatro unidades de 110 [MW] más cuatro unidades de 37.5 [MW] siendo éstas las más antiguas por lo que actualmente se encuentran fuera de operación, todas las unidades trabajan a condensación.
- **Los Azufres, Michoacán:** cuenta con una capacidad neta de 194 [MW], constituida por cinco unidades a condensación a flasheo sencillo, una de 50 [MW] y cuatro de 26.5 [MW] mas siete unidades a contrapresión de 5 [MW] cada una, actualmente se encuentra en construcción una unidad de 50 [MW] programada para entrar en operación este año.
- **Los Humeros, Puebla:** con una capacidad instalada de 93.4 [MW], integrada por ocho unidades a contrapresión de 5 [MW] mas dos unidades a condensación de 26.7 [MW], actualmente se encuentra en construcción una unidad adicional de 267 [MW] que entrará en operación en el año 2016.
- **Las Tres Vírgenes, Baja California Sur:** cuenta con 10 [MW] de capacidad instalada, constituida por dos unidades de 5 [MW] cada una, operan a condensación, es decir flasheo simple.

³ México cuarto lugar en producción de Energía Geotérmica, mapa. Disponible en: <http://eleconomista.com.mx/infografias/2014/03/12/energias-renovables-cinco-elementos-como-fuente-poder>

La planta de Cerritos Colorados Jalisco, no cuenta con plantas en operación, sin embargo, cuenta con pozos perforados y un potencial aproximado de 75 [MW], evaluación hecha por CFE. Los Azufres, los Humeros y Cerritos Colorados deben su potencial geotérmico a que se encuentran dentro del eje volcánico con alta actividad, actualmente se han emitido permisos para la generación de energía geotermoeléctrica en el estado de Nayarit.⁴

CONCLUSIONES

Generalmente la presencia de recursos geotérmicos se encuentran asociados a una fuente calor, un fluido de trabajo y una capa sello de roca que presuriza el sistema geotérmico impidiendo así fugas de energía; dependiendo de la cantidad de energía del sistema serán sus usos – aplicaciones. México cuenta con más de 1300 manifestaciones termales presentes en 27 estados del territorio nacional, que actualmente sólo algunas son empleadas en la industria geotermoeléctrica, que a nivel nacional se ha venido frenando su producción.

Actualmente la industria nacional (destiladoras, producción de celulosa, metal – metalúrgica, refrigeración – calefacción para la creación de climas artificiales, etc.) emplea en sus procesos combustibles fósiles de alto costo, bajo poder calorífico e ineficientes que generan emisiones contaminantes que infringen las nuevas normativas ambientales.

En conclusión es necesario el estudio de sistemas capaces de utilizar – transformar de manera eficiente el uso directo de los diversos recursos geotérmicos nacionales como fuente de energía que impulse la economía nacional.

⁴ “Recursos Geotérmicos”. Disponible en:
http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=688

CAPÍTULO 2. INVERNADEROS

En este capítulo se definirá qué es la agricultura así como su evolución a lo largo de la historia, la producción de cultivos hortícolas, el incremento mundial de invernaderos comerciales capaces de modificar los procesos agrícolas y los diversos tipos de invernaderos que hacen posible la creación de ambientes artificiales.

Se plantearán los parámetros mínimos requeridos para el cultivo en invernaderos y analizará el enorme potencial en la implementación de invernaderos en México, debido a su diversidad de ecosistemas y climas que no siempre propician la agricultura convencional. Finalmente, se analizarán las necesidades específicas (pH suelo, temperatura ambiente óptima, plagas y enfermedades, etc.) para el cultivo de jitomate protegido y el papel que juega México como productor y exportador de jitomate a nivel mundial.

2.1 INTRODUCCIÓN

La palabra agricultura proviene del latín: “*agri*” que significa campo y “*cultura*” que significa cultivo, por lo que agricultura es el “*cultivo del campo*”; esta ciencia comprende técnicas y conocimientos para sembrar la tierra, es decir, el conjunto de procedimientos necesarios para transformar el ambiente con el fin de emplear los recursos que la tierra ofrece, para beneficio del hombre.

Debido al crecimiento poblacional, así como la demanda de alimentos, las técnicas de cultivo han evolucionado dando paso al desarrollo de la agricultura protegida y con ella a la construcción de invernaderos. Un invernadero es una construcción agrícola usada para cultivar y proteger cultivos, provisto de una película translúcida generalmente de vidrio o plástico que impide el paso de viento, nieve, granizo, radiación⁵, etc. Generalizando, un invernadero protege a las plantas de las malas condiciones climáticas, lo que permite controlar la temperatura en el interior, con el objetivo de reproducir y simular las condiciones climáticas óptimas para el crecimiento de éstas aún en periodos no naturales aumentando así la producción de cultivos, en comparación a los plantíos al aire libre.

⁵ radiación: haciendo referencia a la radiación que contribuye a la proliferación de virus e insectos y la radiación UV que degrada rápidamente la cubierta plástica. Se hablara de manera más detallada en el Capítulo 3, sección 3.1.3 Tipo de cubierta

2.2 BREVE HISTORIA

Si bien el cultivo de la tierra se remonta al Neolítico (aprox. 8,500 a.C.) extendiéndose por Europa, Egipto, Oriente Medio y el sur de Asia, algunos anales afirman que la agricultura protegida se remonta al Antiguo Egipto, pues esta civilización contaba con estructuras diseñadas para proteger los cultivos de las malas condiciones climáticas que los



Fig. 2. 1 Desarrollo de la agricultura en diversas civilizaciones

Mientras que algunos historiadores señalan que en la gran civilización Greco - Romana ya se cultivaba pepinos bajo placas transparentes donde el cultivo era montado en macetas sobre plataformas móviles, lo que les permitía transportarlas fácilmente, no fue hasta la Edad Media cuando la fabricación de vidrio se extendió por toda Europa y se popularizó en los ventanales de las monstruosas catedrales, haciendo creer a los historiadores que los invernaderos pudieron haber sido el resultado de las múltiples aplicaciones del vidrio.

Existen registros que desde el siglo XVI se protegían los cultivos del frío con linternas, jarrones, armazones de madera y cubiertas de vidrio, pero fue hasta el siglo XVII que se comenzaron a emplear estructuras de madera cubiertas de papel aceitado para mantener el ambiente caliente donde se cultivaban las plantas. Otras fuentes señalan que fue en Inglaterra donde se inició la construcción de techos de cristal empleados para cultivar melón, uvas, duraznos, fresas. Posteriormente estos invernaderos primitivos se convirtieron en extravagantes y exuberantes palacios de cristal que datan de la época Victoriana que hoy en día aún albergan jardines e invernaderos, ver **Fig. 2. 2**.

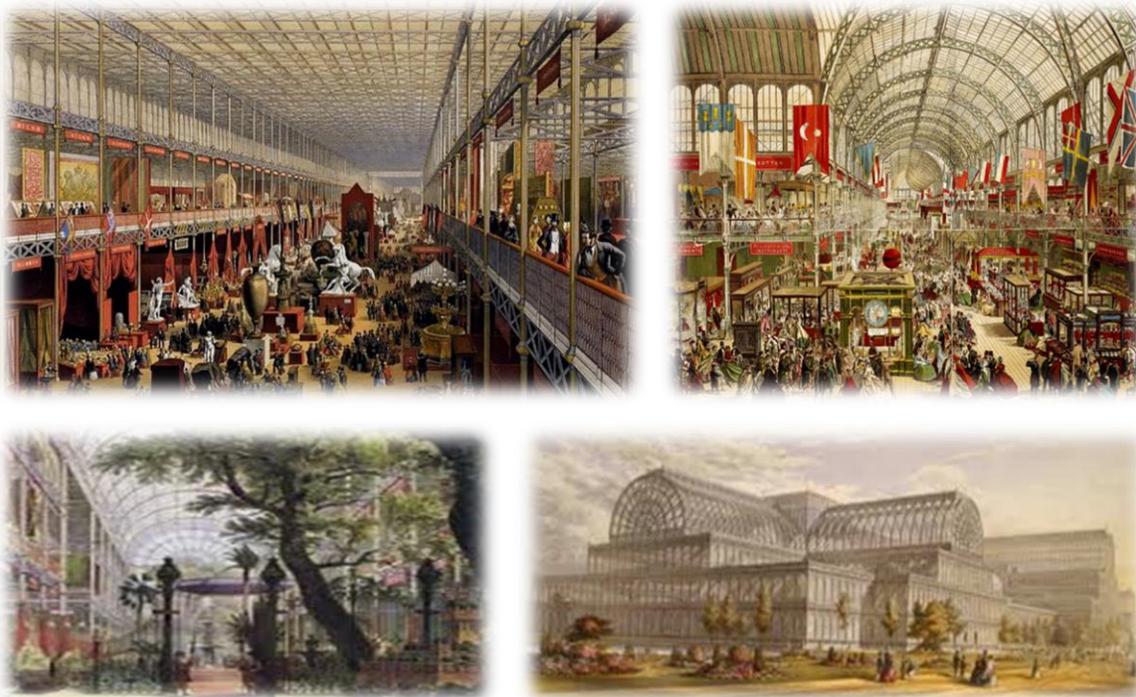


Fig. 2. 2 Palacio de Cristal situado en Inglaterra, en 1851 albergo “La Gran Exposición Universal”

En la Europa del siglo XIX se construyeron los primeros invernaderos hortícolas, llamados así por cultivar plantas que se dan en huertos, es decir, cultivos de riego que se consumen como alimento, principalmente verduras, legumbres y árboles frutales, pues se descubrió que un cultivo dentro de estos invernaderos al suministrarles calor crecía el número de cosechas y abundancia de los frutos. Así comenzó en los países bajos de Europa el cultivo de plantas “no naturales” de la región, que anteriormente sólo crecían en países cálidos, para esto fue necesario crear suelos adecuados para la horticultura dentro de los invernaderos; mientras que los materiales más usados en esa época fueron el vidrio, perfiles angulares y vigas de acero.

Pero fue hasta mucho tiempo después a finales del siglo XIX que se realizaron investigaciones científicas sobre la construcción de invernaderos, redactándose así las primeras normas para la construcción de invernaderos, es ahí donde Holanda lleva la construcción de invernaderos a otro nivel mediante modelos matemáticos y con criterios de calidad arquitectónica. En 1904 Holanda contaba tan sólo con 50,000 m² de invernaderos y para el año de 1970 llegaron a tener aprox. 70, 000,000 m².

En las décadas de 1920 – 1940 se desarrollaron las bases para la producción hidropónica en invernaderos para el cultivo comercial de flores ornamentales, sin embargo fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando comenzó la utilización de materiales plásticos como cubiertas.

En el año de 1948 Emery Myers profesor de la Universidad de Kentucky cubrió un pequeño invernadero con papel celofán de esta manera nace la “*plasticultura*” que es un área de la agricultura que utiliza los plásticos en la producción agrícola, ver **Fig. 2. 3.** [5]



Fig. 2. 3 Utilización de materiales plásticos en la Agricultura Protegida

De esta manera comienza la expansión de invernaderos comerciales con estructuras más baratas que emplean desde cubiertas plásticas rígidas, películas flexibles, hasta mallas y pantallas térmicas, desplazando de esta manera al vidrio y a los aceros. En la última década los invernaderos cobran mayor auge debido al aumento en la demanda de cultivos, hacen que hoy en día los invernaderos sean de mayor tamaño lo que se deriva en una mayor producción de cultivos, un claro ejemplo es Almería en España donde existen más de 300 km² de invernaderos. En 1982 Japón contaba con 260 km² de invernaderos con cubiertas plásticas de las cuales se calcula que 108 km² son destinados al cultivo de frutas.

Actualmente China es el país con la mayor cantidad de invernaderos superando los 7,000 km² es importante mencionar que si bien China cuenta con la mayor extensión superficial, Holanda es el país que cuenta con la tecnología más desarrollada, mientras que España se caracteriza por tener la mayor concentración de invernaderos en una sola región (Almería), ver **Fig. 2. 4**.



Fig. 2. 4 Invernaderos líderes a nivel mundial

- a) Invernadero Holandés.**
- b) Invernadero Español, Almería.**
- c) Invernadero Chino.**

País o Región	Área [ha]	Cultivos (en orden de importancia)
China	360,000	Pepino, tomate, pimiento dulce
España	55,000	Melón, tomate, pimiento dulce
Japón	52,571	Tomate, melón, fresas
Italia	26,000	Tomate, calabaza, pimiento dulce
Corea	21,061	Pepino, repollo chino, tomate
Noreste de África	11,400	Tomate, pimiento dulce, pepino
Turquía	10,800	Tomate, pepino, melón
Holanda	10,800	Tomate, pimiento dulce, pepino
Francia	9,100	Tomate, pepino, fresas
Estados Unidos	5,000	Tomate, pepino, lechuga
Grecia	4,620	Tomate, pepino, berenjena
Medio Este	4,300	Tomate, pepino, pimiento dulce
Alemania	3,300	Tomate, pepino, lechuga
México	3,200	Tomate, pimiento dulce
Canadá	1,470	Tomate, pepino, pimiento dulce

Estimación de la producción de hortalizas en ambientes protegidos, realizada por la Universidad de Florida y publicada por el Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas (IFAS), ver **Tabla 2. 1**.⁶

Tabla 2. 1 Área protegida, estimada para la producción de hortalizas en el mundo. [Fuente: Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas (IFAS) de la Universidad de Florida]

2.3 AGRICULTURA PROTEGIDA

La agricultura siempre se encuentra asociada a riesgos que pueden ser de tipo climáticos, económicos (rentabilidad – demanda del mercado) y limitación de recursos (agua, superficie de cultivo) por lo que ha surgido la necesidad de modificar las antiguas formas de producir alimentos, es así como la agricultura convencional (aire libre) evoluciona a lo que hoy conocemos como agricultura protegida que tiene como objetivo principal mejorar el rendimiento de los plantíos mediante la optimización de recursos.

Se denomina agricultura protegida (AP) al sistema de producción agrícola dentro de estructuras con objetivo de proteger los cultivos de fenómenos climáticos adversos al desarrollo de las plantas, aunque hoy en día la

⁶ Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: estructuras para la Agricultura protegida. Disponible en: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/HS/HS118200.pdf>

tendencia de la agricultura protegida es la producción de cultivos anticipados o fuera de estación, en condiciones totalmente diferentes a las naturales, es decir, de manera artificial.

Es por eso que se han desarrollado: herramientas, materiales, estructuras, semillas mejoradas, fertilizantes más solubles y sistemas de control ambiental que en conjunto generan aumentos en la productividad y la calidad, debido principalmente a que los efectos climáticos ya no limitan el crecimiento de los cultivos; y son los invernaderos el sistema que nos permite combinar todos los elementos antes mencionados para mejorar el desarrollo de las plantas, ver **Fig. 2. 5**.



*Fig. 2. 5 Comparación entre cultivos al aire libre y en invernaderos
a) Cultivo de tomate al aire libre b) Cultivo de tomate en invernadero*

2.4 TIPOS DE INVERNADEROS

Hoy en día un invernadero es una herramienta productiva de alta tecnología caracterizada por contar con una estructura de diversos materiales adicionado de una cubierta generalmente de vidrio o plástico, empleados para proteger cultivos de factores ambientales. El tipo de protección a utilizar está en función de las condiciones climáticas del lugar donde se cultivará, así como de la especie a plantar y la cantidad de recursos disponibles.⁷

⁷ Principales tipos de Invernaderos, Revista infoAgro. Disponible en:
http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/tipo_invernaderos.htm

2.4.1 INVERNADERO CASA SOMBRA

Los invernaderos casa sombra también son conocidos como malla sombra, su estructura es de las más simples, pues consiste en tubos rectos galvanizados y una malla de alambre que será la que sujete la cubierta plástica, se adapta a cualquier tipo de terreno. Este tipo de invernaderos son preferibles en climas templados, ya que por su simplicidad no permiten un control del clima y sobre todo no son aptos en climas lluviosos, debido a que generalmente el agua se acumula en la cubierta formándose bolsas que dañan la estructura y la película plástica, ver **Fig. 2. 6**. Entre sus principales características destacan:

- Es el invernadero más barato y sencillo, su estructura puede ser muy rustica (polines de madera) o muy sofisticada (tubos de acero galvanizado), al igual que su cubierta.
- Uniformidad luminosa.
- Montaje rápido y sin soldaduras, fácil mantenimiento



*Fig. 2. 6 Invernadero casa sombra
a) Estructura acero galvanizado
b) Estructura rustica (madera)*

2.4.2 INVERNADERO TIPO TÚNEL

El invernadero tipo túnel se caracteriza por no tener paredes rectas, es decir, su estructura es totalmente curva, los arcos pueden ser de forma curva u ojival. Está formado por varios módulos en serie fabricados generalmente

de tubos cilíndricos galvanizados lo que posibilita su cambio de posición e instalación, la cubierta suele ser de materiales flexibles pero no presenta inconveniente en ser de tipo rígida lo que puede generar alta resistencia a la lluvia, granizo y nieve, ver **Fig. 2. 7**, entre sus principales características destacan:

- Alta resistencia al viento
- Alto paso de luz solar
- Recomendable para cultivos de bajo – mediano porte (lechuga, flores, frutillas, etc.)
- Reduce considerablemente los problemas por condensación y goteo, debido a su curvatura el agua se desliza por las paredes.

Este tipo de invernaderos están diseñados para ser instalados tanto en pequeñas como en grandes superficies para cultivos de baja altura, son muy económicos debido a que su estructura es simple y resistente.

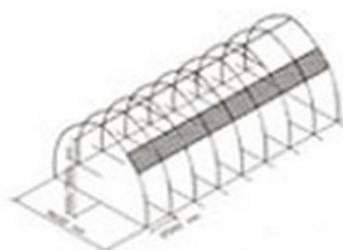
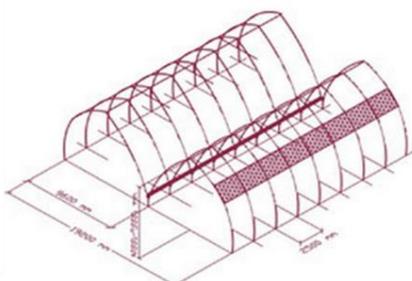


Fig. 2. 7 Invernadero tipo túnel
a) Arco ojival
b) Arco circular

2.4.3 INVERNADERO TIPO CAPILLA

El invernadero tipo capilla también es conocido como multicapilla, su estructura suele ser totalmente metálica mientras que la cubierta está formada por arcos a dos aguas, simples, dentados, curvos y semicirculares.⁵

El ensamble de la cubierta y la estructura se realiza mediante diferentes partes que se unen con grapas, tuercas y tornillos. Este tipo de invernaderos se emplean en climas templados y fríos, aunque realizándole algunas

modificaciones en los sistemas de ventilación se pueden adaptar a casi todas las condiciones climáticas, tienen resistencia a fuertes vientos, ver **Fig. 2. 8**. Entre sus ventajas principales se encuentran:

- Alta estanqueidad a la lluvia y aire, es decir, evita el paso del agua – aire al interior a través de la construcción.
- Buena ventilación y permite la instalación de ventanas tipo cenital así como ventilación perimetral.
- Alta luminosidad en el interior

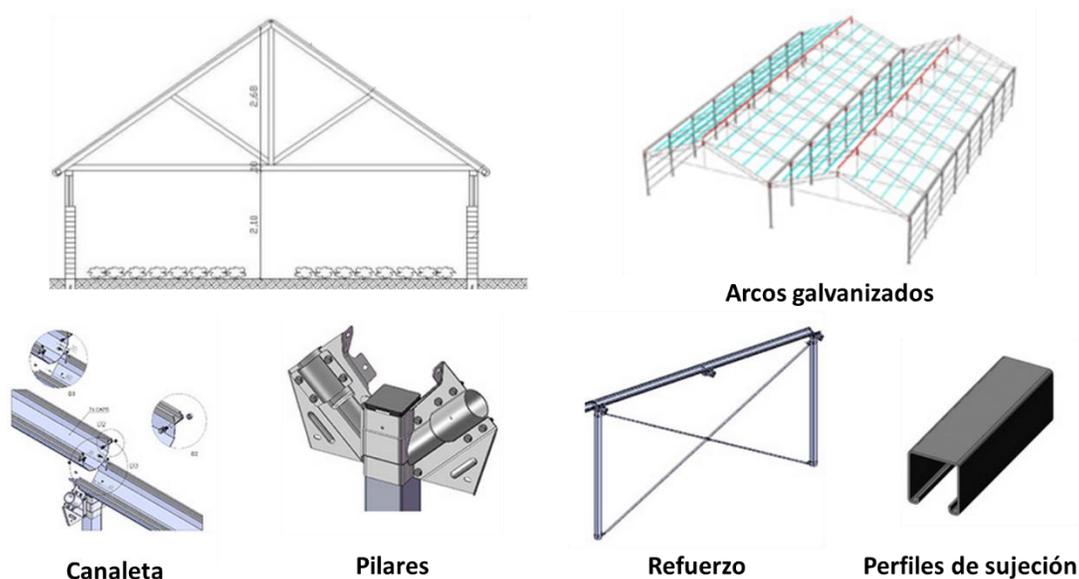


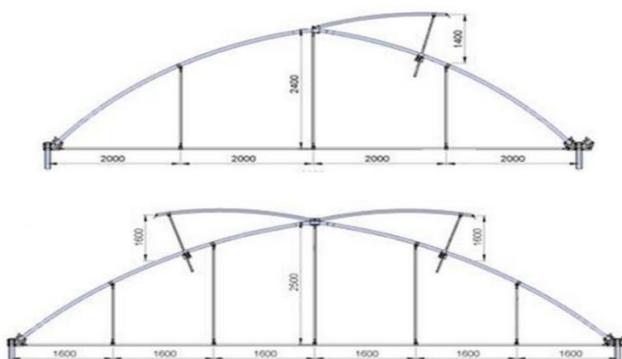
Fig. 2. 8 Estructura de un Invernadero tipo capilla a dos aguas

2.4.4 INVERNADERO GÓTICO

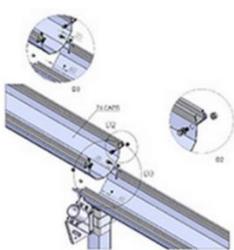
El invernadero tipo gótico es muy similar al tipo capilla su única diferencia se encuentra en la forma del arco, que generalmente suele ser ojival, esta forma permite albergar mayor cantidad de aire mejorando el ambiente dentro del invernadero, suelen utilizarse para cultivos suspendidos. Se caracterizan por ser altamente resistentes a climas extremos, debido a que su estructura soporta elevadas cargas, las naves suelen ser más anchas por lo que permite cultivar mayores superficies, ver **Fig. 2. 9**. Entre sus principales ventajas destacan:

- Alta duración y resistencia a la corrosión, debido a que están contruidos con materiales más resistentes.
- Al tener naves más grandes permite realizar labores agrícolas con maquinaria pesada, como son tractores, cosechadoras, desgranadoras, etc.

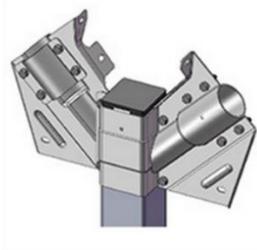
- Mayor ventilación y entrada de luz solar.



Arcos ojivales galvanizados



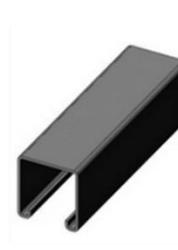
Canaleta



Pilares



Refuerzo



Perfiles de sujeción

Fig. 2. 9 Estructura de un Invernadero Gótico

2.4.5 INVERNADERO ASIMÉTRICO

El invernadero asimétrico es también conocido como invernadero tropical, pues es el más utilizado en regiones cálidas; si bien es muy similar a los anteriores se diferencia debido a que su cumbrera es asimétrica, es decir, uno de sus lados se encuentra más inclinado que el otro.

La inclinación asimétrica de este tipo de invernadero está en función de la incidencia perpendicular de la luz solar al medio día durante el invierno ya que se busca aprovechar la máxima cantidad de radiación solar incidente. Estos invernaderos son diseñados para cualquier tipo de cultivo de clima tropical y climas con temperaturas cálidas y alta humedad, ver Fig. 2. 10.⁵



Arco asimétrico galvanizado

Fig. 2. 10 Invernadero Tropical o Asimétrico

2.4.6 INVERNADERO TIPO VENLO

Los invernaderos tipo venlo son los más empleados en el norte de Europa, conocidos también como Invernaderos Holandeses se caracterizan por contar con una estructura de acero reforzada debido a que su cubierta es de vidrio, el techo suele descansar sobre canales encargados de recoger el agua de lluvia y a su vez los canales descansan sobre una estructura transversal, por lo que este tipo de invernadero suelen ser muy costosos debido a su complejidad, ver **Fig. 2. 11**. Entre sus principales ventajas destacan:

- Alto control de climatización debido a su elevada estanqueidad.
- Se puede cultivar casi cualquier tipo de hortalizas y frutas tropicales, aún en climas adversos (crudos inviernos, nevadas).
- Antiguamente las naves solían ser pequeñas, pero actualmente pueden llegar a tener alrededor de 50,000 m² de superficie cultivada.



Fig. 2. 11 Invernadero tipo Venlo (Holandés) [36]

2.5 PARÁMETROS DE CULTIVO Y DISEÑO DE INVERNADEROS

El diseño de invernaderos debe tener como objetivo principal el óptimo desarrollo de cultivos en donde se garantice una producción de calidad, para ello es necesario tener controles muy específicos en el interior del invernadero.⁸

2.5.1 TIPO DE CULTIVO

Para determinar el tipo de cultivo a sembrar es necesario realizar un análisis de suelo para evaluar las condiciones físicas, químicas y microbiológicas que permitan el adecuado desarrollo de la especie a sembrar; por otra parte es importante indagar en el historial de cultivo del terreno, conocer si hay antecedentes de plagas y enfermedades o actividades que hayan contaminado el suelo. La textura del suelo limitará:

- Capacidad de los vegetales a desarrollar, procesos de enraizamiento. En la **Figura 2. 12** se muestran los principales tipos de suelos.
- Probabilidades de acumular humedad en el ambiente.

⁸ “Curso de Cultivos Protegidos”, David Rodríguez Divas. Disponible en: http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/17025/index.html#



Fig. 2. 12 Textura del suelo, clasificación general.

2.5.2 TEMPERATURA

La temperatura es el parámetro más importante a considerar en el diseño de un invernadero, influye directamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas, por ello es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie a cultivar. Por lo que es indispensable entender los siguientes conceptos:

- **Temperatura mínima letal:** es aquella temperatura a la cual comienzan a producirse daños en la planta.
- **Temperaturas máximas y mínimas biológicas:** son valores que de sobrepasarse podrían afectar directamente los procesos de desarrollo del cultivo, como son el enraizamiento, floración, etc.
- **Temperaturas nocturnas y diurnas:** son valores que deben mantenerse dentro del invernadero para garantizar el confort del cultivo, de esta manera se asegura el óptimo desarrollo, ver **Tabla 2. 2**.

Especie	Temp. Min. letal [°C]	Temp. Min. biológica [°C]	Temp. Óptima [°C]		Temp. Max. biológica [°C]
			Noche	Día	
Tomate	-2 a 0	8 – 10	13 – 16	22 – 26	26 – 30
Pepino	0	10 – 13	18 – 20	24 – 28	28 – 32
Melón	0	12 – 14	18 – 21	24 – 28	30 – 34
Pimiento	-2 a 0	10 – 12	16 – 18	22 – 28	28 – 32
Berenjena	-2 a 0	9 - 10	15 – 18	22 - 26	30 – 32

Tabla 2. 2 Exigencias de temperatura de diversos cultivos [4]

⁹ **Precocidad:** edad en que la planta comienza a producir frutos

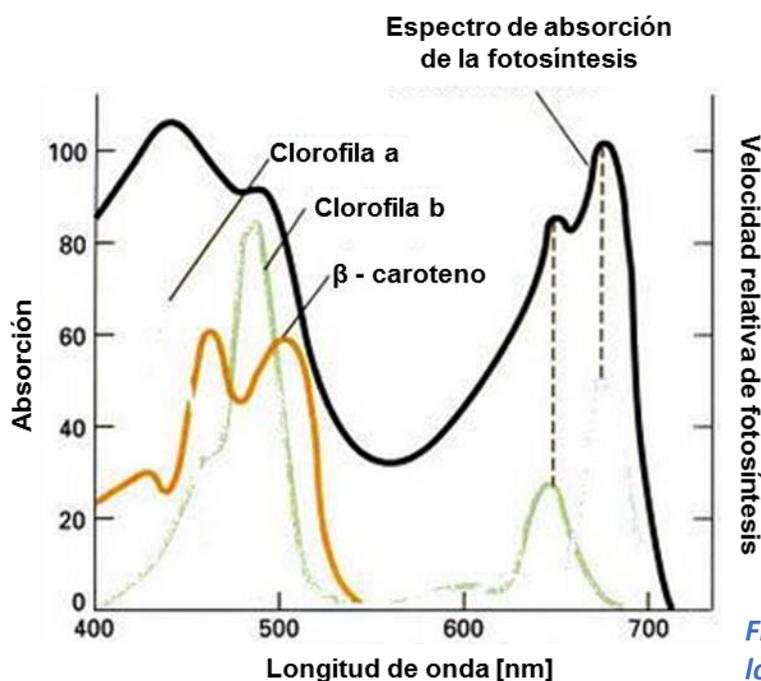
Es importante recalcar que la temperatura dentro del invernadero estará en función de varios parámetros como son: cantidad de radiación que reciba el invernadero, cantidad de humedad, aireación, actividad fotosintética y transpiración del cultivo. [6]

2.5.3 RADIACIÓN SOLAR

Como ya se mencionó en párrafos anteriores la temperatura dentro del invernadero depende de la cantidad de radiación solar recibida, este proceso se produce cuando la radiación pasa a través de la cubierta transformándose en energía que se transmite al interior en forma de calor. Pero esta transformación de energía es útil sólo si favorece a los procesos de crecimiento y adecuada luminosidad del cultivo.

Específicamente la cantidad de radiación interviene con los siguientes procesos fotosintéticos, ver **Fig. 2. 13**:

- Metabolismo vegetal, es decir, la actividad estomática que es la encargada de regular el intercambio gaseoso así como la transpiración de la planta.
- Tasa fotosintética, es la cantidad de CO_2 que se incorpora al vegetal en un determinado periodo de tiempo y es único para cada tipo de cultivo.
- Secreción hormonal inadecuada puede afectar el metabolismo celular, crecimiento y desarrollo de los órganos de la planta.



Por otro lado un exceso de radiación solar podría generar quemaduras en los cultivos tanto externas como internas, generando oxidación de los tejidos, generalmente provocada por fotosíntesis excesiva que se suscita cuando se sobreexcitan las moléculas de clorofila, que de forma análoga en los humanos es llamado golpe de calor.

Fig. 2. 13 Actividad fotosintética a diferentes longitudes de onda [43]

2.5.4 HUMEDAD

La humedad del aire se debe a la abundancia de vapor de agua presente en éste, mientras que la humedad relativa es la relación que existe entre la cantidad de agua contenida en el aire entre la que tendría si estuviera completamente saturado a la misma temperatura, por lo que mientras más se acerque al 100 % más húmedo estará el aire.

Cada especie vegetal tiene una humedad relativa ambiental idónea, que permite mantener un adecuado régimen hídrico en las plantas, de lo contrario podría presentarse daño celular, caída de hojas y marchitez, ver **Tabla 2. 3**; básicamente la cantidad de humedad en el ambiente modera el proceso de evapotranspiración de las plantas que consiste en la transportación de nutrientes, la capacidad de la planta de mantenerse refrigerada y la tasa de crecimiento. ⁷

Especie	Temp. optima del suelo [°C]	Humedad Relativa [%]
Tomate	15 – 20	55 – 60
Pepino	20 – 21	70 – 90
Melón	20 – 22	60 – 80
Judía	15 – 20	–
Pimiento	15 – 20	65 – 70
Berenjena	15 – 20	65 - 70

Tabla 2. 3 *Valores de humedad adecuados para cultivos en invernadero [39]*

Es importante recalcar que un elevado índice de humedad relativa genera proliferación de plagas – enfermedades en el cultivo, modifica el rendimiento de frutos debido a que la plantas reducen su transpiración propiciando que se reduzca el crecimiento y en consecuencia abortos florales; mientras que si el índice de humedad relativa es bajo, las plantas transpiran en exceso y se produce deshidratación.

2.5.5 VENTILACIÓN

La ventilación es también conocida como aireación, si bien es necesario que la atmósfera dentro de un invernadero se mantenga estable, es indispensable que exista una renovación constante del aire al interior ya que influye directamente en el clima del invernadero, humedad, así como en el desarrollo y crecimiento de los cultivos; la más utilizada es a través de las paredes laterales y frontales por medio de ventanas individuales. La ventilación puede ser:

a) **Ventilación Natural:** es también conocida como pasiva o estática, no utiliza energía auxiliar sino que se basa en una diferencia de presiones provocada por el viento sobre la cubierta creando zonas de presión y la diferencia de temperatura. Frecuentemente la ventilación lateral es complementada mediante ventilación cenital.

b) **Ventilación Forzada:** también conocida como mecánica, permite un mejor control de la temperatura dentro del invernadero con el inconveniente de consumir energía eléctrica, su principio se basa en crear un flujo de aire donde los ventiladores extraen el aire mientras que las ventanas permiten el paso del aire.

Una mala aireación provoca exceso de calor, la composición del aire se ve afectada con un déficit de CO_2 en la atmósfera y oxígeno esencial en el proceso de respiración de las plantas que tiene lugar en el sistema radicular¹⁰, generándose así anoxia también conocida como asfixia radicular, ésta se suscita cuando el agua desplaza el oxígeno del suelo limitando la capacidad de respirar.

El fenómeno de anoxia es más frecuente en verano; debido al aumento en la temperatura se incrementa la respiración de las plantas provocando caída de flores y frutos, propagación de hongos y clorosis¹¹, ver **Fig. 2. 14**. Mientras que en los meses fríos se genera un exceso de humedad, lo que favorece la condensación y goteo, que puede generar mala transmisión de radiación solar y favorecer la propagación de enfermedades.

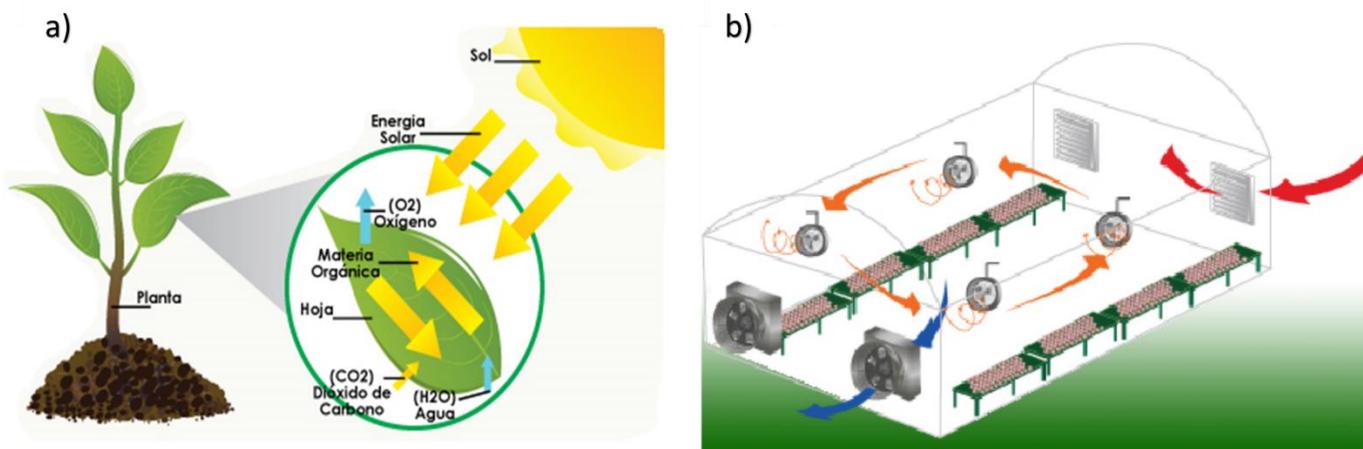


Fig. 2. 14 Ventilación natural y forzada
a) Procesos de respiración y fotosíntesis de las plantas.
b) Sistema de aireación.

¹⁰ **Radicular:** conjunto de raíces de la planta
¹¹ **Clorosis:** las hojas tienden a tornarse amarillas

Especie	Temp. óptima del suelo	CO ₂ (ppm)	Humedad Relativa [%]
Tomate	15 – 20	1000 – 2000	55 – 60
Pepino	20 – 21	1000 – 3000	70 – 90
Melón	20 – 22	–	60 – 80
Judía	15 – 20	–	–
Pimiento	15 – 20	–	65 – 70
Berengena	15 – 20	–	65 – 70

Tabla 2. 4 Valores óptimos de temperatura, enriquecimiento CO₂ y humedad relativa [39]

Una adecuada ventilación mejora la calidad de las cosechas, por lo que actualmente es común que dentro de la agricultura protegida se enriquezca con CO₂ la atmósfera del invernadero, como consecuencia aumentará de 19 – 25 % la producción hortícola ver **Tabla 2. 4** y **Grafico 2. 1**.

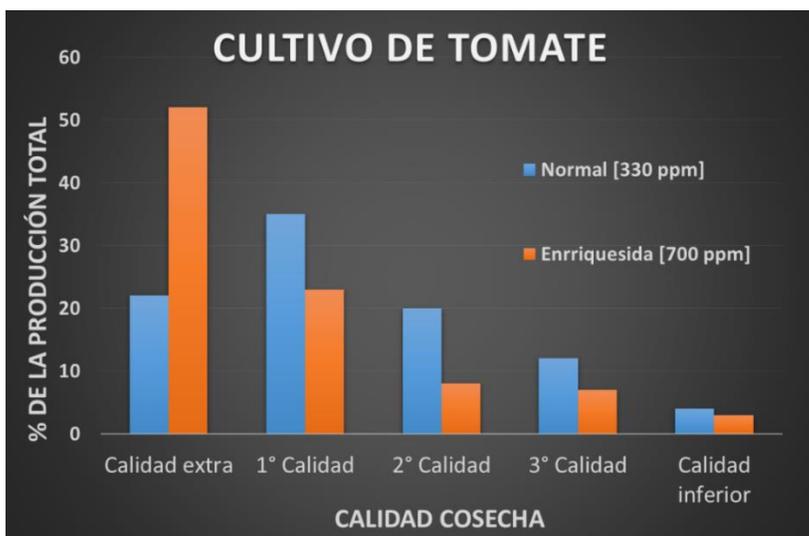


Grafico 2. 1 Cultivo de tomate enriquecido con CO₂ [7]

2.5.6 CALIDAD CULTIVO

En México la calidad de la cosecha se clasifica según la norma **NMX – FF – 031 – 1997 –SCFI** en las siguientes categorías:

- México 1. También conocida como calidad suprema o extra, deben presentar uniformidad en cuanto al grado de madurez, coloración, tamaño, bien formados, suaves y exentos de cualquier daño.
- México 2. Comúnmente llamada de primera calidad a todos aquellos tomates razonablemente bien formados, ligeramente suaves y que no presenten daños severos.
- México 3. Mejor conocido como de segunda calidad, son aquellos que sólo cumplen las especificaciones mínimas, pueden estar malformados, no muy suaves y no presentar daños severos.
- México Combinación. Consiste en la combinación de los tomates de calidad México 1 y México 2, de forma tal que al menos el 60% de la cantidad total cumplan con los requerimientos de México 1.

2.6 INVERNADEROS EN MÉXICO Y SU POTENCIAL

México se encuentra ubicado dentro de las zonas tropicales y subtropicales del hemisferio norte con una extensión aprox. de 2 millones de [km²], cuenta con una gran diversidad de relieves, zonas volcánicas, llanuras, cordilleras, penínsulas y océanos (Pacífico y Atlántico) que en conjunto forman los climas que predominan en el país dividiéndose en tres categorías, ver **Fig. 2. 15**:



*Fig. 2. 15 Grupos y subgrupos de climas en México*¹²

¹² Mapa climas en México. Disponible en:
http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80

1. CÁLIDOS

- Cálido húmedo
- Cálido subhúmedo

2. SECOS

- Seco
- Muy Seco

3. TEMPLADOS

- Templado subhúmedo
- Templado húmedo

Así que no debe sorprendernos que en México existan climas fríos de alta montaña hasta calurosos y desérticos, siendo Durango el estado de la república donde se presentan las temperaturas más bajas de hasta $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$, las más altas en Mexicali que en ocasiones supera los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura en las zonas cálidas oscila entre los $15 - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en las zonas templadas ronda entre los $10 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. México alberga a más del 10 % de la biodiversidad de todo el mundo, con más de 200,000 especies diferentes de flora y fauna, actualmente se cuenta con más de 733 especies de reptiles, 448 especies de mamíferos, 290 especies de anfibios y 26,000 diferentes especies de plantas, ver **Fig. 2. 16**.



Fig. 2. 16 Flora y fauna Mexicana

Es debido a esta gran biodiversidad de climas, flora, fauna y ecosistemas que México tiene un gran potencial, ya que es posible cosechar un sin fin de productos agrícolas a lo largo de todo el territorio nacional, lamentablemente gran parte de las extensiones de cultivos son sólo utilizados durante el periodo de cultivo primavera – verano, desperdiándose de esta manera la riqueza de nuestro país. Es así como nace la necesidad de adoptar sistemas de cultivo alternos, siendo el Estado de México el pionero en la instalación de invernaderos comerciales hechos de concreto, herrería y cristal, que fueron instalados por emigrantes Alemanes y Japoneses con las familias Matsumoto y Barto.

Para la década de 1970 la Comisión para el Desarrollo de las Zonas Marginadas (COPLAMAR) promovió la construcción de invernaderos rústicos hechos de madera y plástico; mientras que las grandes empresas como Rosemex, Summa y Flora implementaban el uso de fibra de vidrio y estructuras metálicas livianas. [5]

En la década de 1980 comenzó el auge en el desarrollo de invernaderos para el cultivo de flores, árboles, arbustos, hortalizas por diversas empresas instaladas hoy en día en el sur del Estado de México, caracterizándose por adoptar principalmente invernaderos tipo capilla a dos aguas con ventilación cenital.

Para la década de 1990 en todo México ya existían un sin fin de invernaderos modernos caracterizados por utilizar estructuras livianas y cubiertas plásticas que vinieron a sustituir a las láminas de fibra de vidrio – cristales, además de la implementación de sistemas de riego y control climático automatizados.

Pero es hasta el año de 1995 debido a la crisis económica, que surge la necesidad de invertir en proyectos rentables y redituables, con el objetivo de impulsar la economía nacional siendo la prioridad el cultivo de hortalizas principalmente en los estados de Sinaloa, Sonora, Baja California y Jalisco.

En la última década debido a la baja fertilidad de suelos, propagación de plagas y enfermedades, así como las altas temperaturas y falta de agua, el sector agrícola convencional (cultivos al aire libre) se ha visto afectado gravemente dando pauta al desarrollo de la agricultura protegida.

En el 2008 México contaba con más de 8,934 hectáreas de invernaderos sin contar los invernaderos tipo túnel (2,000 ha) y los invernaderos donde se cultivan flores (850 ha), donde 75 % de la superficie total la representan

los estados de Sinaloa, Baja California, Baja California Sur y Jalisco, mientras que la zona centro de la república representa menos del 20 %, ver **Tabla 2. 5.**¹

Estado	invernadero	Malla	Superficie Protegida	%
Sinaloa	850	1650	2500	28.0
Baja California	120	1100	1220	13.7
Baja California Sur	400	600	1000	11.2
Sonora	250	740	990	11.1
Jalisco	900	0	900	10.1
San Luis Potosí	260	200	460	5.1
Puebla	250	50	300	3.4
Zacatecas	200	30	230	2.6
Guanajuato	200	0	200	2.2
Coahuila	170	25	195	2.2
Michoacán	140	0	140	1.6
Colima	100	1	100	1.1
Estado de México	100	30	100	1.1
Chihuahua	80	0	80	0.9
Oaxaca	70	50	71	0.8
Aguascalientes	35	25	65	0.7
Querétaro	65	10	65	0.7
Quintana Roo	12	0	62	0.7
Yucatán	35	18	60	0.7
Durango	30	0	40	0.4
Nuevo León	33	0	33	0.4
Campeche	15	0	33	0.4
Veracruz	25	0	25	0.3
Tamaulipas	20	0	20	0.2
Hidalgo	20	0	20	0.2
Tlaxcala	15	0	15	0.2
Tabasco	5	0	5	0.1
Guerrero	5	0	5	0.1
TOTAL	4405	4529	8934	100

Los principales productos cultivados en invernaderos mexicanos son el tomate (75 %), pimiento (12 %), pepino (10 %), fresas, cerezas, frambuesas, chile habanero, etc.

Se calcula que existe un crecimiento anual de casi un 20%, por lo que se estima que para el 2015 igualaremos en superficie a Almería con 25,983 [ha], debido principalmente a la diversidad climática, así como una mayor disponibilidad de recursos energéticos y un amplio sector comercial que podría abarcar parte importante de la costa oeste de Estados Unidos así como el mercado internacional. [7]

Tabla 2. 5 Superficie nacional de invernaderos y casa sombra [7]

2.7 SELECCIÓN DE CULTIVO

México cuenta con una amplia variedad de recursos naturales pero nos centraremos en el potencial que tiene dentro del sector alimenticio, en el 2011 se produjeron los siguientes cultivos, ver **Tabla 2. 6**:

Producto	Producción [ton]
Caña de azúcar	48,764,224
Maíz	20,142,816
Sorgo	6,108,085
Naranja	4,193,484
Trigo	4,116,161
Plátano	2,232,361
Jitomate	2,043,815
Chile verde	1,981,564
Limón	1,966,345
Mango	1,509,272
Papa	1,500,497
Café cereza	1,436,559
Aguacate	1,230,973
Frijol	1,041,350
Cebada	518,850

De los cuales exportamos a diferentes partes del mundo, ver **Gráfico 2. 2**:



Gráfico 2. 2 Exportación de Alimentos, 2011 [38]

Tabla 2. 6 Producción alimenticia anual, 2011 [45]

Información recabada por SAGARPA en el 2011, México ocupó el primer lugar a nivel mundial en exportación de: aguacate, limón, sandia, mango, guayaba, pepino, chile y jitomate, ver **Tabla 2. 7**; mientras que la cerveza mexicana ocupa el 1° lugar en ventas en el extranjero. México exporta jitomate de primera calidad a Canadá, EE. UU., países bajos de Europa, entre otros.

Producto/ Estado exportador	Enero – Septiembre 2011	
	Miles Dólares	Toneladas
Tomate	1,638,576	1,182,671
SINALOA	478,597	357,328
BAJA CALIFORNIA	265,393	187,228
JALISCO	136,451	96,590
PUEBLA	128,272	88,456
BAJA CALIFORNIA SUR	107,690	79,733
RESTO	522,172	373,336

Tabla 2. 7 Estimación de exportación de jitomate por entidades [Fuente: SAGARPA] [38]

Mientras que para el 2012 México produjo 2.1 % de la producción mundial, es decir, **2, 838,370** toneladas de jitomate, posicionándose como el 10° productor mundial de jitomate, la lista es encabezada por China con una producción de **50, 125,055** toneladas equivalente al 31 % de la producción mundial; en los últimos 3 años la producción nacional de jitomate ha aumentado un 44 %, pasando de producir 1.9 a 2.7 millones de toneladas simplemente mejorando las técnicas de cultivo. El principal mercado potencial de jitomate mexicano es Rusia, Alemania y Francia son los más importantes. [8]

Como observamos en la **Tabla 2. 7**, Sinaloa (30.2 %) es el principal exportador de jitomate actualmente exporta el doble de lo que exporta Baja California (15.8 %) que ocupa el segundo lugar, seguido de Jalisco (8.2 %), Puebla (7.5 %) y Baja California Sur (6.7 %), donde todos estos productores y exportadores se caracterizan por cultivar en la modalidad de riego y sólo cultivan entre los ciclos de primavera – verano (P – V) u otoño – invierno (O – I) pero nunca de manera simultánea como en otros países, ver **Fig. 2. 17**.

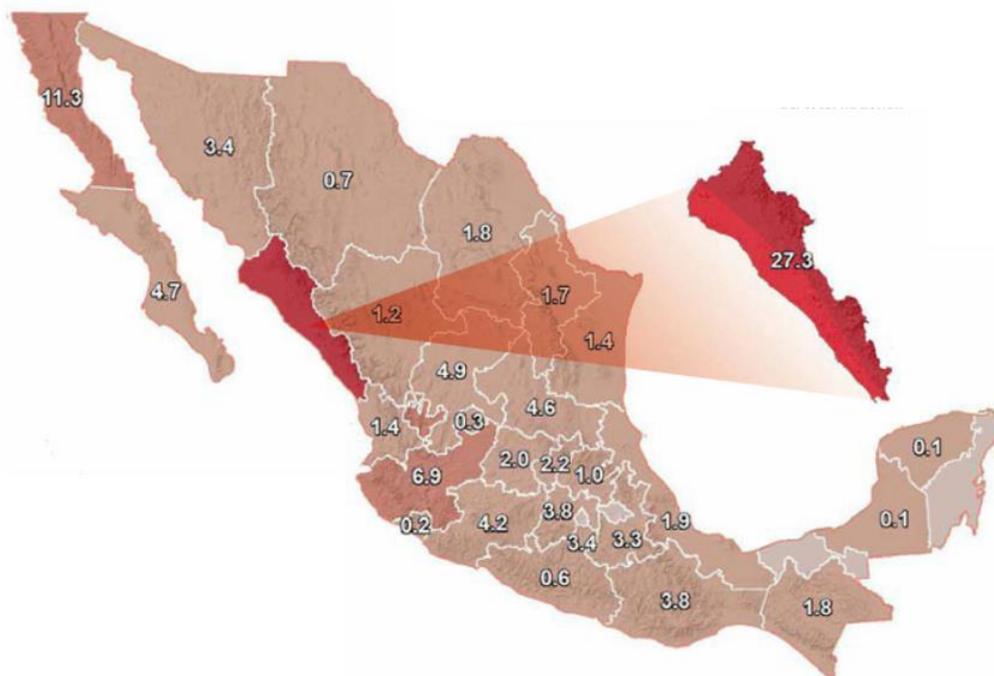


Fig. 2. 17 Producción de jitomate, porcentaje por entidad federativa [8]

Todos los datos antes recabados son indicadores del potencial de producción, exportación y comercialización que tiene el jitomate mexicano reconocido a nivel mundial, ya que es una industria con oportunidades de expansión mediante la optimización de procesos de cultivo, actualmente el jitomate mexicano sólo es cultivado

durante un periodo ya sea P – V u O – I, siendo éste uno de los principales aspectos a optimizar con la implementación de invernaderos.

2.7.1 JITOMATE

El jitomate pertenece a la familia de la “*solanaceae*”, es originario de América del Sur de la región Andina (Perú, Ecuador, Bolivia y Chile), pero su domesticación se dio en México, por lo que la palabra jitomate proviene del náhuatl “*xictli*” ombligo y “*tomatl*” *tomate*, que significa tomate de ombligo, en nuestro país desde el siglo XVI se consume en diferentes formas, colores (rojos hasta amarillos) y tamaños, ver Fig. 2. 18; tiempo después fueron llevados a España e Italia siendo los españoles y los portugueses los que difundieron el uso del jitomate en Oriente, África, Asia y Europa.



Fig. 2. 18 Principales tipos de jitomate

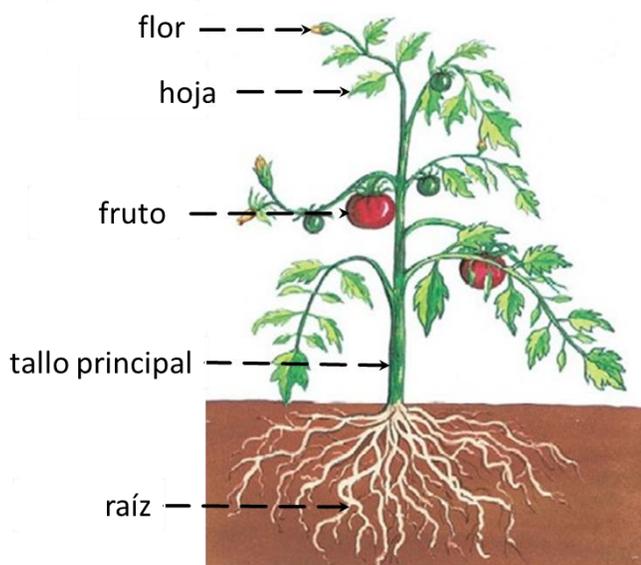


Fig. 2. 19 Morfología de la planta de jitomate

Esta planta se caracteriza por ser un tipo de arbusto de porte recto su fruto es una baya ovalada, su tamaño de sus frutos pueden ser diversos, que van desde el tamaño de una cereza hasta frutos de 0.750 kg. Puede desarrollarse en forma rastrera, semirrecta o erecta, su raíz principal suele ser corta y débil siendo las raíces secundarias la que le brindan soporte pues suelen ser numerosas y potentes, el tallo principal tiene un diámetro entre 2 – 4 cm en él se desarrollan las hojas y tallos secundarios así como las flores y frutos, ver Fig. 2. 19.¹³

¹³ “Jitomate”. Disponible en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/documents/pablo/documentos/monografias/jitomate.pdf>

La planta de jitomate es la hortaliza más cultivada en todo el mundo debido a su contenido de vitaminas, minerales y un alto contenido de “licopeno” compuesto responsable del color rojo en gran parte de las frutas y verduras que tiene propiedades antioxidantes capaces de proteger las células humanas del estrés oxidativo causado por enfermedades cardiovasculares, cáncer y envejecimiento. Previene el síndrome de degeneración muscular, que es la causa principal de ceguera en adultos mayores de 65 años, reduce el riesgo de contraer cáncer de pulmón, próstata y tracto.

2.8 CULTIVO DE JITOMATE CARACTERÍSTICAS Y NECESIDADES

El jitomate en condiciones climáticas adecuadas se caracteriza por tener un alto rendimiento y calidad, entre sus principales parámetros se encuentran la temperatura, humedad relativa (HR), características del suelo,

2.8.1 PARÁMETROS CLIMÁTICOS

- **Temperatura:** la temperatura óptima de desarrollo es de 22 a 24 °C en el día y de 13 a 17 °C durante la noche.
- **Humedad Relativa:** Oscila entre un 60 – 80 %. Una baja humedad relativa produce deficiente fecundación, deformación de frutos y elevada transpiración; mientras que si la humedad relativa es alta afecta el rendimiento, baja calidad del fruto y enfermedades.
- **Suelo:** Puede cultivarse en casi cualquier tipo de suelo, más es preferible cultivar en suelos profundos, margosos, bien drenados, con un pH entre 6.2 – 6.8 y una temperatura entre 18 – 22 °C, ver **Fig. 2.20**. Ya que si la temperatura del suelo se encuentra por debajo de los 15 °C o mayores a 30 °C el área foliar¹⁴ puede disminuir hasta un 50 %. [9]
- **Luminosidad:** Necesita niveles de radiación diaria promedio de $0.85 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right]$, que es la cantidad mínima requerida en los procesos de floración y polinización, al tratarse de un cultivo tan sensibles es indispensable que al menos tenga 6 horas diarias de luz. Cuando la intensidad de luminosidad es adecuada se tiene mayor crecimiento, mientras que si la luminosidad es baja se genera poco crecimiento, plantas débiles, las flores abortan, malformación de frutos, pero si la radiación es demasiada alta se producirá quemaduras y fotosíntesis excesiva.

¹⁴ **Área foliar:** superficie de hoja que una planta posee para interceptar la radiación solar.

- **Ventilación:** Suele ser de forma natural, generalmente se implementa un sistema de ventilación lateral que permite la entrada de aire fresco y cenital que favorece la salida de aire caliente; cuando la ventilación natural no es suficiente para una adecuada aireación es necesario implementar sistemas de ventilación artificial como son: ventiladores y extractores de aire, que a su vez favorecen la polinización.

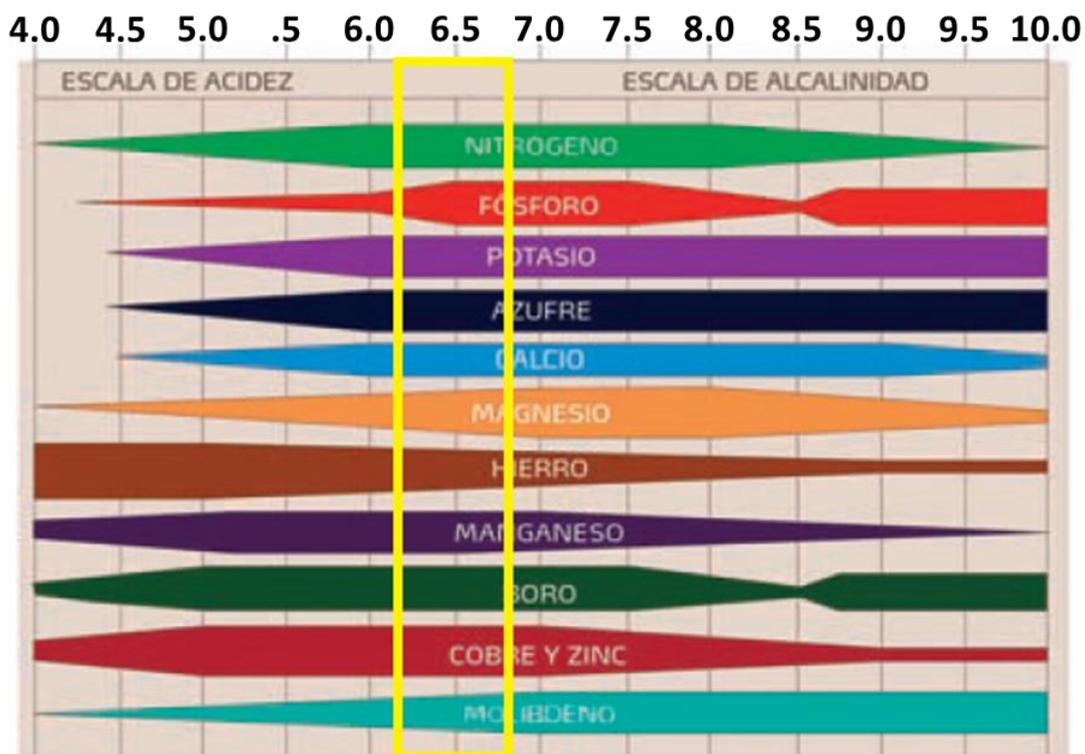


Fig. 2. 20 Influencia del pH sobre la disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo

2.8.2 PARÁMETROS DE NUTRICIÓN Y RIEGO

Si bien los parámetros climáticos son primordiales para el crecimiento y desarrollo óptimo del cultivo de jitomates no son los únicos a considerar, debido a que es necesario mantener un apropiado control de los nutrientes disponibles en el suelo así como un adecuado riego en cada etapa de desarrollo del cultivo. La nutrición de las plantas se lleva a cabo mediante la absorción de básicamente 16 nutrientes, que suelen dividirse en macronutrientes y micro nutrientes, ver **Fig. 2. 21:** [10]

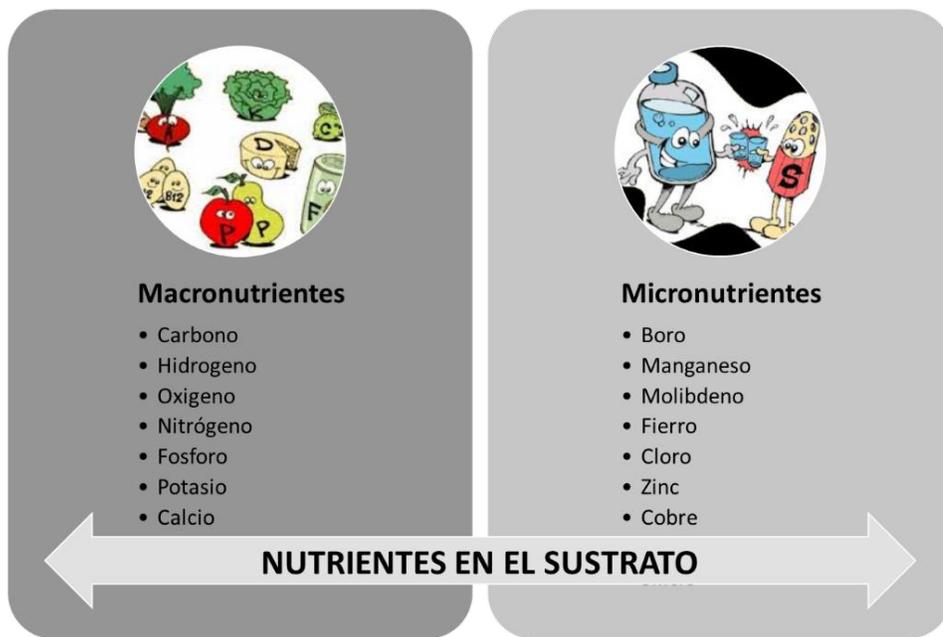


Fig. 2. 21 Principales nutrientes presentes en el sustrato, necesarios para el crecimiento de las plantas.

Los macronutrientes se requieren en grandes cantidades mientras que los micronutrientes se necesitan en pequeñas cantidades, siendo de vital importancia tener un control ya que una insuficiencia provocará una carencia mientras que un exceso causara toxicidad, ver Fig. 2. 22.

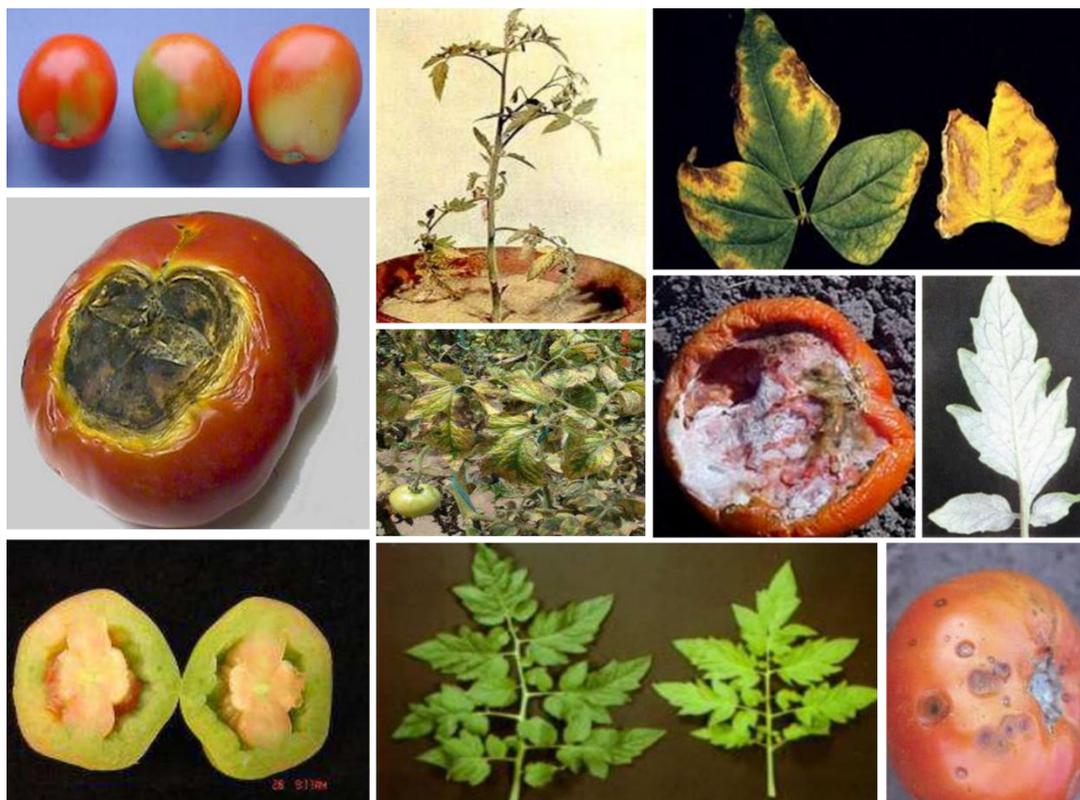


Fig. 2. 22 Principales daños causados al cultivo de jitomates debido al exceso y deficiencias de nutrientes en el suelo.

Para tener una idea más específica de los efectos de los nutrientes en el desarrollo del cultivo se explicaran en la **Tabla 2. 8.** [10]

Nutriente	Fuente	Efectos	
		Favorece	Perjudica
Carbono	Aire – Fotosíntesis	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo estructural • Reacciones enzimáticas • Degradación de compuestos orgánicos que transforma en energía 	<ul style="list-style-type: none"> • Detiene el crecimiento. • Las hojas se tornan blancas y la planta muere.
Oxígeno	Agua del suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Oxigenación de la planta • Absorción de nutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Provoca anoxia, la planta se asfixia ya que se limita la capacidad de respirar, caída de frutos, clorosis.
Hidrógeno	Fijación simbiótica, suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Reacciones electromagnéticas, balance entre cargas eléctricas a través de membranas 	<ul style="list-style-type: none"> • Favorece la deshidratación. • Descompensan los intercambios a través de las membranas celulares.
Nitrógeno	Suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento vegetativo • Mejora calidad del cultivo • Sintetiza aminoácidos, forma clorofila 	<ul style="list-style-type: none"> • Retarda maduración. • Debilita planta, menor resistencia a enfermedades
Fósforo	Solución del suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Raíces se desarrollan rápidamente, favorece a la resistencia a las bajas temperaturas • Eficiencia del uso de agua • Resistencia a enfermedades 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja floración • Raíces presentan bajo desarrollo
Potasio	Suelos (minerales arcillosos), residuos orgánicos, fertilizantes	<ul style="list-style-type: none"> • Activación enzimática • Fructificación, maduración y calidad de los frutos • Resistencia: enfermedades, sequia, frio 	<ul style="list-style-type: none"> • Coloración en las hojas, se tornan rojizas • Reduce la floración • Frutos jóvenes llegan a secarse
Calcio	Suelos áridos, calcáreos y arcillosos	<ul style="list-style-type: none"> • Estimula desarrollo de las hojas, raíces. • Neutraliza ácidos orgánicos de la planta y toxicidad que se genera en el suelo • Rigidez en las paredes celulares • Responsable de la maduración de los frutos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pudrición apical que va de la mano con un déficit hídrico. • Compactación de crecimiento, deformación. • Secamiento progresivo de los tallos, hojas y flores.

Azufre	Material permeable del suelo, gas natural, basalto	<ul style="list-style-type: none"> • Modera el contenido de azúcar en los frutos • Desarrollo acelerado del sistema radicular 	<ul style="list-style-type: none"> • Altera procesos metabólicos • Crecimiento lento • Clorosis • Formación de frutos incompleta
Magnesio	Solución del suelo, superficie de las arcillas y materia orgánica	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de las moléculas de clorofila • Interviene en la fotosíntesis, formación de ATP, ADN y ARN • Crecimiento vegetativo y calidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Genera pérdida de hojas y clorosis

Tabla 2. 8 Principales efectos de los macronutrientes en el cultivo de tomates

Los niveles adecuados de potasio y calcio mantendrán la turgencia¹⁵ y la fortaleza de la célula haciendo a las células de la planta más resistente a la pérdida de agua y en consecuencia a la quemadura de sol. Mientras que la escasez de agua producirá bajo crecimiento y el exceso producirá muerte de las raíces, por lo que es necesario que los riegos se realicen por goteo ya que el jitomate es una planta originaria de climas semiárido, por lo que sus exigencias de agua son relativamente bajas. Es importante considerar que a mayor temperatura del suelo mayor será la evapotranspiración.

En promedio si la temperatura es ideal tanto del suelo como del aire la planta consume alrededor de 2.8 litros por día, sin embargo la planta de jitomate puede llegar a consumir hasta 4 litros de agua al día dependiendo de la etapa de crecimiento de la planta ver **Tabla 2. 9**.

Etapa	Consumo de agua $\left[\frac{\text{Litros}}{\text{planta} \cdot \text{día}} \right]$
Crecimiento	0.4
Floración	0.8
Fructificación	1
Maduración	1.5

Tabla 2. 9 Consumo promedio de agua, jitomate

¹⁵ **Turgencia:** dilatación de las células provocada por la precipitación del agua contenida en su interior.

2.8.3 VARIEDADES CONOCIDAS

- **Cherry (Cereza):** Se caracteriza por su tamaño pequeño y piel delgada, se agrupan en ramilletes de 15 a más de 50 frutos, son de sabor dulce, pueden llegar a ser rojos e incluso de color amarillos, ver inciso **a)** de la **Fig. 2. 23**.
- **Saladette (Roma):** Es una variedad de tomate italiano muy utilizado para la fabricación de conservas, purés, pastas, salsas; se caracteriza por tener pocas semillas, tienen forma de huevo o pera, generalmente son de tamaño homogéneo, inciso **b)** de la **Fig. 2. 23**.
- **Pera:** Es un fruto híbrido de tierras cálidas debe su nombre a su forma se caracteriza por tener un sabor suave y mucha pulpa, muchas veces suele confundirse con el tomate roma, pero difiere al no ser un tomate jugoso, pero es muy resistente al calor. Actualmente es utilizado cada vez menos en la industria de conservas, inciso **c)** de la **Fig. 2. 23**.
- **Beef:** Se caracteriza por ser un tomate de gran tamaño, redondos y baja consistencia, la planta suele ser de raíz fuerte ideal para ciclos cortos, ideal cuaje a altas temperaturas. Mejor conocidos como jitomates “bola”, inciso **d)** de la **Fig. 2. 23**.



Fig. 2. 23 Principales especies de jitomate.

2.8.4 PRINCIPALES PLAGAS Y ENFERMEDADES DEL CULTIVO DE JITOMATE

Las plagas y enfermedades más comunes, ver **Fig. 2. 24**, se enlistan en la siguiente **Tabla 2. 10**: [10]

	Padecimiento	Características
PLAGAS	Mosca Blanca	Transmite el “ <i>virus del rizado amarillo</i> ”, este insecto disminuye la cantidad de sabia disponible en la planta. Ataca en los primeros 50 días después del trasplante.
	Trips	Transmite el virus del bronceado del tomate, se caracteriza por manchas redondas en forma de anillos de coloración amarilla, pueden causar necrosis.
	Pulgón	Se caracterizan por formar colonias que se distribuyen mediante hembras aladas, generalmente en otoño y primavera.
	Minadores de hoja	Ataca al jitomate en la etapa de crecimiento, larvas se desarrollan dentro de las hojas ocasionando galerías o minas, provocando que las hojas se sequen y caigan de manera prematura.
	Polilla del tomate	Ataca los brotes y los frutos pues las larvas se alimentan de ellos, debido a su alto potencial reproductivo son capaces de destruir todo un cultivo.
	Araña Roja	Ácaros que producen manchas amarillentas en las hojas generando desecación y defoliación.
	ENFERMEDADES	Oidiopsis
Podredumbre gris		Se presenta con mayor facilidad a temperaturas de 17 – 23 °C aunada a una humedad relativa de 95 %, es causada por un hongo ocasionando que los frutos se tornen grises y de textura blanda.
Mildiu		Aparecen manchas irregulares de aspecto aceitoso que se necrosan e invade las hojas, afecta frutos inmaduros cubriendo casi siempre la mitad superior del fruto.
Fusarium oxysporum		Es un hongo que genera la caída de las hojas superiores mientras las inferiores se amarillean y terminan por morir, el interior del tallo presenta oscurecimiento.

Tabla 2. 10 Principales efectos provocados por plagas y enfermedades en cultivo de jitomate.



Fig. 2. 24 Plagas y enfermedades que atacan el cultivo de jitomate

2.9 CONSUMO DE JITOMATE A NIVEL MUNDIAL

Como ya se mencionó en el 2013 México produjo 2.1 % de la producción mundial de jitomate lo que equivale a **2, 684,358**, lo que nos sitúa dentro de los primeros lugares en exportación de jitomate fresco y procesado.

2.9.1 TOMATE FRESCO

En el 2013 los principales consumidores de jitomate fresco se encuentran en EE. UU. (95 % del total de exportaciones) y Canadá (4 % del total de exportaciones) los principales destinos del jitomate mexicano, en términos generales del consumo total de EE. UU., el 74 % es jitomate mexicano, siendo Nogales, Laredo Detroit y San diego los puntos de entrada de importaciones más representativos, con un consumo per cápita de 25

$$\left[\frac{\text{kg}}{\text{hab} \cdot \text{año}} \right]^{16}$$

Se calcula que el consumo de jitomate en Canadá es aproximadamente de $17 \left[\frac{\text{kg}}{\text{hab} \cdot \text{año}} \right]$, muy por debajo del consumo per cápita de EE. UU., estudios realizados demuestran que este consumo está directamente ligado al

¹⁶ "Jitomate". Atlas Agroalimentario 2014. Disponible en:

nivel socioeconómico, es decir, a mayor ingreso mayor consumo; razón por la cual el consumo nacional ha disminuido de $13 \left[\frac{\text{kg}}{\text{hab} \cdot \text{año}} \right]$ en el 2003, a sólo $6 \left[\frac{\text{kg}}{\text{hab} \cdot \text{año}} \right]$ en el 2014.

Si bien todos los datos antes mencionados son vitales para el diseño de un invernadero puesto que describen tanto las necesidades del cultivo así como la estabilidad en ventas, producción y exportación de jitomate a nivel nacional e internacional, es necesario recalcar que el éxito recae en el cultivo de productos de calidad que deben venderse incluso antes de ser plantados, por lo que es indispensable conocer las normas nacionales e internacionales si se busca comercializar en el mercado internacional:

- **NMX – FF – 031 – 1997 –SCFI** establece los grados de calidad del tomate en función de su forma, textura, coloración, maduración y conservación del producto, existiendo tres categorías: extra, primera y segunda, suelen empacarse en cajas de madera o cartón con un peso que oscila entre los 18 – 20 kg., para evitar dañar el fruto.
- **Norma Estándar Internacional para la Clasificación de Tomate** establece que los tomates deberán estar: enteros, sanos y exentos de podredumbre o deterioro que hagan que no sean aptos para el consumo, limpios y exentos de cualquier materia extraña visible, exentos de plagas y daños causados por éstas, exentos de humedad externa anormal salvo la condensación consiguiente a su remoción de una cámara frigorífica y exentos de cualquier olor y/o sabor extraños.

2.9.2 TOMATE INDUSTRIALIZADO

Los jitomates industrializados tienen una larga vida útil y pueden ser almacenados sin necesidad de refrigeración, el tomate industrializado se caracteriza por tener una gran variedad de productos como son: tomate en conserva, jugo y concentrado en forma de pasta o puré. Los principales países procesadores de tomate a nivel mundial son: EE. UU. (39 %), Italia (20 %), China (9 %), España (7 %), Turquía (6 %), Brasil (5 %) y el resto del mundo (14 %).¹⁷

<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/atlas2014/index.html>

¹⁷ Datos recabados por la Industria Alimenticia de Argentina. 2010

2.9.2.1 TOMATES PELADOS ENTEROS EN CONSERVA

Para la producción de este tipo de conservas es necesario iniciar el proceso con una selección de la materia prima (jitomates), posteriormente se somete al proceso de pelado que puede ser mediante un corte en la piel o bien mediante cambios termofísico que consiste en calentar el jitomate con vapor de agua a presión, donde finalmente se despresuriza y hace estallar la cascara; finalmente se embaza, esteriliza para eliminar microorganismos, se evalúa la calidad, etiqueta y distribuye.

Las importaciones de jitomate pelado a nivel mundial en el 2010, datos recabados por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), en los primeros lugares se encuentran: Reino Unido, Alemania, Francia, Bélgica, Holanda, Japón, Canadá y Australia, ver **Gráfico 2. 3.**

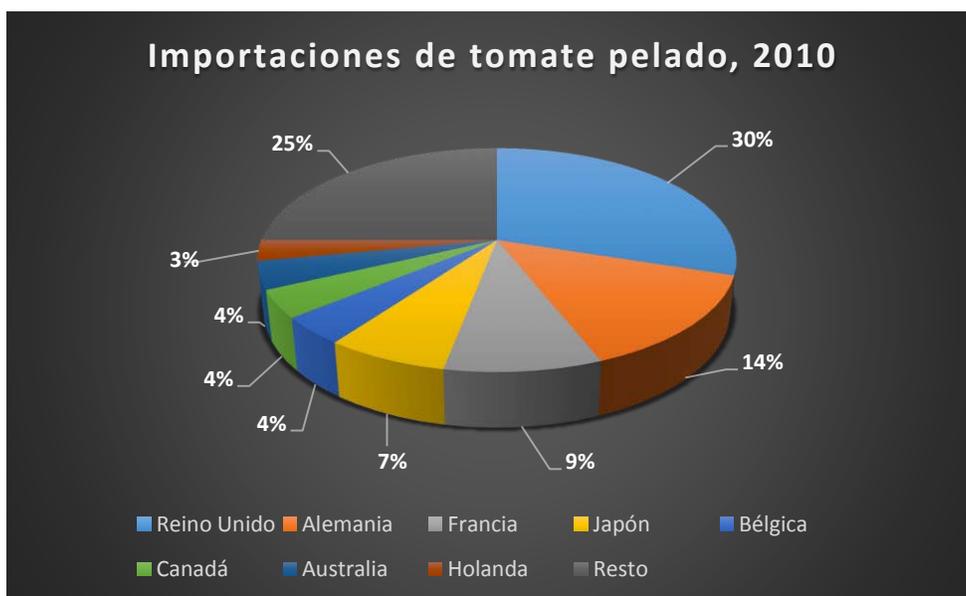


Gráfico 2. 3 Importaciones de jitomate pelado a nivel mundial, 2010 [11]

2.9.2.2 JUGO DE TOMATE

Los frutos son triturados y convertidos en una pasta que será sometida a un “hot break” que es un tratamiento térmico que tiene como finalidad mejorar la consistencia del jugo mediante la disminución de agua para posteriormente someterlo a un tamizado que retiene la piel y las semillas, el jugo resultante se almacena en tanques, donde se ajusta la acidez agregando sodio y sales de calcio, que son los encargados de alimentar las líneas de producción

2.9.2.3 PASTA DE TOMATE

Cuando la oferta de jitomate suele ser más alta que la demanda, las empresas elaboran concentrados que sirven como base en la preparación de salsas y purés, suele someterse los frutos a procesos de trituración, hot break, tamizado mediante los cuales se elaboran los concentrados de tomate, posteriormente estos concentrados se someten a un proceso de evaporación para disminuir la cantidad de agua aún presente, finalmente se somete a una pasteurización para eliminar microorganismos presentes y de esta forma los concentrados pueden ser envasados. Alemania, Italia y Rusia son los principales importadores de pasta de tomate, ver **Gráfico 2. 4**.

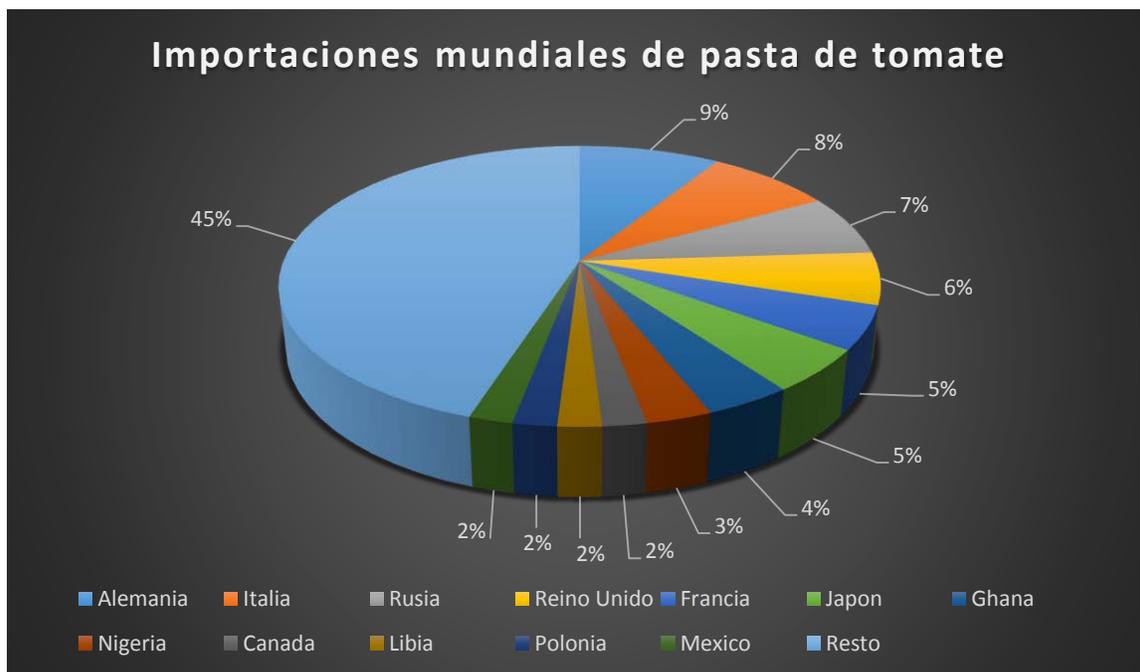


Grafico 2. 4 Importaciones mundiales de pasta de tomate, 2010 [11]

CONCLUSIONES

Vivimos en una sociedad moderna que ha evolucionado desde la forma de comunicarse hasta la de cosechar alimentos, así es como la agricultura convencional se transforma en lo que hoy conocemos como *“agricultura protegida”* que si bien es una actividad que se remonta hace aprox. 10,000 años con las antiguas civilizaciones, pero fue hasta la década de 1940, después de la Segunda Guerra Mundial con el uso de los materiales plásticos en la agricultura, que comienza el diseño de invernaderos hortícolas comerciales que tienen como principal objetivo la protección de los cultivos de los fenómenos climáticos, así como la producción fuera de estación y la optimización de recursos.

De esta manera se plantean los elementos a considerar en el diseño de un invernadero mediante modelos matemáticos, donde se deberá contar con sistemas de control ambiental que beneficiarán el crecimiento y desarrollo exclusivo de la especie a cultivar, sistemas de ventilación, sistemas de climatización en los que se buscará que el recurso geotérmico sea la principal fuente de energía.

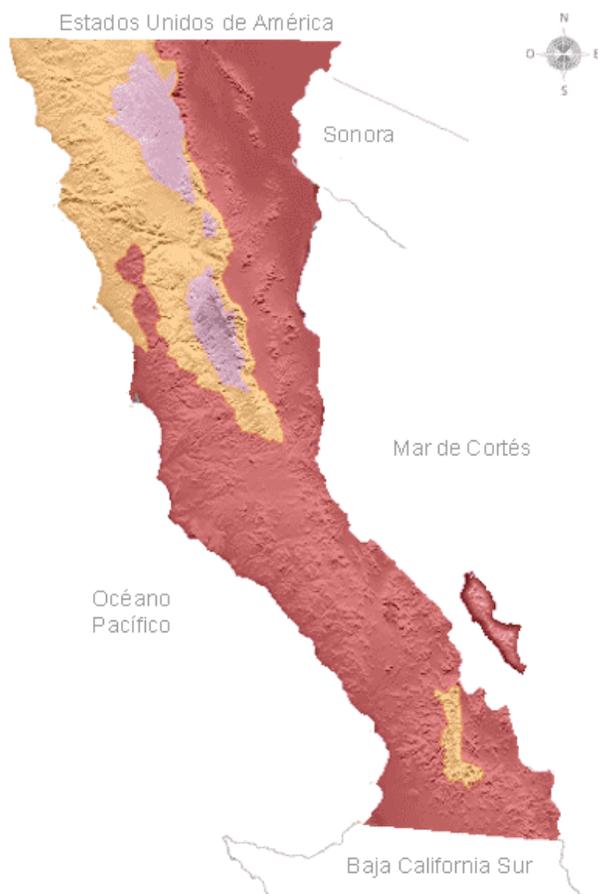
En conclusión en este capítulo se sentaron las bases requeridas para:

1. Establecer los parámetros de operación de un invernadero.
2. Entender los procesos fotosintéticos en función de las características – requerimientos de los cultivos.
3. Una adecuada selección del cultivo a plantar en función del mercado nacional e internacional de cultivos protegidos.

CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE DISEÑO DE INVERNADERO IDEEA

En este capítulo se fijaran las condiciones óptimas para el cultivo de jitomate protegido en la localidad de Mexicali; mediante balances de masa y energía se podrá cuantificar los parámetros a considerar en el diseño de un invernadero como son: velocidad del aire, temperatura (máximas y mínimas letales), humedad relativa, niveles de radiación, enriquecimiento carbónico y aireación con el fin de limitar aquellos factores climáticos que detienen el crecimiento y/o desarrollo adecuado del cultivo.

3.1 DATOS OPERATIVOS



Mexicali es un municipio que pertenece al estado de Baja California donde predomina el clima seco, en promedio las temperaturas altas se encuentran por encima de los 30 °C durante los meses de Mayo – Septiembre, mientras que las temperaturas bajas se encuentran alrededor de los 5 °C.

3.1.1 TEMPERATURAS REQUERIDAS

En Mexicali se han llegado a registrar temperaturas de hasta 45 °C en los meses de Julio – Agosto, donde las lluvias son escasas con precipitaciones menores a 50 mm mientras que el promedio estatal es de 200 mm, propiciando para las actividades agrícolas (cultivos de: algodón, trigo, aceituna, vid, jitomate y ajonjolí), sea necesaria la extracción de agua potable de mantos acuíferos subterráneos, conjuntamente con grandes volúmenes de agua de la franja fronteriza. Para términos de balances energéticos es necesario establecer las condiciones fuera del invernadero, es decir, condiciones climáticas de la zona.¹⁸

Fig. 3. 1 Clima Baja California [Fuente: INEGI, Marco Geoestadístico, 2010]

¹⁸ “Agricultura en Baja California”. Cuéntame Economía actividades primarias, INEGI Perspectiva Estadística. Disponible en:

Zona: **Ejido Guadalajara** se encuentra a una distancia aprox. de **10 km** de la estación meteorológica “Rancho Williams”.

Estación	Años en operación	Efectividad
2142 EJIDO GUADALAJARA	(1982 – 1987) = 5	4.3
2003 BATAQUEZ	(1948 – 2003) = 55	52.9
2141 COMPUERTA BENASSINI	(1982 – 2010) = 28	24.2
2145 RANCHO WILLIAMS	(1982 - 2010) = 29	27.8

Tabla 3. 1 Rangos de efectividad de diversas estaciones meteorológicas [Fuente: Base de Datos Climatológica

De los datos recabados por la estación meteorológica “Rancho Williams”, se obtuvieron las condiciones climáticas máximas, mínimas y absolutas a lo largo del periodo de 1982 – 2010, ver **Tabla 3. 2**; las cuales se tomaran como parámetros de diseño del invernadero geotérmico.

Condiciones climáticas Ejido Guadalajara		
Máxima absoluta del año	52	°C
Media de las máximas diarias del mes más cálido	50	°C
Promedio diaria del mes más caluroso	42.34	°C
Media mensual del mes más frio	4.58	°C
Media de las mínimas mensuales	4.56	°C
Mínima absoluta del año	-5	°C
Velocidad promedio viento	3.7	m/s
Humedad Relativa promedio	34.5	%

*Tabla 3. 2 Condiciones climáticas de diseño para el Ejido Guadalajara*¹⁹

3.1.2 ÁREA DEL INVERNADERO Y DISTRIBUCIÓN DE CULTIVOS

Las características estándares de Invernadero tipo Asimétrico ideal para climas calurosos son las siguientes, ver **Fig. 3.2**,

<http://cuentame.inegi.org.mx/economia/primarias/agri/default.aspx?tema=E#sp>

¹⁹ Base de datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM). Disponible en:

<http://clicom-mex.cicese.mx/>

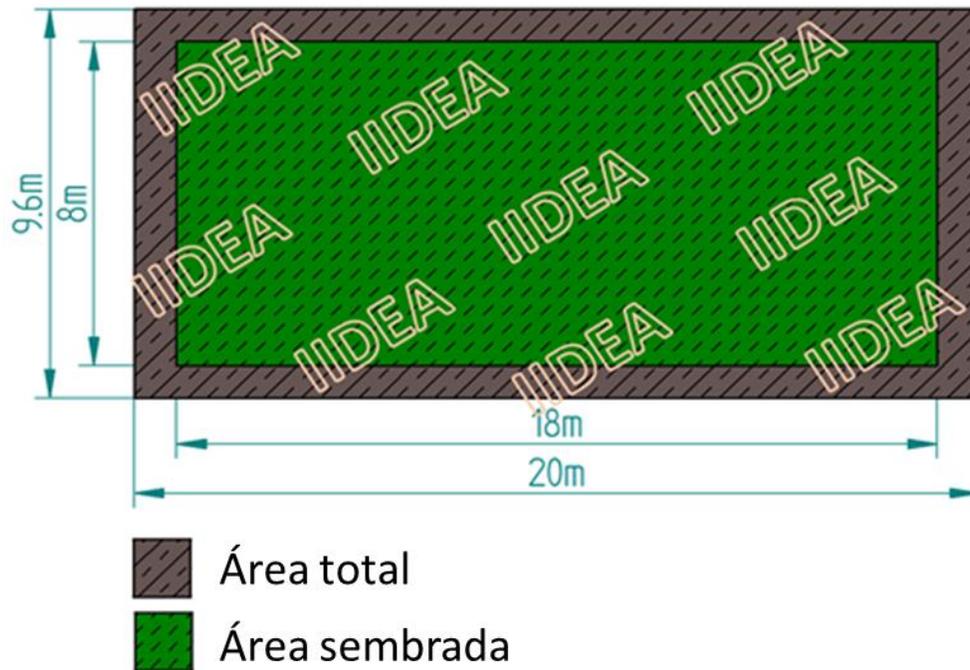


Fig. 3. 2 Área del invernadero, propuesta de la superficie a sembrar

MEDIDAS ESTÁNDAR [m]	
Ancho	9.6
Largo	20
Altura al Zenit	6.4
Altura debajo canal	4
Distancia entre pilares	4

$$Area = b * h = (9.6 m)(20 m) = 186 m^2$$

Tabla 3. 3 Medidas estándares Invernadero Asimétrico

3.1.3 TIPO DE CUBIERTA PLÁSTICA

El uso de materiales plásticos en la agricultura ha permitido convertir terrenos infértiles en modernas extensiones de explotación agrícola, la correcta selección del material de la cubierta influirá en el tipo de estructura, forma del techo, transmitancia, comportamiento térmico del invernadero, etc. Las principales propiedades a considerar son: [6]

- I. **Propiedades físicas.** Determinarán el peso que deberá soportar la estructura así como el espacio entre pilares, barras de soporte y canales recolectores de agua de lluvia. Las principales especificaciones a considerar son el peso, la densidad, espesor, resistencia y tiempo de envejecimiento, **ver Tabla 3. 4.**

Propiedades Físicas	Características
Peso	Bajo peso reduce las exigencias mecánicas sobre las estructuras, mientras que pesos elevados reducirán el espacio debido a que las estructuras tendrán que ser mayores.
Densidad	Indica la cristalinidad en el caso de los polímeros, propiedad que define la flexibilidad, permeabilidad de la cubierta.
Espesor	Suele ser medida en milímetros cuando se trabajan con vidrio o plásticos rígidos y micrómetros cuando se trata de cubiertas flexibles y ligeras.
Resistencia	Tolerancia a la rotura debido al granizo, nieve, viento, altas temperaturas y bajas temperaturas.
Envejecimiento	Indica el tiempo en el que el material presentara afectaciones debido a la degradación de las propiedades físicas, mecánicas y acción de los rayos solares.

Tabla 3. 4 Cubierta plástica, propiedades físicas

- II. **Propiedades ópticas.** Determinan la cantidad y calidad de luz que llega al invernadero. La propiedad más importante es la transmitancia, ésta es la cualidad de los materiales de permitir el paso de radiación solar y la difusión de luz mejora la fotosíntesis ya que la luz se dispersa de manera uniforme, llegando a las hojas inferiores.
- III. **Propiedades térmicas.** Capacidad de proteger al invernadero del frío, depende directamente de la transmitancia, pérdidas de conducción, convección y radiación. En función del material se podrá modificar el clima dentro del invernadero. El tipo de material puede ser rígido o flexible, **ver Tabla 3. 5.**

Características	FLEXIBLES		RÍGIDOS			
	Polietileno	PVC	PVC ondulado	Poli metacrilato de metilo	Poliéster estratificado	Cristal
	(0,08 mm)	(0,1 mm)	(1-2 mm)	(4 mm)	(1-2 mm)	(2,7 mm)
Densidad	0,92	1,3	1,4	1,18	1,5	2,40
Índice de refracción	1,512	1,538	-	1,489	1,549	1,516
% de dilatación antes de ruptura	400-500	200-250	50-100	escasa	escasa	nula
Resistencia al frío y calor	-40 a 50 °C	-10 a 50 °C	-20 a 70 °C	-70 a 80 °C	-70 a 100 °C	muy elev.
Duración	2 años	2-3 años	elevada	elevada	elevada	elevada

Tabla 3. 5 Comparación entre los principales materiales plásticos utilizados en cubierta de invernadero [6]

IV. Otras propiedades: Gracias a las nuevas tecnologías y a la creación de nuevos materiales plásticos es posible añadirle propiedades adicionales, así como optimizar la cantidad y calidad de luz que es fundamental en el crecimiento y desarrollo vegetativo de las plantas. Entre las nuevas características se encuentran, **ver Fig. 3. 3:**²⁰

- a) Resistencia a la radiación UV: este tipo de radiación degrada al material plástico, al aumentar su resistencia se traduce en un tiempo mayor de vida útil.
- b) Efecto anti – goteo: disminuye la tensión superficial de las gotas que se depositan en la cubierta, de esta manera no se ve afectada la transmisión de luz e impiden goteos en el cultivo.
- c) Efecto anti – niebla, minimiza la formación de vapor de agua dentro del invernadero mediante el uso de aditivos, previene la aparición de enfermedades.
- d) Efecto anti – virus y anti – insectos, se bloquea el paso de ciertas longitudes de onda (280 – 390 nm) vitales para la proliferación de infecciones e insectos.
- e) Efecto anti – polvo, reduce la acumulación de polvo en la cubierta.

²⁰ “Materiales de cubierta para invernaderos”. Los plásticos en la Agricultura. Disponible: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/plasticos.htm

Incluso es posible reducir la dosis de fumigantes hasta en un 50 % con el uso de cubiertas con mayor impermeabilidad. Actualmente las cubiertas que traen más beneficios son las que se encuentran hechas de polietileno que cuentan con una gran variedad con las propiedades antes mencionadas y funcionan bien en climas tropicales. Es importante mencionar que la selección de cubiertas plásticas está también en función del precio, las garantías que ofrece el fabricante, así como la certificación nacional vigente **NMX-E-255-CNCP-2008**.

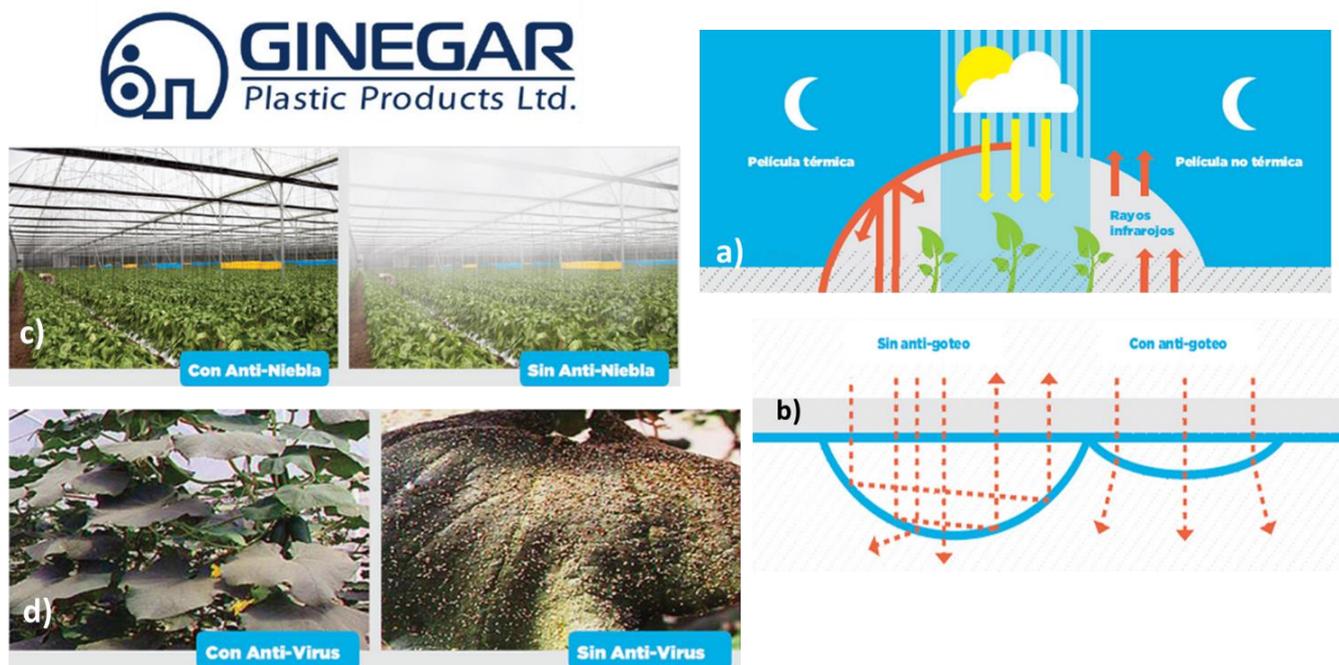


Fig. 3. 3 Principales características en cubiertas de polietileno [Fuente: GINEGAR, Productos plásticos Ltd.]

3.1.4 TIPO DE SUELO Y MARCO DE PLANTACIÓN

Es importante que el suelo tenga buen drenaje de preferencia suelos de textura silíceo – arcillosa y ricos en materia orgánica mínimo del 2 %, siendo perfectos los suelos arcillosos enarenados con un pH casi neutro entre 6.2 – 6.8 y una temperatura entre 18 – 22 °C, potasio 5 – 10 es decir, de 400 – 500 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right]$ y fósforo en forma de superfosfato de cal como ya se mencionó en el capítulo anterior. Si el suelo se encuentra bien nutrido las raíces de la planta de tomate no necesitarán profundizar en busca de nutrientes, de esta manera será posible disminuir la distancia entre cultivos aumentando así la plantación.

La distancia ideal entre surcos oscila entre 1.2 – 1.5 m mientras que la distancia entre planta oscila entre 0.3 – 0.5 m y la anchura del surco suele ser de 0.6 m, ver Fig. 3. 4.

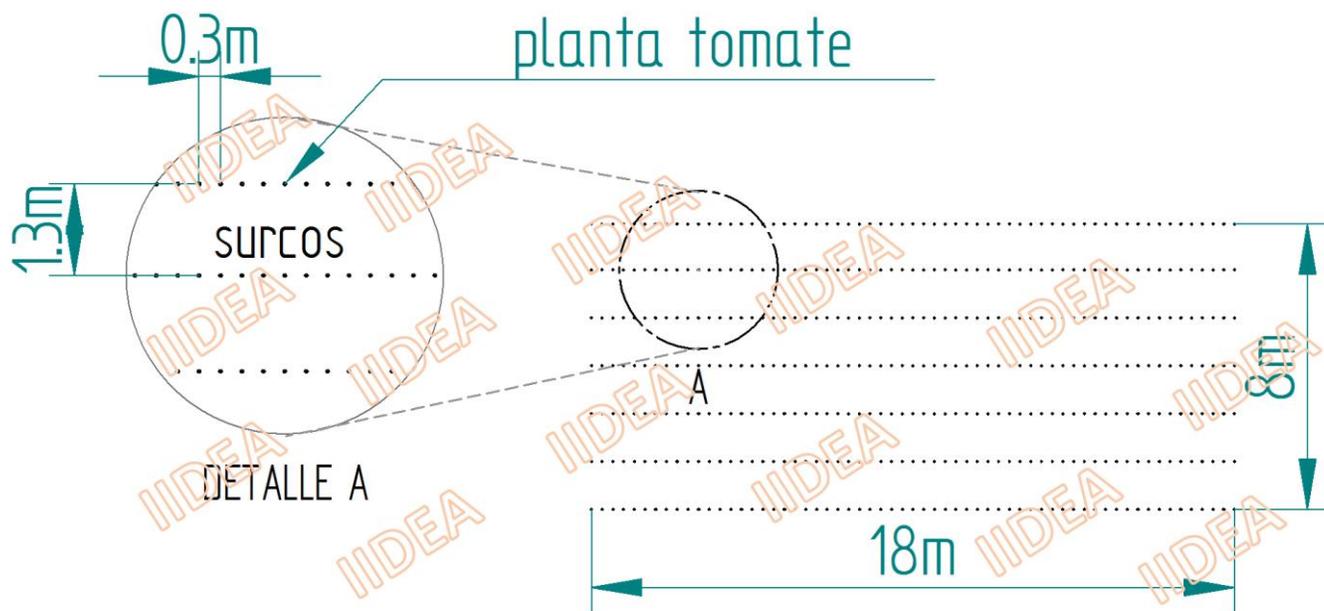


Fig. 3. 4 Marco de plantación propuesto

3.1.5 RADIACIÓN SOLAR

Datos recabados por la NASA para las coordenadas de la estación meteorológica “Rancho Williams” reportan que si bien el mes más caluroso en Mexicali es Agosto, la mayor cantidad de radiación se presenta en Junio, mientras que el mes con la tasa más baja de radiación así como el más frío es Diciembre, como se muestra en la **Tabla 3.6**²¹ y **Tabla 3.2**.

Tabla 3. 6 Radiación solar global promedio, “Rancho Williams” en Mexicali, B. C.

Mes	Radiación solar diaria – horizontal $\left[\frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$
Enero	3.25
Febrero	4.09
Marzo	5.35
Abril	6.45
Mayo	7.44
Junio	7.74
Julio	7.04
Agosto	6.18
Septiembre	5.33
Octubre	4.41
Noviembre	3.52
Diciembre	2.98
Promedio Anual	5.315

²¹ Surface Meteorology and Solar Energy. Disponible en:

<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=32.6&lon=-114.9&submit=Submit>

Por sus características de ubicación y climatológicas, el municipio de Mexicali en Baja California se encuentra en la zona de mayor incidencia de radiación solar con un promedio mensual de $5.3 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right]$ ²², ver Fig. 3.5.

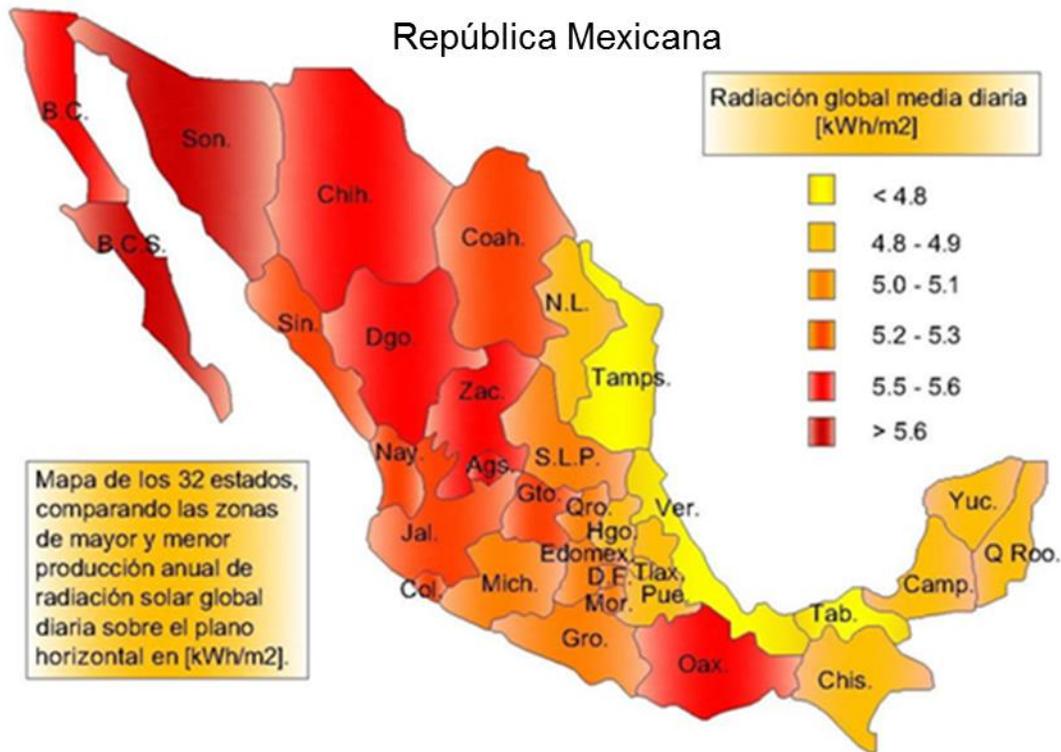


Fig. 3. 5 Cantidad de radiación media diaria

3.1.6 VENTILACIÓN

En el caso de un invernadero individual con ventilación natural se alcanza la máxima renovación cuando las ventanas se encuentran en un ángulo de 90 ° a la dirección del viento, mientras que si tenemos estructuras multicelulares con espacio entre 2 bloques las ventanas laterales deben estar paralelos a la dirección del viento. Para garantizar una ventilación adecuada la superficie total de la ventana oscila entre 15 – 25 % respecto a la superficie del suelo.

$$\frac{\text{Superficie de ventana } (A_v)}{\text{Superficie de suelo } (A_s)} = 0.15 - 0.25$$

$$\therefore \text{Superficie de ventana } (A_v) = \text{Superficie de suelo } (A_s) * (0.25)$$

²² Diseño Ilustrativo. Elaboro: Ing. Manuel Muñoz Herrera con datos recabados por el Servicio Meteorológico Nacional

Si la ventilación es forzada la ASAE (American Society of Engineers) establece que:

- El volumen de aire a evacuar debe corregirse en función de la velocidad del viento (v_v).
- La distancia máxima entre la ventana de entrada y el extractor debe ser de 30 m.
- La distancia entre dos ventiladores contiguos no debe superar 8 – 10 m para asegurar la uniformidad del flujo de aire.
- La velocidad promedio oscila entre $3.5 - 5 \left[\frac{m}{s} \right]$.

3.1.7 RIEGO

El sistema de riego es uno de los importantes, pues como ya se mencionó en el capítulo anterior el agua sirve para el transporte de nutrientes, transpiración, fotosíntesis y respiración, por lo que es necesario proporcionar porciones correctas de agua para mejorar la productividad. Se debe ser muy cuidadoso con la cantidad de sales disueltas en el agua de riego, así como la acumulación de éstas debido al uso de fertilizantes y suelos no drenados.

En el caso de las plantas de tomate la presencia de sales provoca efectos adversos como son la deficiencia en: tasa de germinación, los tallos alcanzan menor altura, el peso y número de los frutos por lo que el rendimiento del invernadero se ve seriamente afectado; estudios realizados demuestran que a concentraciones de $2.33 - 9.4 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ de **NaCl** se presentan reducciones en la germinación que van desde el 30 – 50 %.

Los sistemas de riego pueden clasificarse en, **ver Fig. 3. 6:**

- a) Riego superficial.** Suele ser por surcos donde si bien el costo es bajo no proporciona un suministro uniforme, bajo rendimiento, llega a generar niveles altos de HR.
- b) Riego con sistemas de presión.** Como el nombre lo indica se suministra agua a cierta presión, este tipo de sistemas pueden clasificarse en:
 - **Riego por aspersión:** se realiza mediante aspersores que suelen ser suspendidos sobre las plantas o sobre el suelo, en invernaderos es muy delicado utilizar estos sistemas en invierno y primavera pues suelen causar caída de las flores.

- **Nebulización:** este tipo es el más utilizado en invernaderos, genera una niebla fina a presiones de 2 – 4 bares, aunque generalmente este sistema suele usarse para ajustar la temperatura en el interior por lo que suele clasificarse como un complemento en el sistema de ventilación.
- c) **Riego localizado:** también conocido como riego por goteo este tipo de sistema es de los más populares ya que brinda la posibilidad de automatización y fertirrigación²³, así como una distribución uniforme del agua, genera pocas pérdidas por evaporación. Entre las principales desventajas se encuentran la obstrucción de los goteros, debido principalmente a la utilización de agua salobre ²⁴, por lo que siempre es necesario la colocación de filtros e incluso el lavado del sistema para disolver los residuos sólidos.



Fig. 3. 6 Sistemas de riego más usados en invernaderos

- d) **Riego subterráneo:** este sistema es una modificación del sistema localizado, con la variante que el goteo en vez de realizarse a nivel de suelo, se realiza de manera subterránea es decir debajo de la planta, diversos estudios colocan este sistema como el más eficaz se disminuye la tasa evaporación y el agua llega directamente a las raíces. Este sistema de tuberías contribuye a la disminución en la proliferación de enfermedades además de ser más duradero debido principalmente a que no se encuentra expuesto a la radiación solar.

²³ **Fertirrigación:** aplicación de nutrientes a través del sistema de riego, durante todo el periodo de desarrollo del cultivo y se planifica para seguir la demanda diaria de la planta de acuerdo a su ritmo de absorción.

²⁴ **Salobre:** proceso en los suelos de acumulación de altas concentraciones salinas.

Una instalación básica comprende de los siguientes subsistemas, ver Fig. 3. 7:

SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO

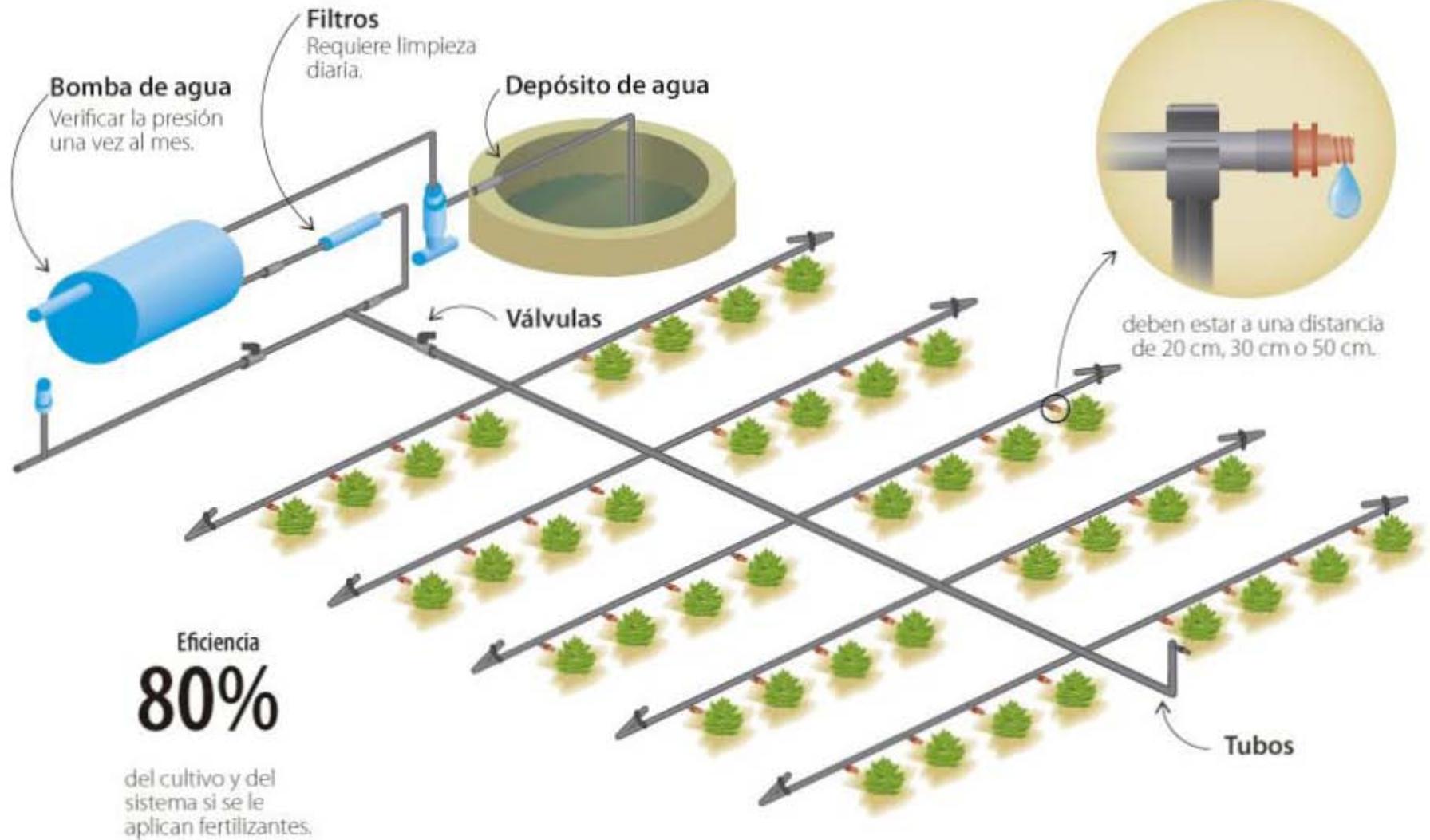


Fig. 3. 7 Sistema de Riego localizado automatizado

- **Depósito de agua:** fuente de agua, para el caso de este invernadero se desea que sea totalmente potable y que llegado el momento pueda implementarse la “Desaladora Modular Geotérmica iiDEA” capaz de destilar agua de mar o salobre mediante la utilización de energía proveniente de un yacimiento geotérmico de baja entalpia.
- **Sistema de bombeo:** que comprende bombas de agua, tubería de aspiración de agua desde el depósito y tubería de descarga a la salida de las bombas.
- **Cabezal de la instalación:** consta de filtros destinados a tratar, medir y filtrar el agua, es decir, eliminar las partículas de mayor tamaño.
- **Sistema de fertirrigación:** consta de un depósito donde al modificar la velocidad del agua se hace pasar mayor o menor volumen de agua a través del depósito de fertilizante.
- **Red de distribución:** Red de tuberías formada por líneas principales y secundarias que suelen ir enterradas a lo largo de la superficie del terreno paralelas a las hileras de cultivo.
- **Emisores:** serán los elementos encargados de suministrar el agua a cada una de las plantas, están insertados a cada cierta distancia generalmente coincidiendo con la posición de la planta.

3.1.8 SOMBREO

El sombreo típico se genera mediante el uso de mallas textiles que se colocan en forma de cubierta móvil en la parte alta del invernadero adicionado de un sistema de apertura y cierre que permite moverlas según lo demande el cultivo, el cual siempre estará en función de las condiciones climáticas, este tipo de mallas son capaces de crear un obscurecimiento total en el interior del invernadero y pueden instalarse en combinación con otro tipo de pantallas, su principal objetivo es brindar los niveles óptimos de luminosidad necesaria en los procesos fotosintéticos y reducir las demandas de los sistemas de climatización artificiales, **ver Fig. 3. 8.**



Fig. 3. 8 Pantallas y sombreo – pantallas térmicas [47]

Entre los principales tipos de pantallas se encuentran:²⁵

I. **Pantalla de sombreo:** suelen ser láminas de aluminio o polietileno transparente (también llamadas pantallas cerradas) entrelazadas entre sí con hiloacrílico, estas pantallas suelen ser muy flexibles, el uso de estas pantallas puede generar de un 20 – 100 % de ahorro energético **ver Fig. 3. 9**, ya que en días calurosos y soleados es posible reducir la carga solar generando un ambiente equilibrado y un ahorro en el sistema de refrigeración, mientras que por la noche disminuirá de manera considerable la radiación emitida por los cultivos, aumentando así la temperatura dentro del invernadero de manera natural y generando un ahorro térmico en la calefacción. El uso de este tipo de pantallas permite aprovechar al máximo la intensidad de luz en las primeras y últimas horas del día; su clasificación está en función del porcentaje de transmisión, por lo que suelen ser de color negro, verde y blanco.

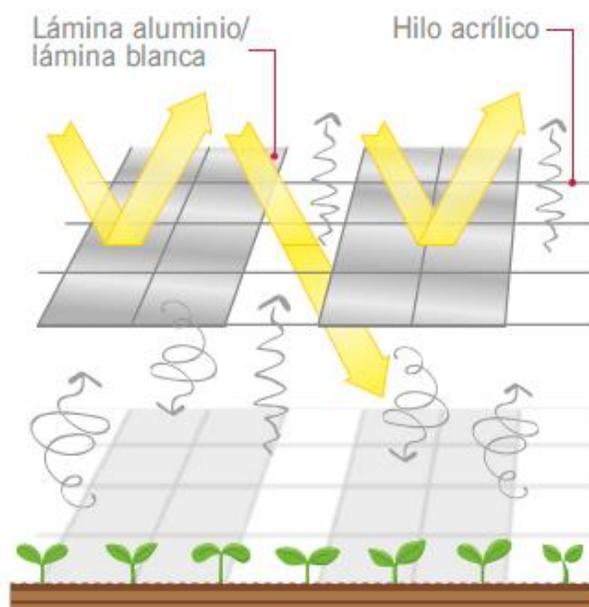


Fig. 3. 9 Pantalla de sombreo [47]

II. **Pantalla térmica:** laminas transparentes de polietileno entrelazadas entre sí mediante hiloacrílico **ver Fig. 3.10**, su principal función es retener el calor en el interior del invernadero sin alterar la luminosidad, además de ayudar a controlar la humedad en el interior del invernadero ya que evita la condensación y rocío sobre la planta. El uso de estas pantallas evitan los cambios bruscos de temperaturas, su principal efecto se ve

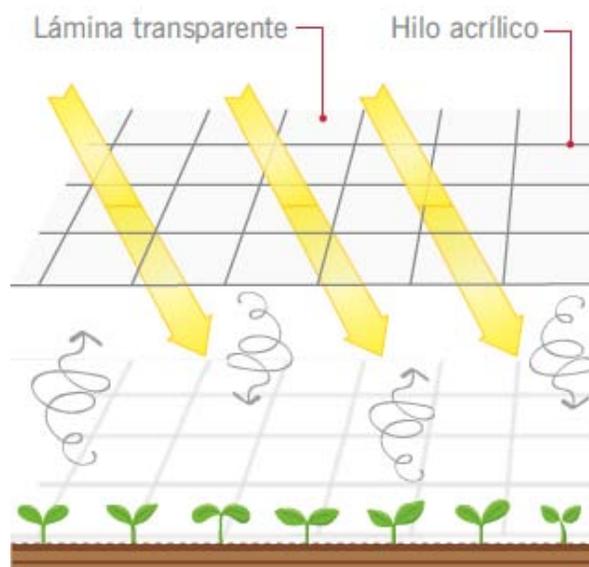


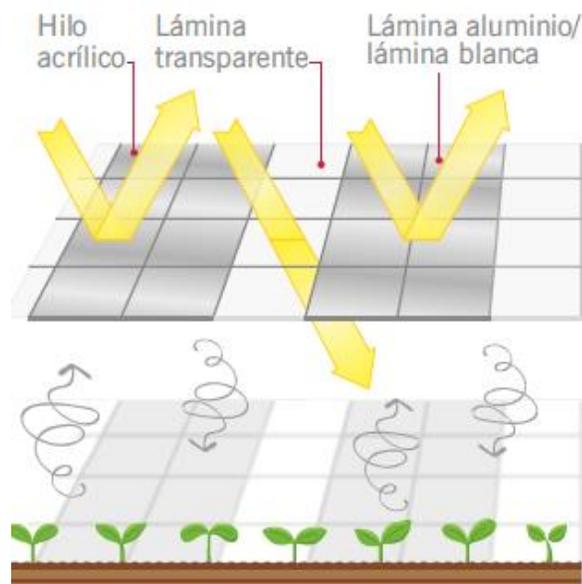
Fig. 3. 10 Pantalla térmica [47]

²⁵ “Pantallas Térmicas”. FERTRI Invernaderos, disponible en: <http://www.fertri.com/wp-content/uploads/2014/06/CATALOGO-PANTALLA-TERMICA.pdf>

reflejado en el balance radiante, balance calorífico y en la fotosíntesis. El uso de estos sistemas genera incrementos en la producción de hasta un 30 %.

- III. Pantalla termoreflexiva: básicamente es la combinación entre una pantalla térmica más una malla de sombreo **ver Fig. 3.11**, formadas por láminas de aluminio, poliéster transparentes, entrelazadas entre sí mediante hilo de acrílico. Se encargan de dar sombra al cultivo, pero al mismo tiempo retener el calor acumulado en el interior, su clasificación suele hacerse en función del porcentaje de sombreo y el ahorro de energía.

Fig. 3. 11 Pantalla termoreflexiva [47]



Una de las principales consideraciones a tomar para el sombreo del invernadero es que “mientras mayor sea el aumento de la temperatura de las plantas o del ambiente que las rodea, mayores serán los daños causados en comparación con los daños en la planta debido al exceso de luz”, debido principalmente que al aumentar la temperatura el agua de riego comenzará a evaporarse, por lo que la demanda de agua será mayor pues las plantas la necesitan para regular su temperatura.

Es por eso que las mallas no deben ser de color, dado que el material coloreado reduce el porcentaje de transmisión de luz, es decir, su función es reflejar más que absorber radiación solar, debe ser posible regular la intensidad de luz, no debe reducir la ventilación y lo más importante, el costo debe ser razonable, es decir, congruente a las propiedades que ofrece el material ya que no todos los materiales cumplen con las propiedades mínimas para ser llamadas mallas de sombreo.

3.1.9 ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO

Como ya se mencionó en el capítulo anterior el CO_2 es uno de los nutrientes más importantes de los cultivos protegidos disponible en el aire, pero en cantidades insuficientes, no excede el 0.03 % (300 **ppm**), se calcula por metro cuadrado ya que el cultivo de tomate consume hasta 2 litros de CO_2 . Se estima que la tasa de

crecimiento del tomate bajo condiciones normales disminuye al 80 % cuando la concentración de CO_2 se encuentra por debajo de 100 **ppm** y aumenta el 20 % cuando la concentración alcanza 1000 **ppm**, pero un exceso de CO_2 ocasionaría que las plantas respiraran más de lo que pueden foto sintetizar. En la agroindustria existen dos fuentes de CO_2 para llevar a cabo la fertilización:

- Mediante la combustión de gas LP y gas natural, que desprenden gases entre ellos CO_2 , ver Fig. 3.12.
- Por medio de gas licuado puro obtenido a partir de procesos industriales (fermentación alcohólica, fabricación de fertilizantes, etc.), que posteriormente es almacenado en tanques criogénicos para su aprovechamiento, este sistema es una de las formas más económica de obtener CO_2 .

Combustible	kg de CO_2
	L. de combustible
Gas LP	3.00
Biodiesel	2.84
Metano	2.75
Diésel	2.63
Gasolina	2.30
Etanol	1.53
Gas Natural	1.51

Tabla 3. 7 Litros de combustible para generar CO_2

Autores como Z. Serrano señalan que el enriquecimiento carbónico sólo es una forma de mejorar el cultivo, esto principalmente porque los costos de los equipos que suministran y regulan la concentración de CO_2 son demasiado caros, superan los 1,000 dólares, precio que no incluye la red de distribución, por lo que los pequeños productores instalan pequeños quemadores o acolchonados de paja que al fermentarse genera CO_2 y acelera el crecimiento de las plántulas.



Fig. 3. 12 Principales sistemas para la generación de bióxido de carbono

3.2 SISTEMAS DE CALEFACCIÓN

En invierno las condiciones climáticas no permiten el cultivo de varias especies de plantas en particular el jitomate, es por eso que en el cultivo en invernaderos se hace indispensable cuidar las pérdidas de calor principalmente las que se den en la noche. El invernadero debe calentarse si la temperatura exterior cae por debajo de la temperatura que necesita el cultivo, este calor se puede calcular de manera general con la siguiente expresión:

$$Q = A_H K * (t_i - t_a) \quad [W] \dots\dots\dots [1]$$

El calor necesario por metro cuadrado de suelo de invernadero, se calcula:

$$q = \frac{A_H}{A_G} K * (t_i - t_a) \quad [W] \dots\dots\dots [2]$$

donde:

K: coeficiente global de transmisión de calor $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

A_H : área de la superficie del invernadero $[m^2]$

A_G : superficie del suelo del invernadero $[m^2]$

t_i : temperatura requerida dentro del invernadero $[^\circ C]$

t_a : temperatura media de las mínimas en el exterior $[^\circ C]$

El coeficiente global (**K**), depende del material de la cubierta, hermeticidad del invernadero, sistema de riego, velocidad del viento, cantidad de nubes que cubran el cielo. Para los invernaderos plásticos los valores típicos oscilan entre $6 - 8 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$; estos datos se encuentran disponibles en hojas de especificación de los proveedores de cubiertas para invernaderos, **ver Anexo I.**

Al referirnos a los sistemas de calefacción hablamos de los sistemas artificiales que serán necesarios implementar en zonas cuyas temperaturas invernales sean dañinas para el cultivo, los sistemas de calefacción se pueden clasificar en función de los equipos de distribución de calor, elementos usados para la distribución de calor, donde los más utilizados son: agua, aire y refrigerantes; en función de lo antes dicho se pueden clasificar como se observa en la **Fig. 3.13.**

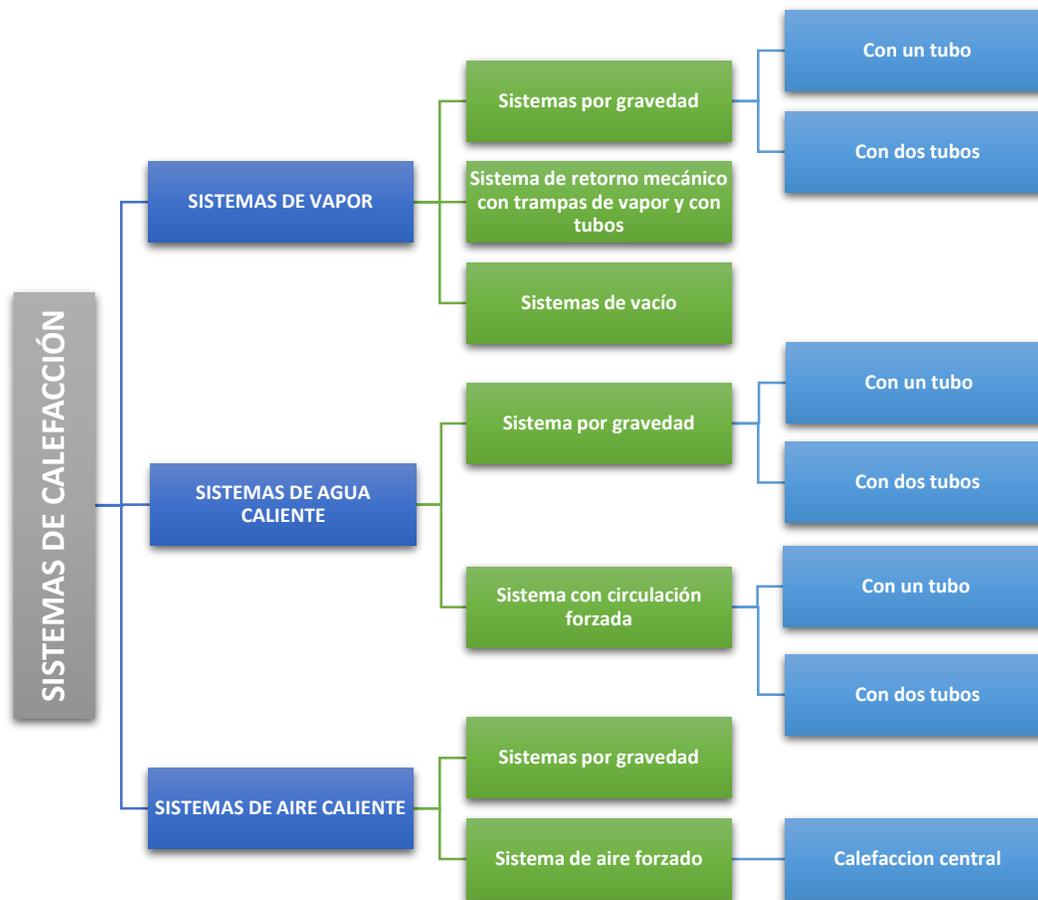


Fig. 3. 13 *Diversos Sistemas de Calefacción*

3.2.1 SISTEMA DE VAPOR

Este sistema consta de una caldera y un sistema de tuberías conectadas a radiadores, el sistema por gravedad de tubería única es el más sencillo, la tubería de suministro de vapor es usada también para el retorno del condensado, es decir, el vapor y el condensado fluyen en sentidos opuestos en la misma tubería en donde si las tuberías son muy largas es necesario instalar respiraderos para eliminar el aire atrapado; mientras que el sistema de dos tubos funciona haciendo fluir por un tubo vapor a los calefactores y por otro tubo independiente se retorna el condensado que entrara de nuevo a la caldera.

El sistema de retorno mecánico usa una gran cantidad de trampas de vapor en las que se deposita el condensado a un tanque y utiliza una bomba para inyectarlo de nuevo a la caldera, este sistema juega con caídas de presión positivas, de esta manera se trabaja a favor del flujo natural.

3.2.2 SISTEMA DE AGUA CALIENTE

Los sistemas de agua caliente se caracterizan por ser posible circular la misma agua indefinidamente, de esta manera los depósitos sólidos y la corrosión es mínima ya que los repuestos de agua suelen ser mínimos, la temperatura del agua varía en función del clima. En climas no muy extremos circula agua entre 38 – 50 °C, mientras que en climas fríos suele circular agua entre 82 – 116 °C, este sistema no requiere tuberías tan robustas y en verano es posible circular agua helada.

Los sistema por gravedad se usan cuando los calefactores se instalan en serie, la desventaja es que el agua puede llegar muy fría a los últimos calefactores en estos sistemas de gravedad el agua circula por diferencia de densidades por lo general se encuentran controlados por termostatos cuya función es enviar señales que regulan la temperatura del agua dentro de la caldera, **ver Fig. 3.14.**

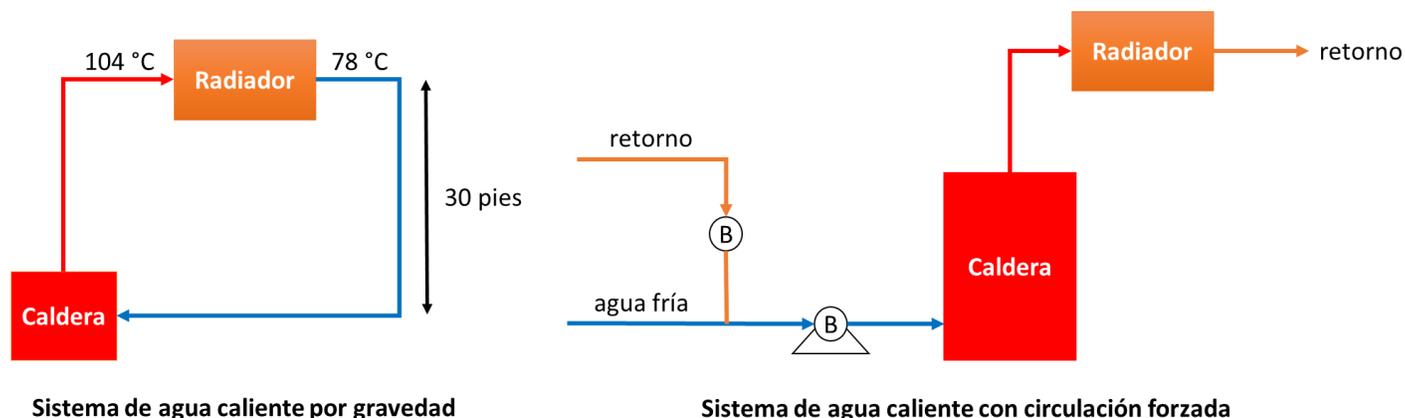


Fig. 3. 14 Sistemas de calefacción, mediante agua caliente

Mientras que en los sistemas con circulación forzada es necesario emplear una bomba para forzar el agua a fluir contra las resistencias generadas por la tubería y accesorios. Para encontrar la cantidad necesaria de agua para un sistema de calefacción, conociendo la carga calor y las temperaturas del agua a la entrada y a la salida del sistema, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$Q = W_1 C * (t_e - t_s) \dots \dots \dots [3]$$

Donde:

Q = carga de calor $\left[\frac{J}{h} \right]$

W₁ = gasto de agua $\left[\frac{kg}{h} \right]$

C = calor específico del agua $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

t_e = temperatura del agua a la entrada [$^\circ C$]

t_s = temperatura del agua a la salida [$^\circ C$]

3.2.3 SISTEMA DE AIRE CALIENTE

El sistema de aire caliente como su nombre lo dice utiliza aire para distribuir el calor a lo largo del sistema, este tipo de sistemas suelen ser divididos en sistemas por gravedad que actualmente están discontinuados y los sistemas de aire forzado donde su principal ventaja es que es posible añadir humedad para elevar la humedad relativa de un espacio así como suministrar ventiladores y lavado de aire, es decir, ver **Fig. 3.15**. Este tipo de calefacción al ser tan versátil se puede dividir en los siguientes sistemas:

- a) Calefacción central donde se toma aire fresco del exterior.
- b) Calefacción central donde todo el aire se recircula.
- c) Calefacción central donde parte del aire se recircula y el resto se toma del exterior.
- d) Calefacción central donde se mantiene humedad relativa constante y se toma todo el aire del exterior.

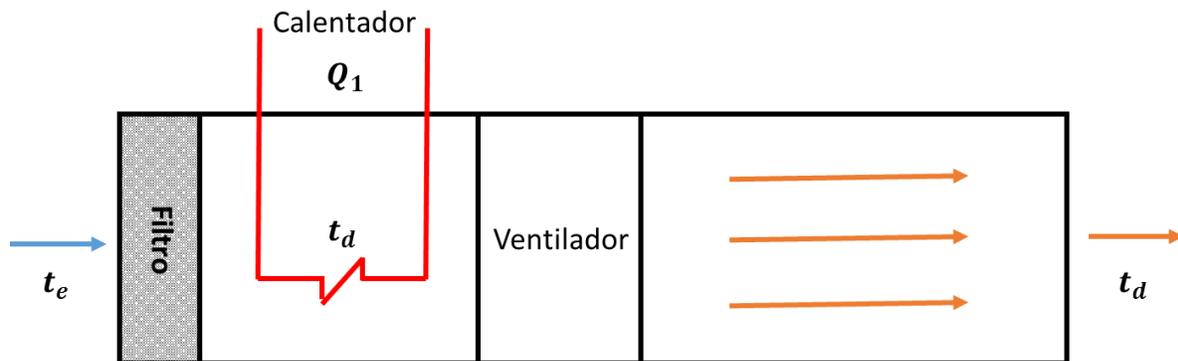


Fig. 3. 15 Calefacción central, funcionamiento general

donde:

Q_1 = calor suministrado en el acondicionador $\left[\frac{Joule}{h} \right]$

q = carga de calor $\left[\frac{Joule}{h} \right]$

M = flujo de aire $\left[\frac{kg}{h} \right]$

t_e = temperatura del aire al exterior [°C]

t_d = temperatura del aire que sale de los difusores [°C]

t_i = temperatura a mantener en el espacio [°C]

$$q = MC_p(t_d - t_i) \dots \dots \dots [4]$$

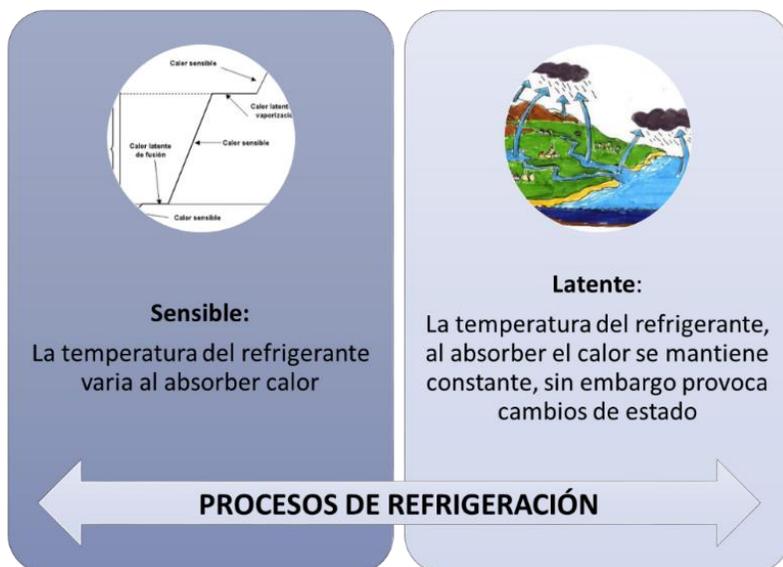
$$Q_1 = MC_p(t_d - t_e) \dots \dots \dots [5]$$

Es indispensable conocer las cargas necesarias para mantener la temperatura y la humedad constantes a lo largo de todo el año dentro del invernadero, para ejemplificar lo antes mencionado, en Grecia para mantener una temperatura de 13 °C en un invernadero de polietileno se necesita usar aprox. 12 litros de combustible por metro cuadrado, 18 litros en el sur de Grecia, y hasta 24 litros hacia el norte de la misma región.

3.3 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

En el caso de los invernaderos es muy importante acondicionar el aire para el óptimo desarrollo de las plantas, por lo que se brinda confort, lo que involucra no solamente el control de temperatura sino que a su vez la humedad y el movimiento del aire. Cuando el acondicionamiento de aire no es para confort humano se le denomina acondicionamiento de aire industrial. Actualmente el término refrigeración es muy amplio, pueden clasificarse en:

- Refrigeración doméstica.
- Refrigeración comercial.
- Refrigeración industrial.
- Refrigeración marina y de transportación.
- Acondicionamiento de aire para producir confort.
- Acondicionamiento de aire industrial.



De manera general refrigeración es el proceso termodinámico mediante el cual se baja el calor de un espacio, es decir, se extrae calor de un espacio y se lleva a otro capaz de admitir dicha energía o carga térmica^{26 3}. Los fluidos que generalmente se utilizan para transportar dicha energía son comúnmente refrigerantes. Los procesos de refrigeración se clasifican en: sensible y latente ver **fig. 3. 16**, por lo que los sistemas pueden ser de compresión o absorción.

Fig. 3. 16 Procesos de refrigeración

El ciclo mecánico de compresión es el más utilizado y consta de cuatro procesos fundamentales, ver **Fig. 3.17**:

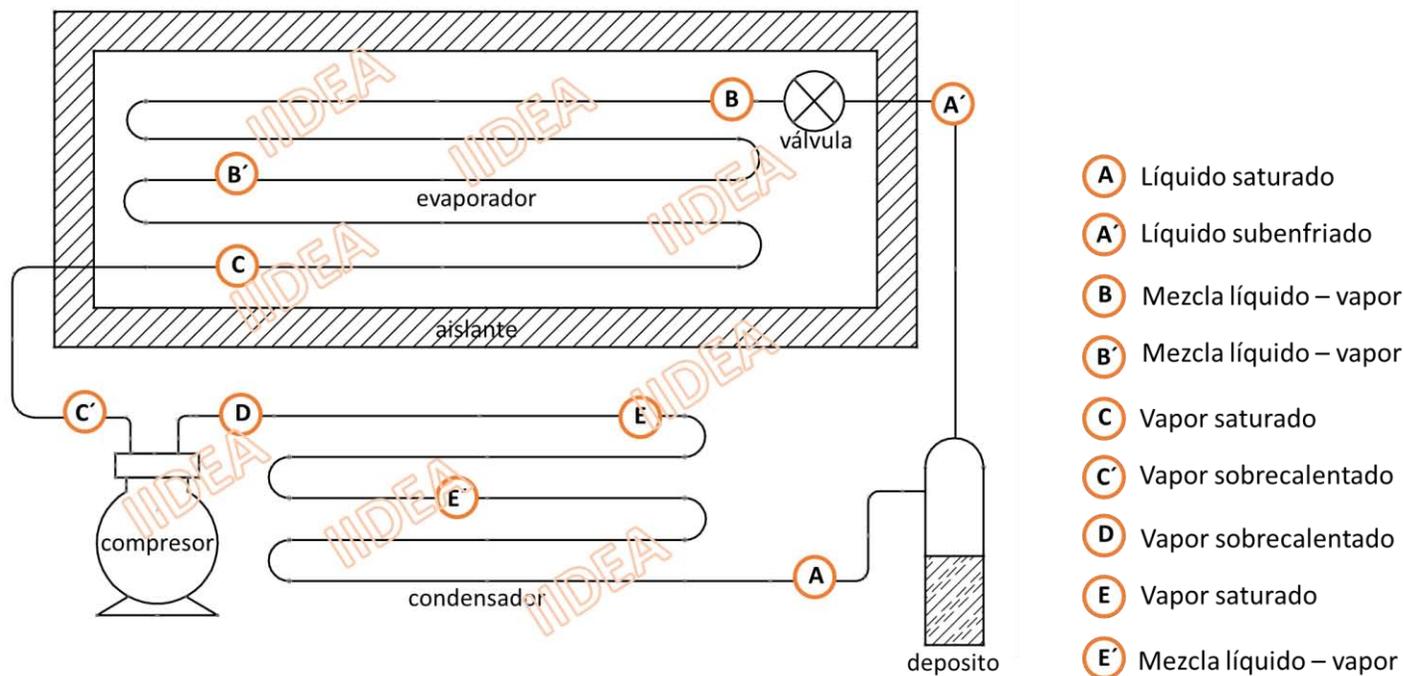


Fig. 3. 17 Sistema típico de refrigeración vapor - compresión

²⁶ **Carga térmica:** es la cantidad de calor que debe retirarse del espacio a refrigerar.

- I. Expansión Isotérmica. EL refrigerante es vaporizado dentro del evaporador, es en este proceso donde se absorbe el calor del espacio refrigerado.
- II. Expansión Adiabática. El refrigerante es expandido a través de la válvula disminuyendo su temperatura.
- III. Compresión Isotérmica. Aquí se aumenta la presión del vapor para llevar al refrigerante a la presión del condensador, durante este proceso la temperatura aumenta por encima de la temperatura del lugar a refrigerar.
- IV. Compresión Adiabática. En este punto el vapor entra como vapor sobrecalentado y sale como liquido saturado y entra al depósito donde se dilatará hasta la presión del evaporador.

El coeficiente de desempeño se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$COP_R = \frac{\textit{salida deseada}}{\textit{entrada requerida}} = \frac{Q_L}{W_{\textit{neto,entrada}}} = \dots \dots \dots [6]$$

$$= \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \dots \dots \dots [7]$$

donde:

Q_L = calor absorbido

Q_H = cantidad de calor rechazado hacia el medio

El Sistema de refrigeración por absorción es muy similar al ciclo de compresión, el refrigerante absorbe el calor al evaporarse y después se condensa para recomenzar el ciclo, la diferencia es que en vez de contar con un compresor, estos sistemas utilizan la capacidad que tienen algunas sustancias de absorber otra sustancia, la primera máquina de absorción utilizaba amoníaco – agua.

3.4 BALANCE DE ENERGÍA

La Primera Ley de la Termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso, sólo puede cambiar de forma; en función de este principio toda energía ganada debe ser equilibrada con la energía perdida por el invernadero, ver **Fig. 3.18**. De forma simplificada la siguiente ecuación representa el balance de energía en el invernadero: [4]

$$\underbrace{R_n + Q_{cli}}_{\text{Energía ganada}} = \underbrace{Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue}}_{\text{Energía perdida}} \dots \dots \dots [8]$$

donde:

- R_n = radiación neta
- Q_{cli} = energía climatización; puede ser de calefacción (Q_{cal}) o de refrigeración (Q_{ref})
- Q_{cc} = calor perdido por conducción – convección
- Q_{ren} = calor sensible y latente perdido por la renovación del aire en el interior del invernadero
- Q_{evp} = calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo
- Q_{sue} = flujo de calor perdido por conducción a través del suelo

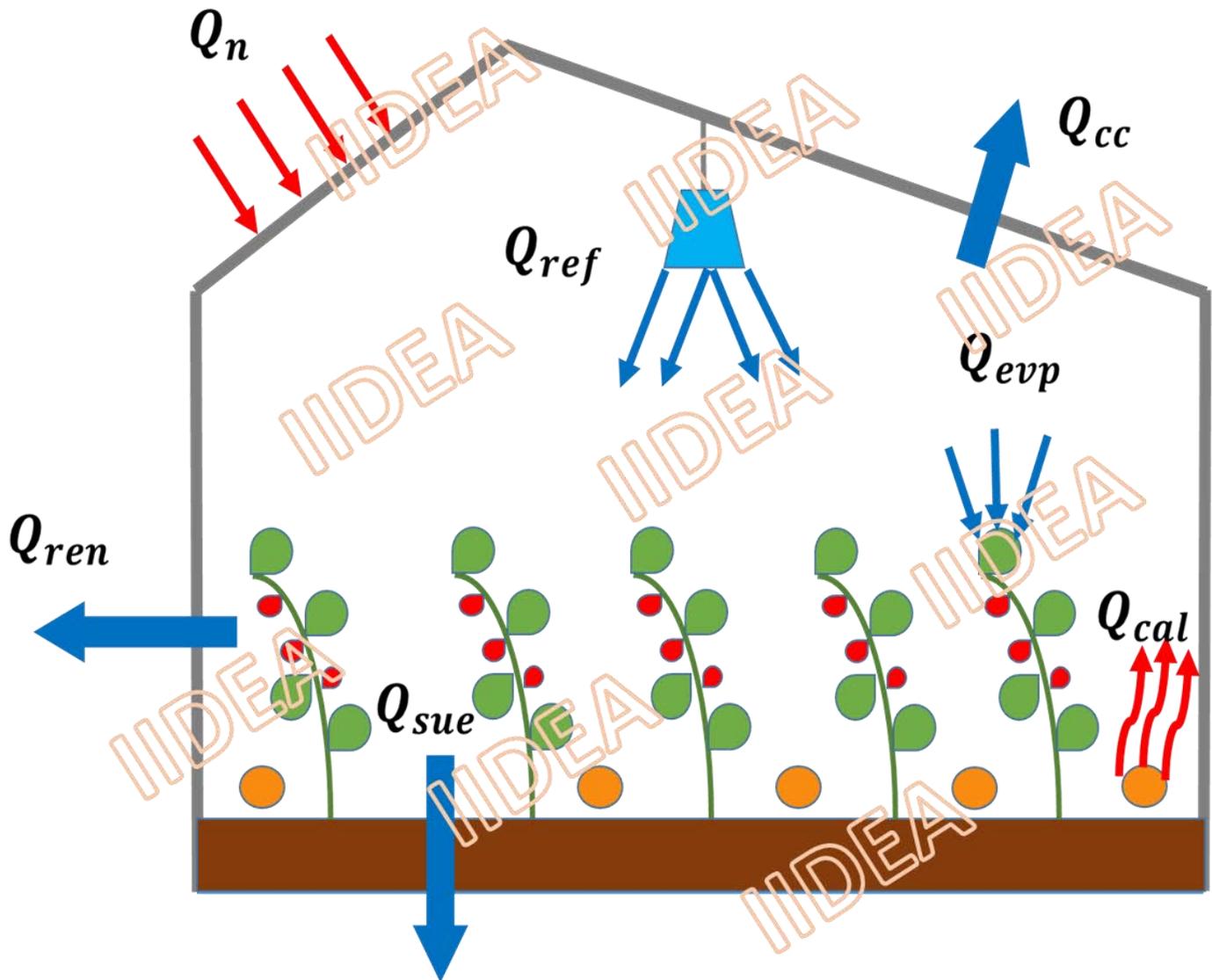


Fig. 3. 18 Balance de energía en el invernadero

3.4.1 RADIACIÓN NETA, R_n

La cantidad de radiación neta recibida por el invernadero será aquella que calienta el invernadero y es absorbida por la cubierta plástica, el suelo y las plantas menos la cantidad de radiación que emite de regreso la cubierta. ⁶

$$R_n = S_S [I * (\alpha + \tau * \alpha_s)] + S_C * \sigma * \tau_{ter} * (\epsilon_{atm} * T_{atm}^4 - \epsilon_{ter} * T_C^4) \dots \dots \dots [8]$$

donde:

S_S = superficie captadora de la radiación solar [m^2]

I = radiación solar incidente [$\frac{W}{m^2}$]

α = coeficiente de absorción de la cubierta para la radiación solar

τ = coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar

S_C = superficie de suelo cubierta [m^2]

τ_{ter} = coeficiente de transmisión del material para la radiación térmica

ϵ_{ter} = emisividad del material de cubierta para la radiación térmica

T_C = temperatura absoluta en la cubierta

σ = constante de Stefan – Boltzman = $5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 * K^4} \right]$

Esta ecuación resulta del balance de energía debido a las condiciones internas del invernadero así como las externas, ver Fig. 3. 19.

donde:

δ = reflectividad

α = absorbidad

ϵ = emisividad

τ = transmisividad

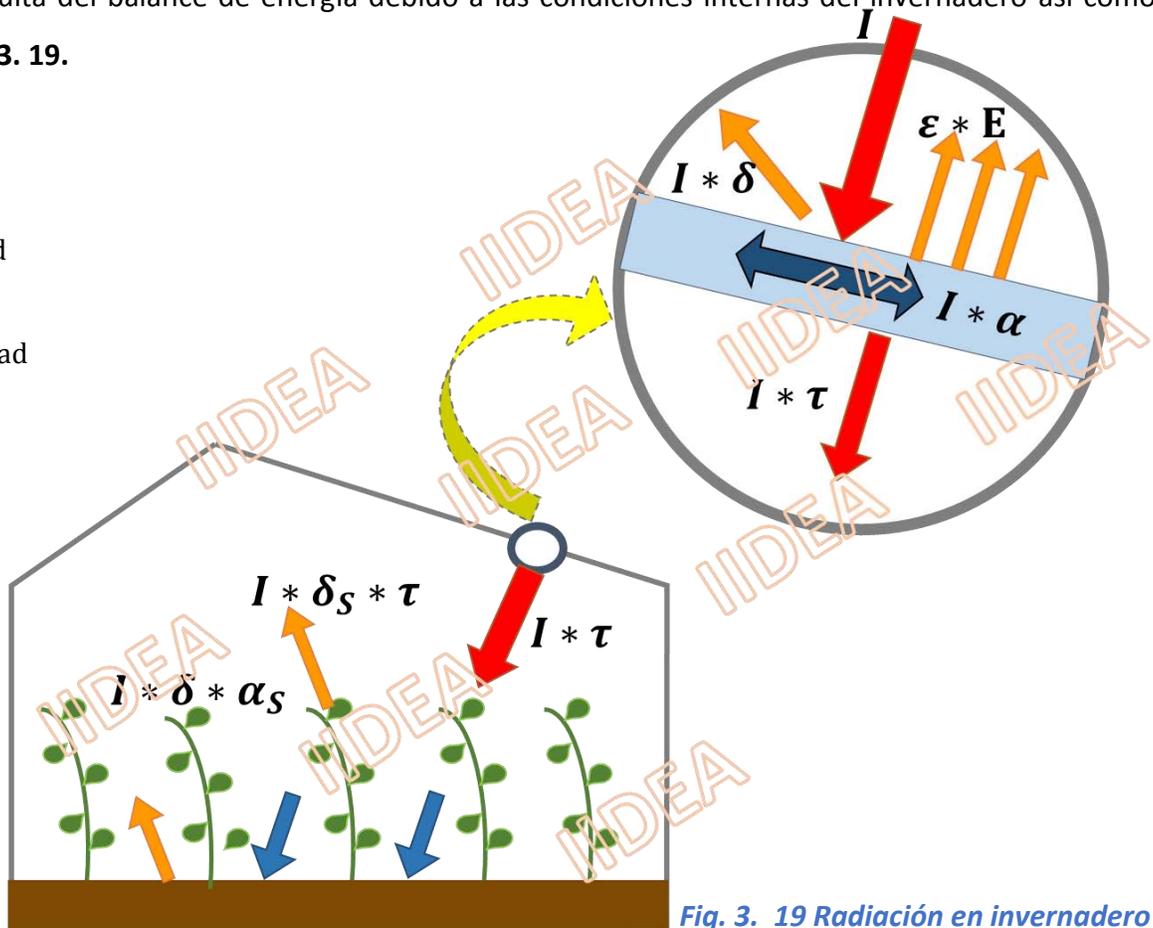


Fig. 3. 19 Radiación en invernadero

$$\alpha_s = \alpha_{pla}f_p + \alpha_{sue}(1 - f_p) \dots \dots \dots [9]$$

donde:

- α_s = coeficiente de absorción de las plantas y del suelo
- α_{pla} = coeficiente de absorción de radiación en las plantas
- α_{sue} = coeficiente de absorción de radiación solar en el suelo
- f_p = fracción del suelo cubierto por las plantas

Una función general que ha probado ser aceptable en la estimación del área foliar independientemente del tamaño de las hojas, fue:

$$AF = 0.34 \times (L \times A) - 9.31 \dots \dots \dots [10]$$

donde:

- AF = área foliar [cm²]
- A = ancho máximo hoja [cm]
- L = largo máximo hoja [cm]

Actualmente el índice de área foliar se encuentra estandarizado²⁷ para cultivos jóvenes oscila 0.56 – 1, mientras que para cultivos maduros se encuentran entre 2.94 – 2²⁸, **ver Tabla 3.8**. También es posible cuantificar este índice en función de la densidad poblacional, gramos de hojas secas por metro cuadrado, estas mediaciones suelen ajustarse a modelos cuadráticos durante todo el desarrollo de la planta.

Índice de área foliar (IAF)	α_{pla} (400 – 2800 nm)	α_{pla} (2800 – 40000 nm)
2	0.65	0.72
2.5	0.71	0.8
3	0.75	0.85
3.5	0.78	0.89
4	0.81	0.92

Tabla 3. 8 Coeficientes de absorción para la radiación solar en función del índice de área foliar [4]

El coeficiente de absorción del suelo debido a la radiación solar se puede obtener a partir del tipo del suelo así como la reflexión solar o albedo²⁹ (ρ_{sue}), **ver Tabla 3. 9**:

$$\alpha_{sue} = 1 - \rho_{sue} \dots \dots \dots [1]$$

²⁷ Datos obtenidos por Jolliet & Bailey, 1992.

²⁸ Datos aplicando los modelos de Boulard & Wang en Querétaro y Chapingo.

²⁹ **Albedo**: es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja con respecto a la radiación que incide sobre está

Tipo de superficie	Albedo (ρ_{sue})
Arcilla húmeda	0.02 – 0.08
Arcilla seca	0.16
Arena húmeda	0.09
Arena seca	0.18
cesped	0.15 – 0.28
Rastrojo	0.15 – 0.17
Tela blanca	0.30

Tabla 3. 9 Valores de albedo para diferentes tipos de suelo [4]

La temperatura de la atmósfera puede estimarse a partir de la temperatura del exterior y la nubosidad utilizando la ecuación de Swinbank, 1963:

$$T_{atm} = f_n \cdot T_e + 0.0552 \cdot (1 - f_n) \cdot T_e^{1.5} \dots \dots \dots [11]$$

donde:

f_n = factor de nubosidad

T_e = temperatura absoluta exterior [K]

El factor de nubosidad suele ser uno para cielos totalmente cubiertos y cero para cielos claros, también es posible calcular la emisividad de la atmósfera en función de la presión parcial de vapor de agua en el aire en el exterior – humedad relativa:

$$\epsilon_{atm} = 1 - 0.35 e^{\left(\frac{-10 \cdot e_e [hPa]}{T_e}\right)} \dots \dots \dots [12]$$

$$e_e = e_{se} \cdot HR_e \dots \dots \dots [13]$$

$$e_{se} = 6.1078 \cdot e^{\left(\frac{17.269 \cdot t (^{\circ}C)}{t + 273.3}\right)} \dots \dots \dots [14]$$

donde:

ϵ_{atm} = emisividad atmosférica

T_e = temperatura absoluta exterior [K]

HR_e = humedad relativa exterior

e_{se} = presión parcial del vapor saturante en el aire del exterior [hPa]

3.4.2 CALOR POR CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN, Q_{cc}

Los procesos de conducción – convección suelen llevarse a cabo entre el invernadero y el ambiente de la zona por medio de la cubierta plástica. ⁶

$$Q_{cc} = S_d \cdot K_{cc} \cdot (t_i - t_e) \quad [W] \dots \dots \dots [15]$$

donde:

S_d = superficie de la cubierta del invernadero [m^2]

t_i = temperatura del interior [$^{\circ}C$]

t_e = temperatura del exterior [$^{\circ}C$]

Entre los procesos de conducción – convección se encuentran pérdidas, por lo que es necesario cuantificar un coeficiente global:

$$K_{cc} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e}} \dots \dots \dots [16]$$

donde:

K_{cc} = coeficiente global de pérdidas de calor por conducción – convección [$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$]

e_c = espesor de la cubierta [m]

λ_c = conductividad térmica de la cubierta [$\frac{W}{m \cdot K}$], ver **Tabla 3. 10**.

h_e = coeficiente superficial de convección para el ambiente exterior del invernadero [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

h_i = coeficiente superficial de convección para el interior del invernadero [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]

Material	Conductividad térmica (λ_c)
	$[\frac{W}{m \cdot K}]$
Polietileno de baja densidad	0.45
Copolímero etileno y acetato de vinilo	0.45
Polietileno de alta densidad	0.33
Polipropileno	0.17 – 0.22
Vidrio celular	0.054 – 0.067
Policarbonato ondulado	0.19
Polimetacrilato	0.19
Vidrio	0.76

Tabla 3. 10 Conductividad térmica de algunos materiales de cubierta [4]

El coeficiente de convección en el exterior del invernadero se encuentra en función de la velocidad del viento, la diferencia de temperaturas interior – exterior del invernadero, ver **Tabla 3. 11**.

Invernadero	Coefficiente de convección exterior, (h_e)
	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
Invernadero tipo Venlo	$2.8 + 1.2 \cdot v$
Invernadero tipo túnel	$1.32 \cdot \Delta T^{0.25} \cdot v^{0.8}$
Invernadero de plástico	$7.2 + 3.84 \cdot v$
Invernadero con cubierta de polietileno	$0.95 + 6.76 \cdot v^{0.49}$

Tabla 3. 11 Formulas empíricas para el coeficiente de convección en el exterior [4]

$$h_i = 1.95 \cdot (T_c - T_i)^{0.3} \text{ para } (T_c - T_i) \leq 11.1 \text{ } ^\circ\text{C} \dots \dots \dots [17]$$

$$h_i = 7.2 \text{ para } (T_c - T_i) > 11.1 \text{ } ^\circ\text{C} \dots \dots \dots [18]$$

donde:

h_i = coeficiente superficial de convección al interior del invernadero $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$

T_c = temperatura de la cubierta $[^\circ\text{C}]$

T_i = temperatura del aire $[^\circ\text{C}]$

3.4.3 CALOR SENSIBLE Y LATENTE PERDIDO POR LA RENOVACIÓN DEL AIRE EN EL INTERIOR DEL INVERNADERO, Q_{ren}

Como ya se mencionó en el capítulo anterior es indispensable mantener niveles de CO_2 por arriba de 300 ppm, lo que requiere en primera instancia la entrada de aire no viciado, es decir, fresco, lo que traerá como consecuencia cambios de energía debido a las diferencias de temperatura y humedad del exterior. ⁶

$$Q_{ren} = V_{inv} \cdot \frac{R}{3600} \cdot \rho \cdot [c_{pa} \cdot (t_i - t_e) + \lambda_0 \cdot (x_i - x_e) + c_{pv} \cdot (t_i x_i - t_e x_e)] \dots \dots \dots [19]$$

donde:

V_{inv} = volumen del invernadero $[\text{m}^3]$

c_{pa} = calor específico a presión constante del aire = $1006.9254 \left[\frac{J}{\text{kg} \cdot K} \right]$

c_{pv} = calor específico a presión constante vapor recalentado = $1875.6864 \left[\frac{J}{\text{kg} \cdot K} \right]$

x_i, x_e = humedades absolutas interiores y exteriores $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$

ρ = densidad del aire

p = presión en el invernadero, suele considerarse como la atmosférica

λ_0 = calor latente de vaporización $\left[\frac{J}{kg}\right]$

El calor latente de vaporización se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\lambda_0 = 2502535.259 - 2385.76424 \cdot t \dots \dots \dots [20]$$

2257 kJ/kg a 100 °C

Mientras que la presión absoluta de una masa de aire húmedo es posible calcularlo conociendo la humedad relativa, presión parcial, temperatura:

$$e_s = 6.1078 \cdot e^{\left[\frac{17.269 \cdot t(^{\circ}C)}{t+237.3}\right]} \dots \dots \dots [21]$$

donde:

e_s = presión parcial del vapor en saturación [hPa]

t = temperatura ambiente o de bulbo seco [°C]

La tasa de renovación del aire debido a la infiltración de aire a través de la estructura cuando las ventanas se encuentran completamente cerradas se encuentra en función del tipo de estructura, **ver**

Tabla 3. 12.

Tipo de cubierta	R [h ⁻¹]
Construcción nueva	
Láminas de plástico	0.75 – 1
Vidrio o fibra de vidrio	0.5 – 1
Construcción antigua	
Vidrio o fibra de vidrio	1 – 2
Láminas de plástico	2 – 4

Tabla 3. 12 Tasa de renovación por infiltración en la estructura [4]

Cuando las ventanas se encuentran abiertas el índice de renovación se puede calcular:

$$R = 3600[s \cdot h^{-1}] \cdot \frac{G}{V_{inv}} \dots \dots \dots [22]$$

$$G = C_d \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{h_{12} \cdot \Delta T}{T_e \cdot \left(\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2}\right)} + \left(\frac{S_1 + S_2}{2}\right)^2 \cdot C_v \cdot V^2} \dots \dots \dots [23]$$

donde:

R = tasa de renovación de aire estructura

G = flujo de aire en el invernadero $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$

V_{inv} = volumen del invernadero $[\text{m}^3]$

g = aceleración de la gravedad = $9.807 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$

h_{12} = diferencia de alturas entre las ventanas laterales y cenital $[\text{m}]$

S_1 = superficie efectiva de ventilación lateral $[\text{m}^2]$

S_2 = superficie efectiva de ventilación cenital $[\text{m}^2]$

C_v = coeficiente adimensional del efecto del viento, ver **Tabla 3. 13**.

Coeficiente adimensional del efecto del viento, C_v	Superficie del invernadero, S_c $[\text{m}^2]$
0.10	416 (2 modulos)
0.14	179 (1 modulo)
0.071	900 (tunel)
0.13	416 (2 modulos)
0.09	204 (4 modulos)
0.11	38700 (60 modulos)

Tabla 3. 13 Valores típicos del coeficiente de efecto eólico [12]

Al haber renovación de aire dentro del invernadero se presentará caída de presión en las ventanas, es posible cuantificarla en función del tipo de ventana y si existe algún tipo de protección contra insectos, ver **Tabla 3. 14**.

$$C_d = F^{-0.5} \dots \dots \dots [24]$$

$$F = -0.0012 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^2 + 0.0396 \cdot \left(\frac{L}{H}\right) + 2.3047 + 1540 \cdot \alpha^{-1.65} + e^{(5.23-7.70 \cdot \varphi)} \dots \dots \dots [25]$$

donde:

F = coeficiente adimensional de pérdidas de carga a travez de una ventana con malla anti – insectos

L = longitud de la apertura de ventilación $[\text{m}]$

H = altura de la apertura de ventilación o profundidad característica $[\text{m}]$

α = ángulo de apertura de una ventana con alerón $[\text{°}]$

φ = porosidad de malla anti – insectos

C_d = coeficiente de caída de presión

Coeficiente de caída de presión, C_d	Tipo de ventana
0.6 – 0.8	V. rectangular vertical ^a
0.6 – 0.7	V. cenital en invernadero ^b
0.6	V. rectangular ^c
$0.64 + 0.001 \cdot \alpha$	V. cenital en invernadero ^d
$\left[1.75 + 0.7 \cdot e^{\left[-\frac{L}{32.5 \cdot H \cdot \sin \alpha}\right]}\right]^{-0.5}$	V. cenital en invernadero ^d
0.63	V. rectangular vertical ^e
0.6 – 0.7	V. rectangular vertical ^f
0.73	V. rectangular vertical ^g
0.61	V. rectangular vertical ^h
0.74	V. rectangular vertical ⁱ
$\left[1.9 + 0.7 \cdot e^{\left[-\frac{L}{32.5 \cdot H \cdot \sin \alpha}\right]}\right]^{-0.5}$	V. cenital en invernadero ^j

Tabla 3. 14 Valores del coeficiente de caída de presión [12]

3.4.4 CALOR LATENTE CONSUMIDO EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LAS PLANTAS Y EL SUELO, Q_{evp}

En los últimos estudios realizados se ha logrado determinar el calor latente para diversos cultivos hortícolas, pero para un cultivo de jitomate se puede aplicar la ecuación de Joullet & Bailey, 1992: [12]

$$Q_{evp} = S_c \cdot (0.2 \cdot R_{sol} + 5.5 \cdot DPV_i + 5.3 \cdot u) \dots \dots \dots [26]$$

$$DPV_i = e_s \cdot (t_i) - e_i \dots \dots \dots [27]$$

donde:

Q_{evp} = calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo [W]

R_{sol} = radiación solar diurna $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

u = velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$

DPV_i = deficit de presión de vapor en el interior del invernadero [kPa]

La evapotranspiración del cultivo, es posible cuantificarla con la ecuación [28] de Allen, en función de la conductividad térmica del suelo así, como el flujo de calor absorbido por el agua evapotranspirada en el interior del invernadero.

$$ET_c = k_c \cdot ET_0 \dots \dots \dots [28]$$

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (Rn - Q_{sue}) + \frac{37 \cdot \gamma}{T_i} \cdot u \cdot DPV_c}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u)} \dots \dots \dots [29]$$

$$\Delta = 4098 \frac{0.61078 \cdot e^{\left(\frac{17.269 \cdot t}{t+237.3}\right)}}{(t + 237.3)^2} \dots\dots\dots [30]$$

$$\gamma = \frac{c_{pa} \cdot p}{0.6219 \cdot \lambda_0} \dots\dots\dots [31]$$

donde:

- γ = constante psicrométrica
- c_{pa} = capacidad calorífica del aire
- p = presión atmosférica
- λ_0 = calor latente de vaporización

El calor absorbido por la evapotranspiración del cultivo por metro cuadrado $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, es:

$$Q_{evp} = \lambda_0 \cdot ET_0 \dots\dots\dots [32]$$

Mientras que el coeficiente de cultivo se puede estimar conociendo el índice de área foliar del cultivo, estados de crecimiento del cultivo, **ver Tabla 3.15:**

$$k_c = k_{c_{ini}} + \left[\frac{k_{c_{med}} - k_{c_{ini}}}{3}\right] \cdot IAF \dots\dots\dots [33]$$

cultivo	$k_{c_{ini}}$	$k_{c_{med}}$	$k_{c_{fin}}$	Altura Max. Cultivo
Berenjena	0.6	1.05	0.9	0.8
Pimiento	0.6	1.05	0.9	0.7
Tomate	0.6	1.15	0.7 – 0.9	0.6

Tabla 3. 15 Coeficientes de cultivo de cultivos hortícolas en invernaderos de plástico en Almería. [12]

3.4.5 FLUJO DE CALOR PERDIDO POR CONDUCCIÓN A TRAVÉS DEL SUELO, Q_{sue}

En climas templados se calcula que alrededor del 10 % de las pérdidas de calor en invernaderos se producen a través del suelo, por lo que es indispensable cuantificar este flujo de energía. ⁷

$$Q_{sue} = K_s \cdot S_c \cdot \frac{(t_i - t_s)}{p} \dots\dots\dots [34]$$

donde:

Q_{sue} = conducción a través del suelo [W]

K_s = conductividad térmica del suelo $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$, ver Tabla 3.16.

S_c = superficie del suelo [m^2]

t_i = temperatura dentro del invernadero [$^{\circ}C$]

t_s = temperatura del suelo del invernadero [$^{\circ}C$]

p = profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura [m]

Material	Conductividad térmica de algunos tipos de suelo, K_s
Arena de cuarzo	7.7
Grava	2.3 – 2.8
Tierra húmeda	2.0
Tierra seca	2.0
Lana de roca	0.038 – 0.048
Arcilla seca	1.0 – 1.2

Tabla 3. 16 Conductividad térmica de suelos [12]

3.4.6 ENERGÍA CALORÍFICA QUE SERÁ NECESARIA APORTAR (Q_{cal}) O ELIMINAR (Q_{ref}) DEL INVERNADERO (Q_{cli})

|

$$Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} - R_n \dots \dots \dots [35]$$

Q_{cli} = Calor de climatización [W]

Una vez cuantificada la energía necesaria de climatización será posible determinar la temperatura necesaria del recurso geotérmico, flujo másico y una propuesta general de la tubería.

Finalmente el calor emitido por nebulización (Q_{ref}) dentro del invernadero genera una caída en la temperatura del aire, que es posible cuantificarlo con la siguiente ecuación: ⁷

$$Q_{ref} = qu_{evp} \cdot \lambda_0 \dots \dots \dots [36]$$

donde:

Q_{ref} = calor de nebulización [W]

qu_{evp} = caudal emitido por las boquillas de nebulización $\left[\frac{kg}{s}\right]$

λ_0 = calor latente de vaporización del agua $\left[\frac{J}{kg}\right]$

CONCLUSIONES

Se obtuvieron condiciones climáticas máximas, mínimas y absolutas de la estación meteorológica “Rancho Williams” de 1982 – 2010, estas temperaturas serán los parámetros de diseño a considerar tanto para invierno como para verano; así como las características estándares de un Invernadero para climas calurosos como es el área de cultivo con una distribución del cultivo dentro de una área de 186 m² donde es posible plantar 427 tomateras que producirán aproximadamente entre 3843 - 5551 kg de tomate en un periodo de seis meses.

En conclusión en este capítulo se obtuvieron:

1. Propuesta del tipo de invernadero para climas calurosos y distribución de cultivo.
2. Las condiciones de operación del invernadero en función del tipo de cultivo y clima de la región donde será colocado.
3. El balance de energía en función del material de cubierta, las características óptimas de cultivo, así como de las condiciones climáticas.
4. El calor de refrigeración y calefacción así como la transferencia de calor a través del suelo – cubierta plástica y el cultivo.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se establecieron las bases para la cuantificación de la cantidad de energía dentro del invernadero, así como los parámetros de diseño en función del clima de una región, un cultivo determinado y las propiedades de la cubierta plástica del invernadero.

En este capítulo se presentaran los resultados obtenidos para los diferentes casos críticos a evaluar en la propuesta de diseño de nuestro invernadero geotérmico.

4. 1 DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO

En el siguiente diagrama, **Fig. 4. 1**, se muestra la propuesta de funcionamiento de los sistemas de refrigeración y calefacción del invernadero geotérmico donde la principal fuente de energía será el recurso geotérmico de baja entalpia, dicho recurso cederá su energía por medio de un intercambiador de calor (agua – aire) al aire que proviene del ambiente para el sistema de calefacción; mientras que para el sistema de refrigeración se propone la utilización de bombas de calor que utilizarán el recurso geotermico para enfriar agua que será empleada posteriormente para el sistema de nebulización e incluso con el uso de algún refrigerante sería posible enfriar aire y recircularlo en el interior del invernadero para el mes más cálido.

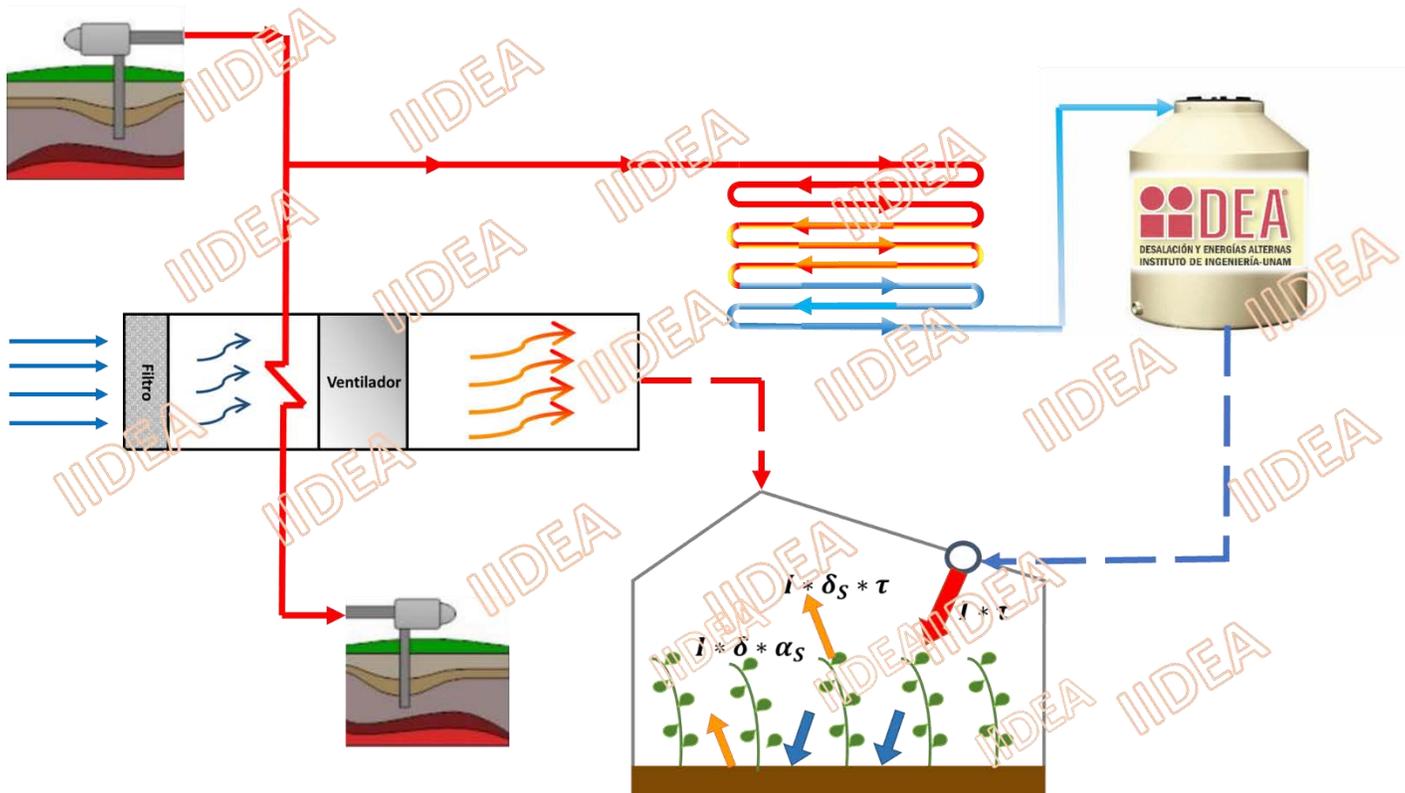


Fig. 4 1 Diagrama de los procesos térmicos involucrados dentro del invernadero

4.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

Como ya se mencionó anteriormente los parámetros de diseño se encuentran en función de las necesidades del cultivo de jitomate, así como de las condiciones climáticas registradas en el Ejido Guadalajara, ubicado en el municipio de Mexicali, ver **Tabla 4. 1** y **Tabla 4.2**.

4.2.1 CALEFACCIÓN

Coef. de absorción del material de cubierta para la radiación solar

Radiación solar extraterrestre , en mm/día	R_o	7.4	[mm/día]
Radiación solar incidente (Diciembre)	I	92.4	[kW/m ²]
Fracción del suelo cubierta por las plantas	f_p	0.8	
Coefficiente de absorción de las plantas para la radiación solar	α_{pla}	0.7	

TEMPERATURA ABSOLUTA DEL EXTERIOR

	t_e		
Temperatura mínima absoluta del mes más frío (DICIEMBRE)		-5.0	[°C]
Temperatura media de las mínimas diarias (DICIEMBRE)		1.7	[°C]
Temperatura media de las mínimas mensuales		5.3	[°C]

TEMPERATURA AL INTERIOR

	t_i		
Temperatura mínima biológica del cultivo de jitomate		10.0	[°C]
Temperatura óptima nocturna del cultivo de jitomate		16.0	[°C]
Temperatura del suelo a la profundidad, p	t_{sp}	10.0	[°C]

HUMEDAD RELATIVA

Humedad relativa en el interior	HR_i	60.0	%
---------------------------------	--------	------	---

OTRAS VARIABLES

Tasa o índice de renovación del aire en el invernadero	R	0.75 – 1	[h-1]
Temperatura de la superficie del suelo del invernadero	t_s	5.3	[°C]
Radiación solar incidente (medio día del mes mas frio)	I	332568000.0	[J/m ²]
Altura sobre el nivel del mar ASM	Z	29.0	[m]

Tabla 4. 1 Parámetros de diseño para el sistema de calefacción

4.2.2 REFRIGERACIÓN

TEMPERATURA ABSOLUTA DEL EXTERIOR

	t_e	
Temperatura media mensual del mes más calido (Agosto)	50	[°C]
Temperatura media de las máximas diarias (Agosto)	42.34	[°C]
Temperatura máxima absoluta	52	[°C]

TEMPERATURA AL INTERIOR

	t_i	
Máxima temperatura optima del cultivo de jitomate	26	[°C]
Temperatura máxima biológica	30	[°C]

HUMEDAD RELATIVA

Humedad relativa en el exterior (días de verano al medio día)	HR_e	28.4	%
Humedad relativa en el interior (días de verano al medio día)	HR_i	60	%

CUBIERTA PLÁSTICA DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD

Espesor del material de cubierta	e_c	0.18	mm
Conductividad térmica de cubierta	λ_c	0.45	[W/m K]
Velocidad del viento en el exterior	v	13.32	[km/h]
Tasa de renovación del aire del invernadero (Tabla 3.14)	c_d	0.6	[1/h]

SUPERFICIES

Superficie cubierta por plantas	S_p	144	[m ²]
Superficie captadora de la radiación solar	S_c	186	[m ²]
Superficie desarrollada de la cubierta del invernadero	S_{dC}	224.83	[m ²]
Superficie desarrollada de los laterales del invernadero	S_{dL}	244.83	[m ²]
Volumen del invernadero	V_{inv}	1100	[m ³]

Radiación Solar Extraterrestre en [MJ/m² día]

Latitud Norte	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
34	18.7	23.7	29.9	36.1	40	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3
32.6	19.54	24.47	30.46	36.38	40	41.46	40.73	37.81	32.59	26.3	20.74	18.14
32	19.9	24.8	30.7	36.5	40	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5

Tabla 4. 2 Parámetros de diseño para el sistema de refrigeración

RADIACIÓN SOLAR

Radiación solar extraterrestre , en mm/día	R_0	15.426	[mm/día]
Radiación solar incidente (medio día del mes más caluroso)	I	218	[kW/m ²]
Coef. de absorción del material de cubierta para la radiación solar	α	0.030	
Coef. de transmisión de la cubierta para la radiación	τ	0.82	
Coef. de transmisión de la malla de sombreo	τ	0.23	
Constante de Stefan - Boltzman	σ	6E-08	[W/m ² * K ⁴]
Coef. de transmisión para la radiación térmica	τ_{ter}	0.58	
Coef. de transmisión para la radiación térmica de pantalla	τ_{ter}	0.23	
Emisividad del material de cubierta para la radiación térmica	ϵ_{ter}	0.13	
Fracción del suelo cubierta por las plantas	f_p	0.77	
Coef. de absorción de las plantas para la radiación solar	α_{pla}	0.65	
Coef. de reflexión del suelo a la radiación solar o albedo	ρ_{sue}	0.16	
Factor de nubosidad	f_n	0	
Coefficiente de absorción de plantas y del suelo	α_s	0.693	

OTRAS VARIABLES

Longitud de las ventanas	L_v	3.5	[m]
Diferencia de altura entre ventanas	H_v	1.3	[m]
Número de ventanas	Núm.	10	
Coeficiente de caída de presión	C_d	0.6	
Coeficiente de efecto eólico	C_v	0.14	
Velocidad del aire en el invernadero	u	0.3	[m/s]
Coef. De intercambio térmico del suelo	K_s	2	[W/m ² °C]
Temperatura de la superficie del suelo del invernadero	t_s	40.3	[°C]
Temperatura del suelo a la profundidad, p	t_{sp}	20	[°C]
Profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura	p	0.5	[m]

Tabla 4. 3 Parámetros de diseño para el sistema de calefacción

Para poder hacer una cuantificación general es necesario determinar las situaciones más críticas a las que deberá trabajar nuestro invernadero, de esta manera es posible determinar la cantidad de energía neta que será necesaria disipar o ceder, así como las pérdidas de calor por conducción y convección, provocadas por la diferencia de temperatura que existe entre el interior y el exterior, la cantidad de energía consumida por el cultivo en los procesos fotosintéticos del cultivo y las tasas de renovación de aire.

Los casos más críticos que se cuantificaron se realizaron partiendo de la premisa que el intervalo de temperatura dentro del invernadero tiene como límite [10 – 30] °C, fueron los siguientes:

I. Calefacción para el mes más frío del año (DICIEMBRE), ver Tabla 4. 4.

- Se consideran el rango de temperatura óptimo inferior (16 °C), que deben mantenerse para garantizar el confort del cultivo y por otro lado tenemos las temperaturas: mínima absoluta registrada, temperatura mínima promedio de las mínimas diarias del mes más frío y la temperatura mínima promedio mensual del mes más frío.
- Se considera que el cultivo no puede estar por debajo de los 10 °C, ya que a dicha temperatura el cultivo comienza a sufrir daños y por otro lado tenemos las temperaturas: mínima absoluta registrada, temperatura mínima promedio de las mínimas diarias del mes más frío y la temperatura mínima promedio mensual del mes más frío.

Caso	Temperaturas		Rango Final [°C]	
	Interior	Exterior	Ti	Te
A	Óptima nocturna	mínima absoluta registrada DICIEMBRE	16	-5
B	Óptima nocturna	mínima promedio de las mínimas diarias DICIEMBRE	16	1.74
C	Óptima nocturna	mínima promedio mensual DICIEMBRE	16	5.34
D	Mínima Letal	mínima absoluta registrada DICIEMBRE	10	-5
E	Mínima Letal	mínima promedio de las mínimas diarias DICIEMBRE	10	1.74
F	Mínima Letal	mínima promedio mensual DICIEMBRE	10	5.34

Tabla 4. 4 Temperaturas críticas a considerar para el sistema de calefacción.

II. Refrigeración para el mes más caluroso del año (AGOSTO), ver Tabla 4. 5.

- Se consideran los rangos de temperatura óptimos superiores (26 °C), que garantiza el confort del cultivo, de esta manera se asegura el óptimo desarrollo y por otro lado tenemos las temperaturas: máxima absoluta registrada, temperatura promedio de las máximas diarias del mes más cálido y la temperatura máxima promedio mensual del mes más cálido.
- Se considera que el cultivo no puede estar por arriba de los 30 °C, ya que a dicha temperatura el cultivo muere y por otro lado tenemos las temperaturas: máxima absoluta registrada, temperatura promedio de las máximas diarias del mes más cálido y la temperatura máxima promedio mensual del mes más cálido.

Caso	Temperaturas		Rango Final [°C]	
	Interior	Exterior	Ti	Te
G	Máxima Letal	máxima absoluta registrada AGOSTO	30	52
H	Máxima Letal	máxima promedio de las mínimas diarias AGOSTO	30	50
I	Máxima Letal	máxima promedio mensual AGOSTO	30	42
J	Máxima Letal	máxima Letal	30	30
K	Máxima Letal	óptima diurna	30	26
L	Óptima diurna	máxima absoluta registrada	26	52
M	Óptima diurna	máxima promedio de las mínimas diarias AGOSTO	26	50
N	Óptima diurna	máxima promedio mensual AGOSTO	26	42
O	Óptima diurna	Máxima Letal	26	30
P	Óptima diurna	Óptima diurna	26	26

Tabla 4. 5 Temperaturas críticas a considerar para el sistema de refrigeración

4.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la siguiente **Tabla 4. 6** se presentan las cantidades de calor necesario suministrar en diciembre, así como la cantidad de energía que será necesario disipar en Agosto, para garantizar el óptimo crecimiento del cultivo de jitomates .Los procedimientos completos se presentan en el **ANEXO II**.

Caso	Ti [°C]	Te [°C]	Rn [W]	Qcc [W]	Qren [W]	Qevp [W]	Qevp [W]	Qsue [W]	Q total [kW]
Calefacción									
A	16	-5	-63616	-16942	-759021	-28123	-30509	-4464	-745
B	16	2	-21537	-7407	-504324	-28123	-26595	-4464	-523
C	16	5	63616	-16942	-759021	-28123	-30509	-4464	-872
D	10	-5	-63616	-11222	-509751	-57485	-22462	0	-515
E	10	2	-21537	-2673	-259655	-57485	-15766	0	-298
F	10	5	63616	-11222	-509751	-57485	-22462	0	-642
Refrigeración									
G	30	52	87389	23349	933234	-108604	-164341	-7440	753
H	30	50	85166	21227	754598	-108604	-154027	-7440	575
I	30	42	77257	13097	178195	-108604	-112968	-7440	215
J	30	30	66319	0	485692	-108604	0	-7440	303
K	30	26	63214	2187	-652748	-108604	-54577	-7440	-830
L	26	52	87389	27595	1205773	-137173	-172579	-4464	1004
M	26	50	85166	25472	1027043	-137173	-162888	-4464	826
N	26	42	77257	17342	450252	-137173	-125175	-4464	249
O	26	30	66319	2187	214482	-137173	-54577	-4464	283
P	26	26	63214	0	380811	-137173	0	-4464	176

Tabla 4. 6 Resultados finales obtenidos del Balance de Energía

4.3.1. SISTEMA DE CALEFACCIÓN

Para el sistema de calefacción las mayores pérdidas de calor se presentan debido a las renovaciones de aire en el interior debido principalmente a que la temperatura dentro del invernadero es más elevada que la temperatura exterior, mientras que la humedad dentro del invernadero siempre debe mantenerse constante y por lo general siempre es mayor que la exterior, por lo que los casos más críticos serían A y D la cantidad de energía necesaria suministrar oscila entre 522 – 689 [kW].

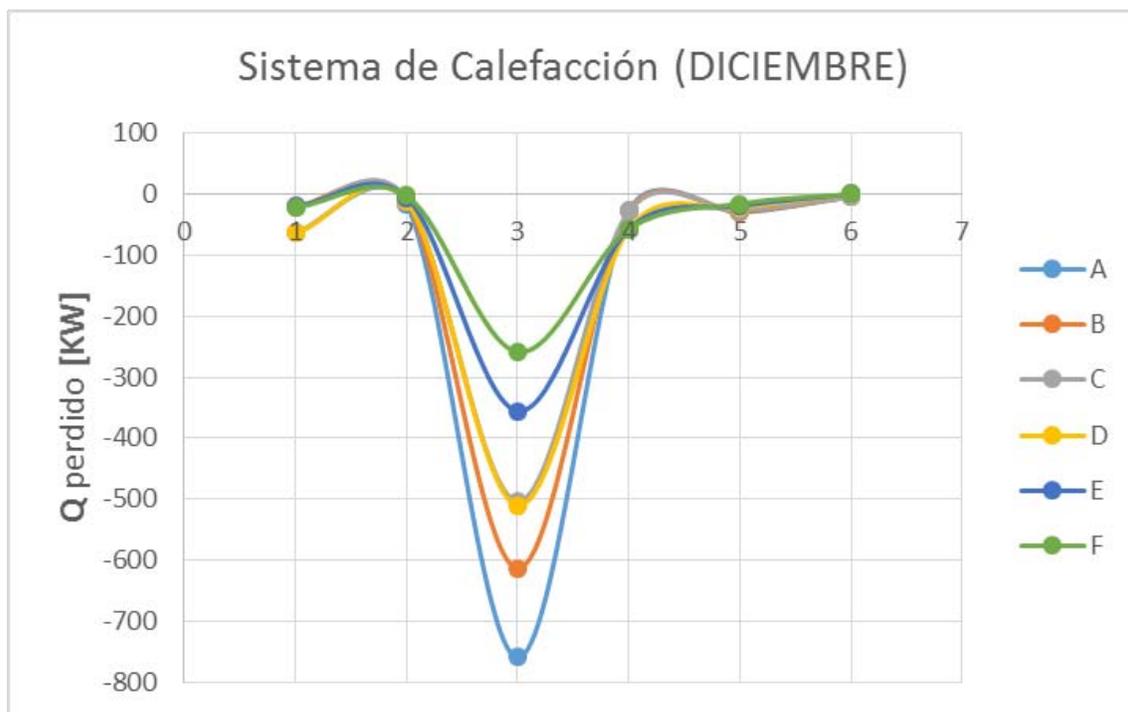


Grafico 4. 1 Sistema de Calefacción

4.3.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Para el sistema de refrigeración las pérdidas de calor más representativas son debido a la renovación de aire en el interior, debido principalmente a que la temperatura del exterior es mayor, como podemos observar en la **Tabla 4. 2** si comparamos el caso **N** vs **L** donde el delta de temperatura varía sólo por 10 °C la carga a disipar se cuadruplica, siendo el caso **L** el más crítico donde la cantidad de energía necesaria a disipar es de 1004 [kW].

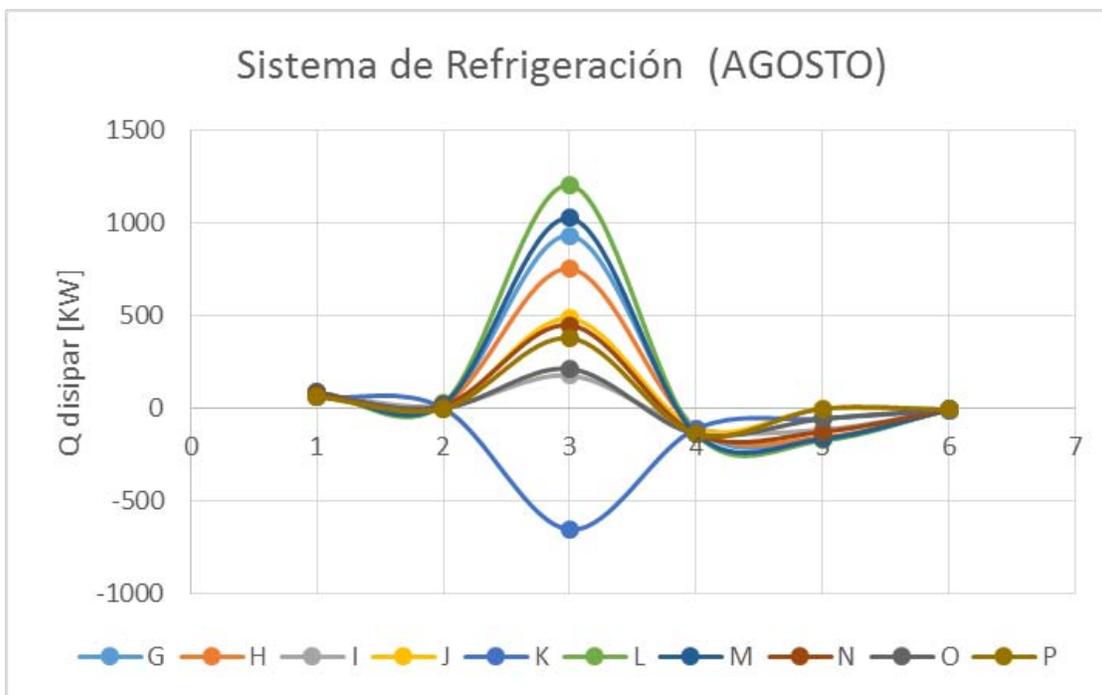


Grafico 4. 2 Sistema de Refrigeración

Debido principalmente a las condiciones climáticas en el Ejido Guadalajara, podemos observar que la cantidad de energía a disipar siempre es mayor en comparación con la que se debe suministrar, **ver Tabla 4. 3**, ya que es preciso contrarrestar las elevadas temperaturas que se registran en el municipio de Mexicali.

Con el sistema de nebulización es posible reducir **5.4 [kW]**, lo que equivaldría a disipar el calor generado por cincuenta bombillas de 100 [W], con el simple hecho de esparcir agua por todo el invernadero, ver cálculo en el **ANEXO III**.

Una vez cuantificado el calor neto a suministrar es posible cuantificar la temperatura aproximada del recurso geotérmico que garantice los rangos de temperatura óptimos para el crecimiento del cultivo. El determinar la temperatura del recurso puede realizarse de varias maneras, debido a la limitante en los alcances de este trabajo sólo se plantean las condiciones que se deben prever para su obtención³⁰

³⁰ Ver Anexo III

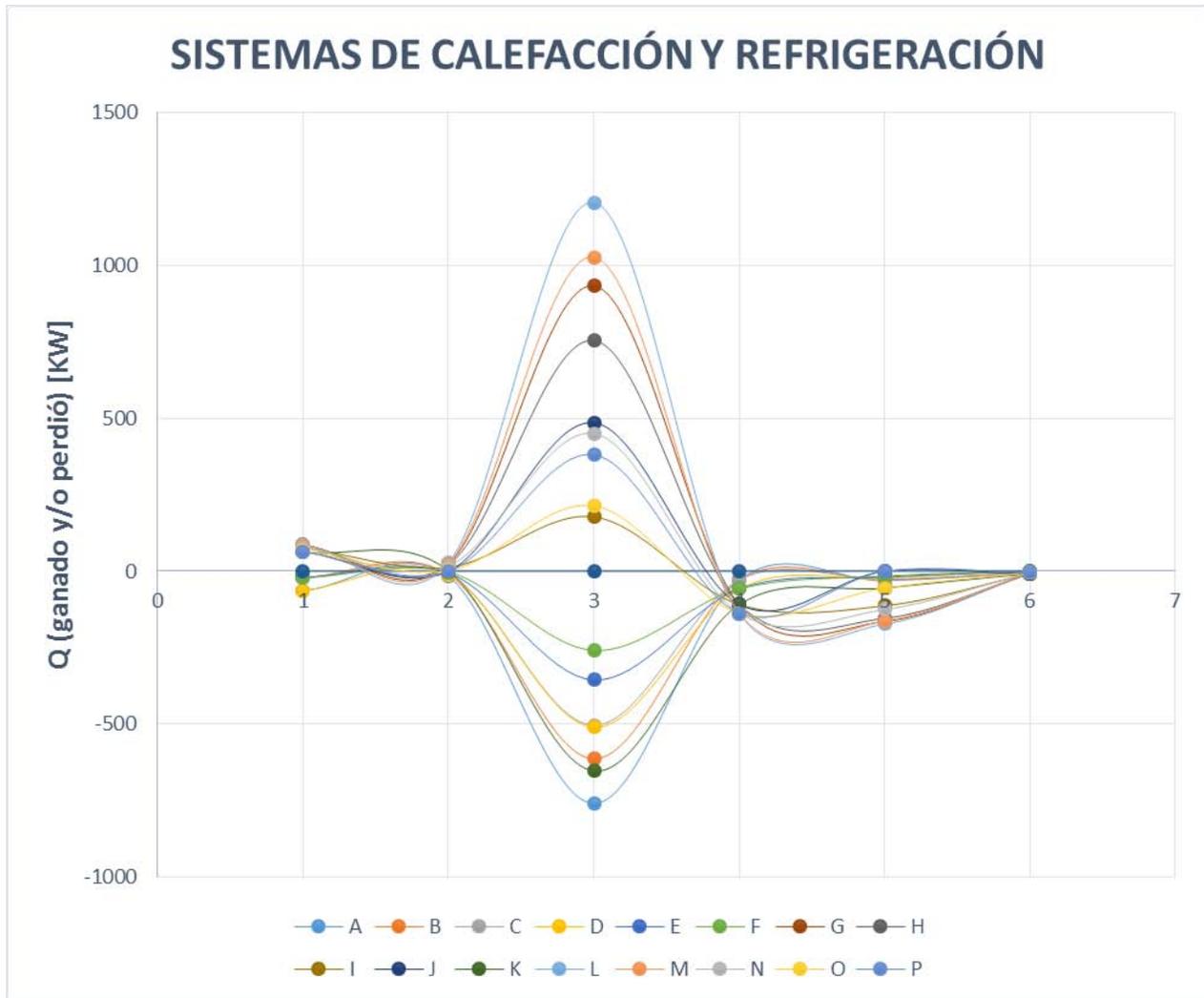


Grafico 4. 3 Cargas térmicas pico del sistema de Calefacción y Refrigeración

CONCLUSIONES

Es importante recordar que a lo largo del crecimiento de la planta las temperaturas óptimas no se mantienen constantes sino que dependiendo de la etapa de crecimiento ésta temperatura óptima cambiará, por razones de simplificación se generalizó y se seleccionaron los casos más representativos. Existen varios puntos importantes a destacar de los resultados obtenidos en el Balance Energético, entre los que destacan los siguientes:

- Para el sistema de calefacción considerando las condiciones más críticas (caso A) y las promedio (caso B) para el mes más frío del año, la cantidad de calor a suministrar por metro cuadrado es de entre 3.4 – 4 $\left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right]$, lo que se traduce a que será necesario tener recurso geotérmico a una temperatura aproximada de entre 70 – 120 °C. Lo que permitiría generar dos producciones de jitomate al año en comparación con la agricultura convencional donde sólo es posible una cosecha al año.
- Para el sistema de refrigeración se propuso la implementación de un sistema de bombas de calor geotérmicas estableciéndose así las especificaciones necesarias a considerar con el fin de la selección adecuada del equipo, por lo que la carga a disipar por metro cuadrado oscila entre 3.7 – 5.4 $\left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right]$
- Se sentaron las bases teóricas para trabajos futuros de la selección de equipos.

CAPÍTULO 5. CAD Y PLANOS

En este capítulo se presentarán los planos de la propuesta de diseño del invernadero geotérmico iIDEA, en los que se representarán de forma muy general un invernadero asimétrico ideal para climas cálidos y que a su vez absorbe la mayor cantidad de radiación solar en el periodo invernal.

5.1 PRESENTACIÓN

A continuación se presentan diferentes vistas del invernadero asimétrico, propuesto para el cultivo de jitomates, ver **Fig. 5.1**.

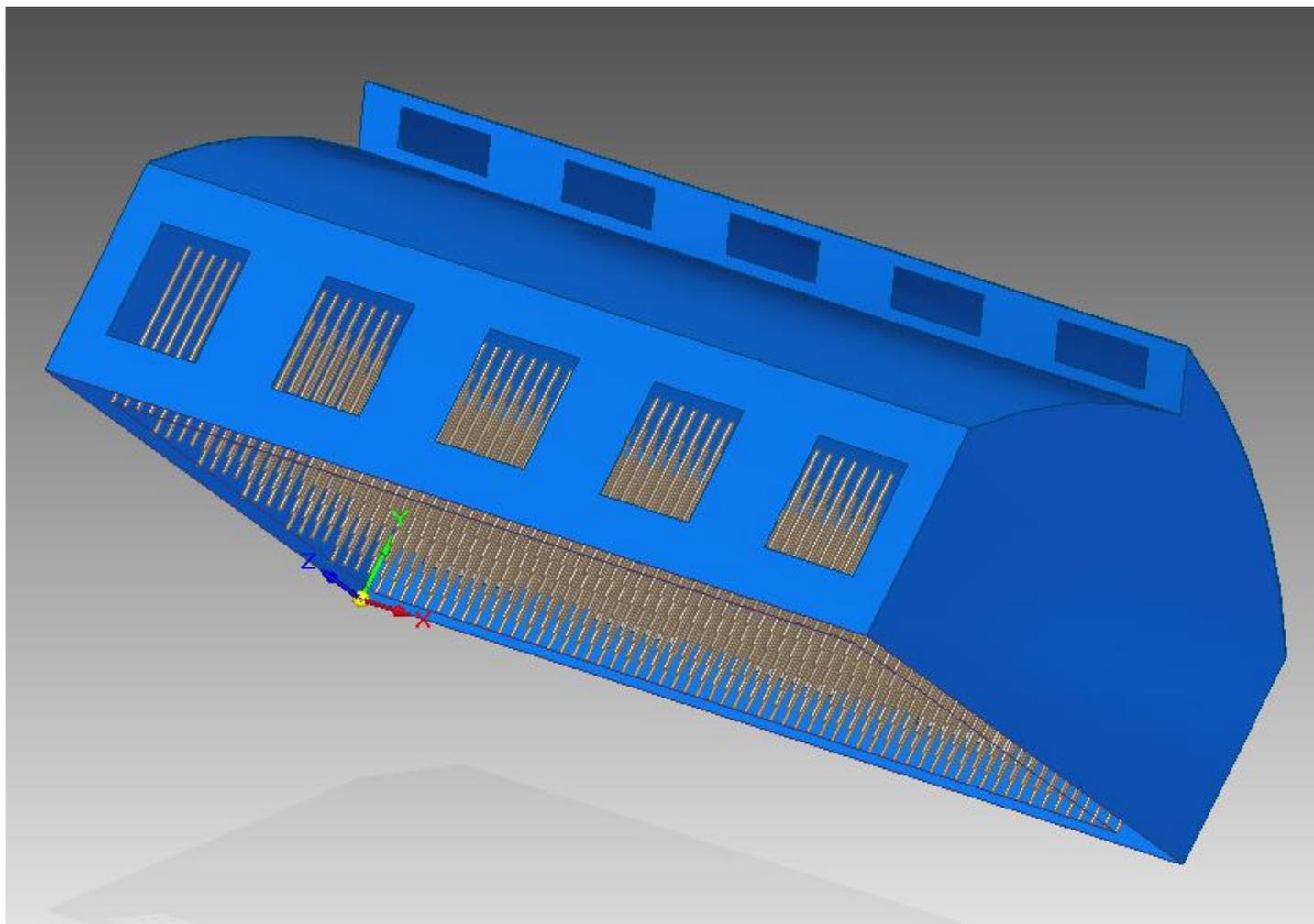


Fig. 5 1 Invernadero iIDEA (surcos y cubierta plástica, ensamble)

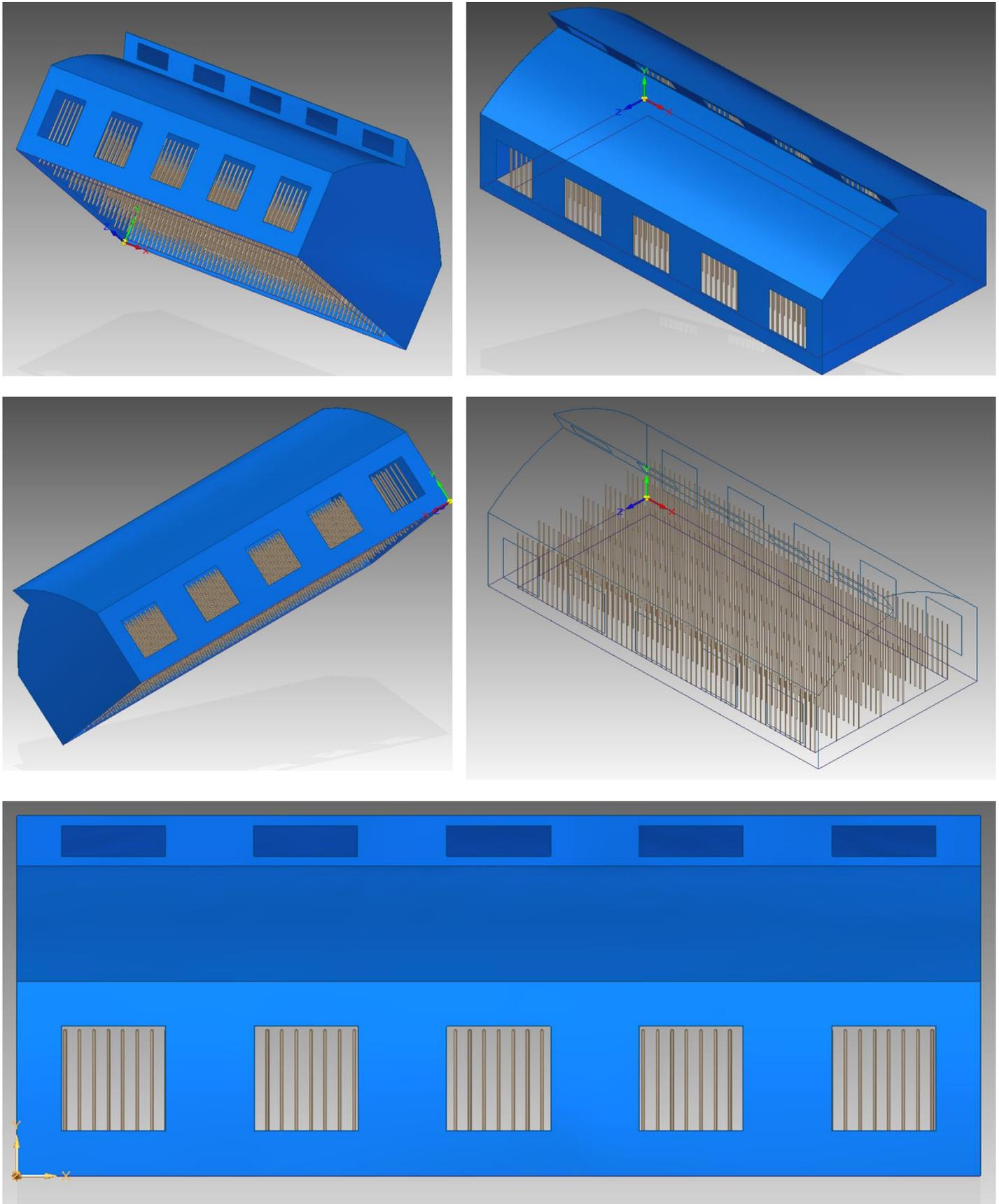


Fig. 5 2 Invernadero Geotérmico iIDEA, diferentes vistas

5.2 PLANOS

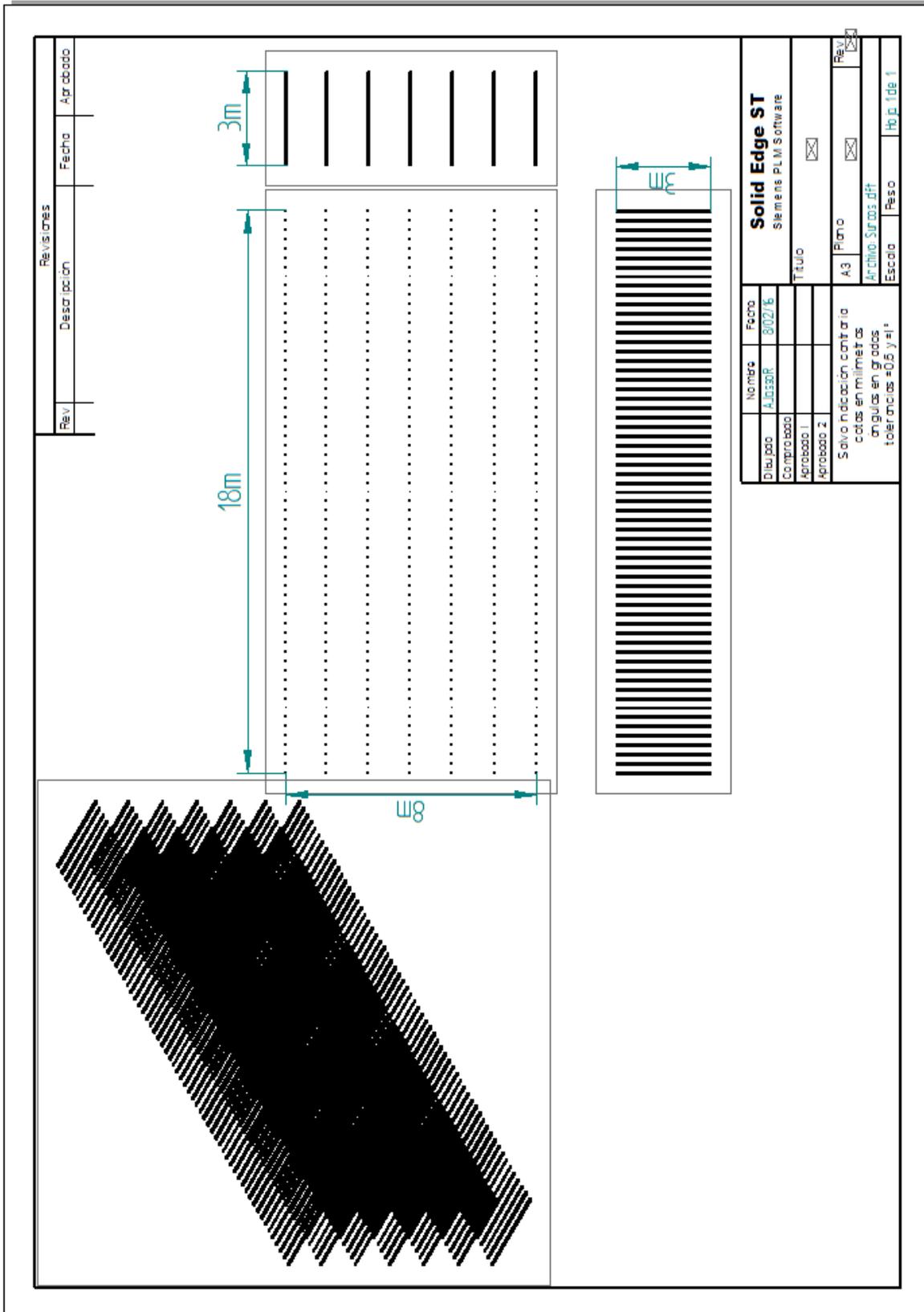


Fig. 5 3 Distribución de surcos dentro del invernadero

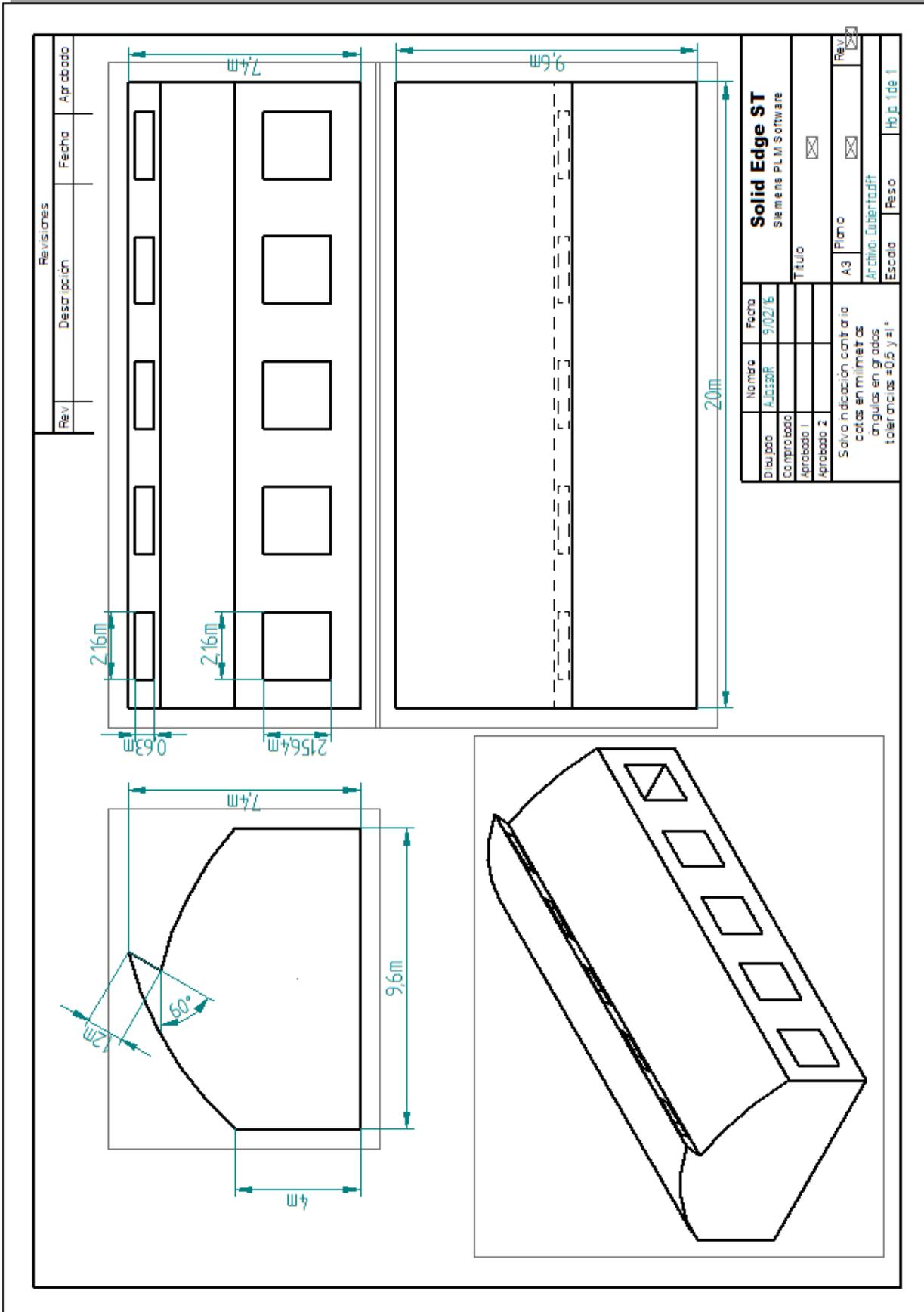


Fig. 5 4 Cubierta plástica y distribución de ventanas

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

México desde el 2011 ocupa los primeros puestos en exportación de jitomate de primera calidad, pese a que más del 80 % de la producción total aún sigue siendo a cielo abierto, sin el control adecuado de los recursos, por lo que los costos variables (insumos, energía eléctrica y combustibles) representan hasta el 90 % de los costos totales. Es aquí donde radica la importancia de realizar investigación de punta que tenga como objetivo el mejoramiento de estos sistemas, haciéndolos más rentables y que se ajusten a las nuevas políticas energéticas, es decir, la implementación de energías renovables limpias.

La implementación de un invernadero amigable con el ambiente se vuelve indispensable, sobre todo invernaderos que cuenten con sistemas de climatización que permitan generar dos cosechas al año con un rendimiento mayor al promedio nacional $18 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$, y que estos sistemas funcionen con energía geotérmica cobra gran significado.

De los resultados obtenidos en el Balance Energético es importante recalcar que dicho análisis fue realizado considerando las condiciones del ejido Guadalajara, situado en Baja California y generalizando las temperaturas óptimas de cultivo. Para el sistema de calefacción la cantidad de calor a suministrar por metro cuadrado es de entre $3.4 - 4 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$, con la simple implementación de sistemas que aumenten la transmisión solar sería posible incrementar la productividad hasta en un 8 %; Mientras que la carga del sistema de refrigeración debe disipar entre $3.7 - 5.4 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$ debido a la diferencia de temperaturas dentro y fuera del recinto de casi $30 \text{ }^\circ\text{C}$, aunado a esta situación están las renovaciones de aire del exterior, propiciando grandes pérdidas de energía que pueden ser reducidas. Con los sistemas propuestos se podrían obtener cosechas anuales que oscilan entre $7.6 - 11 \text{ [ton]}$ de jitomate con un rendimiento de cultivo de entre $20 - 30 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$.

Como observamos en el gráfico de resultados, **ver Gráfico 4.3**, de los consumos energéticos totales para los sistemas de climatización la mayor cantidad de energía a suministrar y disipar en nuestro invernadero se debe a la renovación del aire necesaria para conseguir una distribución uniforme de CO_2 y la aeración del cultivo, estos picos tan grandes se deben principalmente a que el aire que ingresa proviene del exterior de forma directa, cuando lo óptimo es que se sometiera a un proceso de previo ya sea de precalentamiento o

humidificación con agua a una temperatura muy cercana a la requerida, de esta manera se podría garantizar que el cambio de temperatura no fuera tan brusco y se tendrían menos pérdidas por cambio de fase del agua.

Es importante enfatizar que el crecimiento del campo mexicano se encuentra limitado por el precio de los combustibles fósiles empleados en los sistemas de climatización que de manera general equivale a más de 20 % de la demanda energética total, actualmente el costo por kilogramo de jitomate mexicano es de € 1.28 euros mientras que EE. UU que consume miles de toneladas de jitomate mexicano no paga más que €1.00 por kilogramo, mermando no sólo ganancia sino que ni siquiera se cubren los costes de producción, mientras que los invernaderos geotérmicos Holandeses son capaces de posicionar sus productos con ganancias de hasta 400 % debido a sus bajos costos de producción y la alta calidad de producción (con rendimientos de hasta $80 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$) y a su valor agregado pues son productos totalmente orgánicos libres de pesticidas y con ahorros energéticos de hasta 7 % en comparación con los invernaderos convencionales.³¹

Como trabajos futuros se debe calcular la temperatura necesaria del recurso geotérmico, la selección de los equipos y la propuesta de sistemas que permitan minimizar los cambios bruscos de temperatura, provocados al introducir al invernadero aire a la temperatura del exterior, por medio de recubrimientos y aislantes. Actualmente es posible evitar estos cambios bruscos con sistemas de pantallas térmicas y de sombreado, mientras que las cubiertas plásticas de doble capa son capaces de modular la cantidad de radiación solar y minimizar las pérdidas de calor por convección, en los invernaderos españoles el uso de estos sistemas han generado un aumento en la producción del 30 % pues el calor recogido durante el día es posible mantenerlo durante la noche y los ahorros de energía se reflejan en un 20 % a un 60 %.

Controversialmente México es un país que lo tiene todo en flora, fauna, ecosistemas y recursos energéticos, pero al mismo tiempo seguimos careciendo de mucho, es decir, contamos con innumerables recursos naturales, los cuales no se aprovechan de manera eficiente y controlada. Actualmente el sector agropecuario podría verse beneficiado por el mundo de oportunidades que brinda la aplicación directa de los diversos recursos

³¹ Empresa Lameyer S. L., H. N. (2016). El precio del tomate español casi al doble del procedente de Holanda. *Mercados*. [20]

geotérmicos disponibles en gran parte del país, que como ya se mencionó qué mejor ejemplo el aumento en la producción nacional de más 40 % con el simple hecho de mejorar las técnicas de cultivo.

Inimaginables serían los alcances que tendría la implementación de invernaderos agrícolas donde no sólo se aumenta la producción sino que la principal fuente de energía es continua, limpia totalmente mexicana que reactivaría la economía nacional, aportando oportunidades de empleo y aunque suene ambicioso podrían mitigarse fenómenos como la migración, pobreza. Es por esta razón el énfasis que hace el grupo iiDEA con el desarrollo de proyectos sustentables que no sólo beneficien los bolsillos de los grandes ejidatarios, sino proyectos que estén dirigidos a las comunidades agrícolas que pese a todo y con el sudor de su frente ponen en alto en nombre de México a nivel mundial.

ANEXO I. PROPIEDADES CUBIERTA INVERNADERO

Materiales utilizados en cubiertas simples, en dobles paredes o como pantallas térmicas	Espesor (mm)	Radiación solar (300-2.500 nm)			Radiación visible (380-760 nm)			Radiación térmica (2.500-40.000 nm)			U (W/m ² .°C)	ρ _c (g/cm ³)
		(α = ε)	(τ)	(δ)	(α = ε)	(τ)	(δ)	(α = ε)	(τ)	(δ)		
Vidrio hortícola (VH)	4	0,03	0,89	0,08	0,01	0,91	0,08	0,90	0,00	0,10	6,7	2,40
Poliéster (PRV)	1	0,01-0,02	0,89-0,92	0,07-0,09	0,01	0,93	0,06	0,64-0,69	0,27-0,32	0,04		1,50
PVC rígido	18	0,11	0,62	0,27	0,02	0,61	0,37	0,92	0,01	0,07	3,8	1,30
Polimetacrilato de metilo (PMMA)	8	0,06	0,82	0,12	0,01	0,92	0,07	0,98	0,00	0,02	3,4	1,19
Polycarbonato (PC)	4	0,08-0,11	0,78	0,14-0,15	0,06-0,10	0,75-0,79	0,15	0,89-0,98	0,02-0,03	0,09	3,5	0,17-0,20
Polietileno sin aditivos (PE)	0,1	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,04-0,19	0,79-0,84	0,02	9,1	0,92
Polietileno de baja densidad (PEbd)	0,18	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,13-0,40	0,53-0,80	0,07	9,4-16,2	0,91
Polietileno de larga duración (PEld)	0,1	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,20-0,40	0,53-0,76	0,04-0,07	9,4-16,2	0,92
Polietileno infrarrojo (PEir)	0,1	0,03	0,89	0,08	0,01	0,89	0,10	0,77	0,20	0,03	8,6-13,0	0,92
Polietileno térmico (PEt)	0,18	0,03	0,89	0,08	0,02	0,90	0,08	0,80	0,10	0,03	8,6-13,0	0,92
Copolímeros EVA	0,1	0,02	0,89-0,91	0,07-0,09	0,00	0,90-0,92	0,08-0,10	0,42-0,58	0,39-0,55	0,03	7,8	0,94
Coextrusiones PE-EVA-PE	0,2	0,02-0,04	0,82-0,89	0,09-0,14	0,01	0,82-0,85	0,14-0,17	0,59	0,38	0,03	8,8-10,4	0,93
PVC plastificado	0,1	0,02	0,91	0,07	0,01	0,92	0,07	0,62	0,06	0,32	7,7	1,3
PVC armado	0,15	0,06	0,73-0,74	0,20-0,21	0,03	0,73-0,76	0,21-0,25	0,53-0,76	0,09-0,32	0,15	6,5	1,3
Polipropileno (PP)	0,8	0,06	0,74	0,20	0,04	0,73	0,23	0,69-0,71	0,21-0,26	0,05-0,08	11,2	0,91
VH+VH	4+4	0,15	0,72	0,13	0,03	0,82	0,15	0,83	0,00	0,17	3,2	
VH+PE	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,01	0,86	0,13	0,87	0,01	0,12	4,2	
VH+EVA	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,02	0,86	0,12	0,87	0,01	0,12	4,0	
PE+PE	0,1+0,1	0,03	0,83	0,14	0,00	0,84	0,16	0,28	0,66	0,06	6,8	
PE+EVA	0,1+0,1	0,03	0,87	0,10	0,00	0,88	0,12	0,59-0,70	0,27-0,38	0,03	9,4-10,2	
Pantalla aluminizada en las dos caras	0,04							0,50	0,10	0,40	7,6	
Cara aluminizada hacia el suelo	0,03							0,45	0,23	0,32	7,9	
Cara aluminizada hacia el cielo	0,03							0,50	0,23	0,27	8,1	

Fuentes:
 Feuilley et al., 1989
 Nijskens et al., 1989
 Nisen y Coutisse, 1981
 Feuilley et al., 1994 a.
 Nijskens et al., 1984 a.
 Nisen et al., 1984
 Feuilley y Issanchou, 1996
 Nijskens et al., 1984 b.

Tabla A. 1 Principales características de los materiales plásticos más utilizados en las cubiertas para invernadero [4]

ANEXO II. BALANCE DE ENERGÍA COMPLETO

Radiación

	T_e	-5	1.74	5.34	52	50	42	30	26	[°C]
Emisividad de la atmosfera	ϵ_{atm}	-2.828	1.000	0.997	1.000	1.000	0.999	0.994	0.991	[1]
Presión Parcial del vapor de agua en el aire en el exterior	e_e	1.196	1.966	2.537	38.659	35.029	23.700	12.049	9.545	[hPa]
Presión parcial del vapor saturante en el aire exterior	e_s	4.212	6.924	8.932	136.124	123.342	83.450	42.424	33.610	[hPa]
Temperatura de emisión de energía de la atmosfera	T_{atm}	242.18	251.37	256.33	323.42	320.44	309.11	291.14	285.39	[K]

Conducción y Convección

Coefficiente global de perdidas de calor por conducción - convección K_{cc}

Dato (Tablas)

Coefficiente superficial de convección para el ambiente en el interior del invernadero (Polietileno)	h_i	7.2	[W/m ² K]
Coefficiente superficial de convección para el ambiente exterior del invernadero	h_e	13.78	[W/m ² K]

Calor Sensible y Latente perdido por la renovación del aire del aire en el interior invernadero

Calor específico del aire	C_{pa}	1006.93	[J/kg K]
Calor específico del vapor recalentado	C_{pv}	1875.69	[J/kg K]
Presión dentro del invernadero	P_{atm}	101.08	kPa
Densidad del aire en función de la temperatura y la presión	ρ_{aire}	1.29	[kg/m ³]
Calor Latente de vaporización	λ_0	2421896	[J/kg]

Calculado

K_{cc}	3.59	3.29	3.08	3.33	2.90	2.52	4.72	4.72	4.72	0.00	2.43	4.72	4.72	4.72	2.43	0.00	[W/m ² °C]
$T_c - T_i$	-21.00	-14.26	-10.66	-15.00	-8.26	-4.66	22.00	20.00	12.34	0.00	-4.00	26.00	24.00	16.34	4.00	0.00	
h_i	4.9	4.3	4.0	4.4	3.7	3.1	7.2	7.2	7.2	0.0	3.0	7.2	7.2	7.2	3.0	0.0	[W/m ² K]

Temperaturas interior

		10	16	30	26					
Presión parcial vapor en saturación interior	e_s	1.228	1.818	4.242	3.361	[kPa]				
Humedades absoluta interior	x_i	0.004566	0.006785	0.016066	0.012660	[kg/kg]				
Temperaturas exterior	T_e	-5	1.74	5.34	52.00	50.00	42.34	30.00	26.00	[°C]
Presión parcial vapor en saturación exterior	e_s	0.4211718	0.692363074	0.893241863	13.6124432	12.334209	8.3450019	4.24245	3.360998	[kPa]
Humedad absoluta exterior	x_e	0.0007368	0.001212165	0.001564742	0.02473175	0.0222326	0.0149318	0.0075025	0.005929	[kg/kg]

Aceleración de la gravedad

Aceleración de la gravedad	g	9.807	[m/s ²]
Diferencia de Altura entre las aperturas de ventilación lateral y cenital	h_{12}	2	[m]
Superficie efectiva de ventilación lateral	S_1	114.5	[m ²]
Superficie efectiva de ventilación cenital	S_2	1.3608	57.9304 [m ²]
Coefficiente adimensional del efecto del viento	C_v	0.14	

Calor Latente consumido por la evapotranspiración de las plantas y el suelo

	T_i	16	10	30	26	
Déficit de presión de vapor en el interior idel invernadero	DPV_i	0.49	0.73	1.70	1.34	[kPa]

Flujo de calor perdido por conducción a través del suelo

Coeficiente de intercambio termico a traves del suelo (Tierra Humeda) k_s **2.0** [W/ m K]
 Constante psicrométrica en función de presión atmosférica γ **0.1**

Pendiente curva de presión	Δ	0.1161	0.0823	0.2433	0.1987													
Evapotranspiración del cultivo	ET_0	518.93	518.93	518.93	1060.73	1060.73	1060.73	2004.00	2004.00	2004.00	2004.00	2004.00	2531.16	2531.16	2531.16	2531.16	2531.16	[mm/dia]
	ET_0	562.96	531.10	490.16	414.48	358.75	289.89	3032.48	2842.16	2084.52	0.00	1007.08	3184.48	3005.66	2309.77	1007.08	0.00	[mm/dia]
	k_c	0.967																

Tabla A. 2 Parámetros, constantes y coeficientes calculados

Calefacción	Ti-Tc	Rn [W]	Qcc [W]	Qren [W]	Qevp [W]	Qevp [W]	λ_{sue} [W]	λ_{total} [kW]
A	21	-64	-17	-759	-28	-31	-4	-745
B	11	-22	-7	-504	-28	-27	-4	-523
C	21	64	-17	-759	-28	-31	-4	-872
D	15	-64	-11	-510	-57	-22	0	-515
E	5	-22	-3	-260	-57	-16	0	-298
F	15	63.61649335	-11.221698	-509.75121	-57.484662	-22.462036	0	-642.074
Refrigeración	Ti-Tc	Rn [W]	Qcc [W]	Qren [W]	Qevp [W]	Qevp [W]	λ_{sue} [W]	λ_{total} [kW]
G	-22	87	23	933	-109	-164	-7	753
H	-20	85	21	755	-109	-154	-7	575
I	-12	77	13	178	-109	-113	-7	215
J	0	66	0	486	-109	0	-7	303
K	4	63	2	-653	-109	-55	-7	-830
L	-26	87	28	1206	-137	-173	-4	1004
M	-24	85	25	1027	-137	-163	-4	826
N	-16	77	17	450	-137	-125	-4	249
O	-4	66	2	214	-137	-55	-4	283
P	0	63	0	381	-137	0	-4	176

Tabla A. 3 Resultados del Balance Energético

ANEXO III. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA DEL RECURSO GEOTÉRMICO

Para determinar la temperatura del recurso geotérmico que circulara a través de las tuberías del sistema de calefacción es necesario calcular la potencia útil que emite, esta potencia está en función de parámetros como: temperatura de las tuberías de calefacción, geometría, longitud de la tubería, eficiencia de aletas, la transferencia de calor por convección, el numero de Reynolds, velocidad del aire, conductividad térmica del aire, flujo másico del agua, etc. Para la primera aproximación tomaremos en cuenta los parámetros señalados en la **Tabla A. 4**

POTENCIA ÚTIL EMITIDA POR LAS TUBERÍAS DE CALEFACCIÓN

Temperatura del aire que rodea las tuberías	T_i	26	[°C]
Emisividad de las tuberías de calefacción	ϵ_{tb}	0.6	[1]

POTENCIA ÚTIL TRANSMITIDA POR EL AGUA CALIENTE

Longitud propuesta	l	100	[m]
Taza de flujo másico de agua de calefacción, promedio	\dot{m}_w	1.67	[kg/s]
Calor específico del agua, líquida	C_p	4190	[J/kg K]
Temperatura del agua a la entrada en las tuberías	T_0	393	[K]
Temperatura del agua a la salida de las tuberías	T_1	303	[K]
Diámetro de tubería supuesto	D_e	0.06	[m]
Área (Propuesta)	A_p	18.95	[m ²]

CALOR ELIMINADO POR NEBULIZACIÓN

Caudal del agua aportada por las boquillas de nebulización	\dot{m}_{evp}	8	L/h
Calor latente de nebulización	λ_0	0.002	[kg/s]
		2421896	[J/kg]

Tabla A. 4 Características propuestas de las tuberías del sistema de calefacción propuesto

En el primer caso se considera que el calor perdido por las tuberías será equivalente al calor necesario para garantizar la temperatura óptima biológica para el cultivo de jitomates.

a) Se calculara la transferencia de calor por convección, siendo indispensable conocer la temperatura de las tuberías de calefacción, que generalizando será la temperatura del recurso geotérmico, la temperatura final del aire y coeficiente de calor perdido por convección (h_0).

$$Q_{cal} = A \cdot (q_c + q_r) \dots \dots \dots [37]$$

$$q_c = h_0(T_0 - T_1) \dots \dots \dots [38]$$

donde:

Q_{cal} = calor suministrado por el sistema de calefacción [W]

A = Área propuesta en función del diámetro exterior de la tubería de agua caliente [m²]

q_c = calor transmitido por la superficie de las tuberías [$\frac{W}{m^2}$]

q_r = calor transmitido por las tuberías mediante radiación [$\frac{W}{m^2}$]

T_0 = temperatura de la superficie del tubo de calefacción = temp. recurso geotérmico [°C]

T_1 = temperatura del aire que rodea las tuberías = T_{amb} [°C]

Mientras que la transferencia de calor por radiación es:

$$q_r = \sigma \cdot \epsilon_{tb} \cdot (T_0^4 - T_1^4) \dots \dots \dots [39]$$

donde:

q_r = calor transmitido por las tuberías mediante radiación [$\frac{W}{m^2}$]

ϵ_{tb} = emisividad de las tuberías de calefacción, ver **Tabla A.**

T_0 = temperatura de la superficie del tubo de calefacción [°C]

T_1 = temperatura del aire que rodea las tuberías [°C]

Considerando que el coeficiente de película exterior es aproximadamente $50 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$, podremos iterar hasta encontrar la temperatura del recurso geotérmico, ver **Tabla A. 5**

Ta [°C]	Ti [°C]	hext [W/°K m2]	qc [w/m2]	qr [W/m2]	Qcalculado[W/m2]	Qteorico [W/m2]
-5	75	50	4004	1	4005	-4005
2	70	50	3420	1	3420	-3420

Tabla A. 5 Resultados obtenidos para la temperatura del recurso geotérmico en función de la potencia útil perdida por las tuberías

Material	emisividad en tuberías de calefacción, ϵ_{tb}
Acero Inoxidable	0.26 – 0.42
Aluminio	0.03 – 0.05
Asfalto	0.88
Pintura negra	0.80 – 0.92
Pintura blanca	0.85 – 0.90

Tabla A. 6 Emisividad en diferentes tipos de tuberías más utilizadas en tuberías de calefacción

Combinación de fluidos	U (W/m ² · K)
Agua con agua	850-1700
Agua con aceite	110-350
Condensador de vapor (agua en tubos)	1000-6000
Condensador de amoníaco (agua en tubos)	800-1400
Condensador de alcohol (agua en tubos)	250-700
Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25-50

Tabla A. 7 Coeficiente conectivo exterior

b) En el segundo caso se considera que se hará pasar un flujo de aire cruzado sobre sobre una superficie cilíndrica en condiciones estacionarias y el aire se considera como un gas ideal, según Churchill & Bernstein, el calor perdido estará en función de un Nusselt promedio, Reynolds para flujo turbulento, velocidad del aire y temperatura de película promedio. [13]

$$Nu_{cilindro} = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \dots \dots \dots [40]$$

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_{\infty} - T_0) \dots \dots \dots [41]$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \dots \dots \dots [42]$$

$$h = \frac{k}{D} \cdot (Nu) \dots \dots \dots [43]$$

$$A = p \cdot L \dots \dots \dots [44]$$

$$\dot{Q}_{cal} = h \cdot A \cdot (T_i - T_0) \dots \dots \dots [45]$$

donde:

Nu = Nusselt promedio

Re = Reynolds

T_∞ = T₀ = temperatura del recurso geotérmico a la entrada [°C]

T₁ = temperatura del recurso geotérmico a la salida [°C]

h = coeficiente de calor perdido por convección

A = Área propuesta en función del diámetro exterior de la tubería [m²]

p = perímetro tubería

L = longitud propuesta [m]

k = conductividad térmica [$\frac{W}{m \cdot K}$]

Una vez determinada la temperatura de película promedio podemos entrar a la **Tabla A. 8**, para determinar la conductividad térmica (*k*), viscosidad cinemática (*ν*) y número de Prandtl (*Pr*), ver **Tabla A. 9**

Temp	k	ν	Pr
60	0.02808	0.00001896	0.7202
67.853	0.028653269	1.97374E-05	0.71823675
63.908	0.028365262	1.93469E-05	0.719223074
70	0.02881	0.00001995	0.7177

Tabla A. 8 Propiedades del aire a la presión de 1 atm, interpolación

Iterando logramos encontrar la temperatura del recurso geotérmico que oscila entre 140 – 126 °C, ver **Tabla A.**

Ta [°C]	Ti [°C]	Tpp [°C]	Re	ν	Prant	k	Nusselt	hext	qc [w/m2]	qr [W/m2]	Qcalculado	Qteorico
-5	140.71	67.85	11309	1.97E-05	0.7182	0.0287	57.6767	27.4	3991.7	13.3	4005	-4005
2	126.08	63.91	11537	1.93E-05	0.7192	0.0284	58.3538	27.4	3411.8	8.6	3420	-3420

Tabla A. 9 Resultados obtenidos para la temperatura del recurso geotérmico

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandt Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974

- c) Por último es posible calcula la potencia útil en función del caudal de agua que circula por las tuberías, conociendo la temperatura a la entrada y salida del fluido de trabajo.

$$Q_{cal} = q_{u_w} \cdot C_p \cdot (T_i - T_0) \dots \dots \dots [46]$$

donde:

Q_{ref} = calor de calefacción [W]

q_{u_w} = tasa de flujo másico del agua de calefacción $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

C_p = calor específico del agua $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$

T_0 = temperatura a la entrada de las tuberías [K]

T_i = temperatura a la salida de las tuberías [K]

La temperatura del recurso geotérmico oscila en los 100 °C mientras que el flujo másico para los casos más críticos de calefacción son de 2.05 – 2.5 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$, ver **Tabla A. 11**

m [l/s]	qu [kg/s]	Cp [kJ/kg]	To [°C]	Ti [°C]	qcal [kW]	qteo [kW]
2.4	2.40	4.19	100	26	745	-745
2.1	2.05	4.19	100	26	636	-636
1.7	1.68	4.19	100	26	522	-522
1.7	1.66	4.19	100	26	515	-515
1.3	1.28	4.19	100	26	398	-398
1.0	0.96	4.19	100	26	297	-297

PROMEDIO = 1.67 [kg/s]

Tabla A. 11 Velocidad del fluido geotérmico obtenido para el sistema de calefacción

Para el sistema de nebulización fue necesario conocer las características de los quipos en el mercado, ver **Fig. A. 12**³²

Las únicas boquillas que generan una niebla suspendida a una presión de aire menor a 1 bar.

Características de las boquillas "FOG-AIR" modelo FRN (datos orientativos) (Presión entrada de agua: de 1,8 a 3,5 bar)					
Boquilla FRN-0,7 de 0,7mm					
AIRE Presión (bar)	AIRE Consumo por boquilla (m³/h)	AGUA Consumo por boquilla (l/h según gotero)	Tamaño de gota (µm)	Alcance (m)	
1,00	0,31	1,1	16	2,0-2,5	
		1,6	18		
1,25	0,35	1,1	15		
		1,6	16		
1,50	0,39	1,1	12		2,5-3,0
		1,6	14		
1,75	0,42	1,1	11		
		1,6	13		
2,00	0,45	1,1	10		
		1,6	12		
2,25	0,48	1,1	9		
		1,6	11		
Boquilla FRN-12 de 1,2mm					

Aportación de agua por boquilla:

de 1 a 8 l/h

Presiones de trabajo:

AIRE: 0,8 a 2 bares

AGUA: 1,8 a 3,5 bares

Requieren bomba de aire tipo compresor rotativo



Tabla A. 12 Características de las boquillas más comúnmente utilizadas en el Sistema de nebulización

³² Nebulización y Atomización. Disponible en:

<http://www.sabatergrup.com/documents/Cat%C3%A1logo%20Nebulizaci%C3%B3n%20y%20Atomizaci%C3%B3n.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. C. H. A. & G. H. Le-bert, *Energía Geotérmica*, Noriega, 1989.
- [2] G. L. T. & V. R. Angulo, *Guía de la Energía Geotérmica*, Madrid, España: Dirección General de la industria, energía y minas, 2008.
- [3] G. Tolson, «La teoría de la tectónica de placas y la deriva continental,» Instituto de Geología, UNAM, [En línea]. Available: <http://www.geologia.unam.mx/contenido/la-teoria-de-la-tectonica-de-placas-y-la-deriva-continental>.
- [4] F. D. M. A. J. A. Diego L. Valera, *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*, España: Universidad de Almería con la colaboración del Departamento de Biomasa del CENER & instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2008.
- [5] A. Bastida, *Los Invernaderos y la Agricultura protegida en México*, México: Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Departamento de Preparatoria Agrícola., 2011.
- [6] Z. S. Cermeño, *El cultivo protegido de producción y protección vegetal clima mediterráneo*, Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002.
- [7] A. H. Hernández, «Agricultura Protegida,» *Agroentorno, Fundación Produce A. C.* .
- [8] G. D. R. P. y. A. (. Secretaría de Agricultura, «Producción de jitomate en México, 2014,» de *Atlas Agroalimentario México 2014*, Distrito Federal, México, 2014.
- [9] M. C. L. M. Sosa, *Producción de jitomate en invernadero, Estado de México*, México: Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Instituto de Investigaciones y Capacitación Agropecuaria Acuícola y Forestal del Estado de México, ICAMEX, 2005.
- [10] D. R. Divas, *Curso de cultivos protegidos*, España: Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y Fundación de Agricultores Solidarios, 2009.
- [11] d. S. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios (SFA), «Monografía de Cultivos. Jitomate,» México, 2010.
- [12] F. D. M. A. J. A. Diego L. Valera, *Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos*, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2008.
- [13] Y. A. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, EE. UU.: McGraw - Hill Education, 2011.
- [14] «Distribuidores Autoizados TENAX de México,» [En línea]. Available: <http://www.tenax.com.mx/casasombra.html>.
- [15] I. N. d. E. y. G. (INEGI), «Cuentame...,» [En línea]. Available: <http://cuentame.inegi.org.mx/>.

- [16] N. Agrícolas, «Tipos de invernaderos,» [En línea]. Available: <http://www.novedades-agricolas.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos>.
- [17] C. Base de Datos Climatologica Nacional, «Baja California Norte, Sistema CLICOM,» 2014. [En línea]. Available: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>.
- [18] M. P. Craig Morris, «Energy Transition, the German Energiewende,» Fundacion Heinrich Boll, Berlin, Alemania, 2012.
- [19] I. p. I. D. y. A. d. I. E. (. y. el, Manual de Geotermia, Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008.
- [20] H. N. e. I. Empresa Lameyer S. L., «El precio del tomate español casi al doble del precedente de Holanda,» *Mercados*, 2016.
- [21] H. ENVIROMENT, «Innovacion Agricola en un click,» [En línea]. Available: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=44.
- [22] I. N. d. E. y. Geografia, «Cuentame...,» [En línea]. Available: <http://cuentame.inegi.org.mx/>.
- [23] E. H. Goribar, Fundamentos de aire acondicionado y refrigeracion, Mexico: Limusa, 1984, p. 461.
- [24] INFOAGRO, Materiales de cubierta para invernaderos, los plasticos en la agricultura, Madrid, España: mundi - prensa, 2004.
- [25] INFOJARDIN, «Glosario de jardinería, flores, plantas, botánica y medio ambiente,» [En línea]. Available: <http://www.infojardin.net/glosario/glosario-jardineria.htm>.
- [26] INFOJARDIN, «Glosario de Jardineria, flores, plantas, botenica y medio ambiente,» [En línea]. Available: <http://www.infojardin.net/glosario/glosario-jardineria.htm>.
- [27] I. F. d. Invernaderos, «Multicapilla de techo curvo,» [En línea]. Available: <http://www.fabricanteinvernaderos.com/productos/invernaderos/multicapilla-de-techo-curvo/>.
- [28] R. M. P. Ledesma, El calor de la Tierra, Mexico: Fondo de Cultura Economica , 1988.
- [29] R. M. P. Lesdesma, «Las manifestaciones termas en la superficie de la tierra,» de *El calor de la Tierra*, Fondo de Cultura Economica, 1988, p. 99.
- [30] A. G. Mexicana, «Asociacion Geotermica Mexicana,» 2006 - 2017. [En línea]. Available: http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=688.
- [31] U. N. A. d. Mexico, «Festival Nacional del Conocimiento, Ventilal Hidrotermales,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.puma.unam.mx/festival/index.php/ventilas-hidrotermales>.

- [32] A. D. J. L. G. A. Moreno Reséndez Alejandro, «Características de la Agricultura protegida y su entorno en México», *Revista mexicana de Agronegocios en Línea*, vol. XV, nº 29, 2011.
- [33] A. Ormad, «Energía Geotérmica aplicada en invernadero», *Piensa en Geotermia*, 2014.
- [34] A. Ormad, «Primer invernadero geotérmico en Chile obtiene resultados positivos», *Piensa en Geotermia*, 2014.
- [35] A. Ormad, «Webinar: búsqueda de inversores para invernaderos geotérmicos en España», *Piensa en Geotermia*, 2014.
- [36] F. Rojas, «La geotermia ayuda a invernaderos Holandeses a alcanzar sus objetivos de emisiones», *Piensa en Geotermia*, 2015.
- [37] p. d. l. u. d. H. Roy J. Dossat, *Principios de Refrigeración*, Houston, Texas: Patria, 2009.
- [38] d. r. p. y. a. (. Secretaria de Agricultura y ganadería, «Estimación de las exportaciones agroalimentarias a nivel de Entidad Federativa, Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios», México, 2011.
- [39] TESI, *Medios de protección para la hortiflorofruticultura y el viverismo*, Madrid España: Mundi - Prensa, 2001.
- [40] S. N. Torres, *Producción de hortalizas bajo invernaderos*, Sinaloa, México: Fundación PRODUCE, Sinaloa A. C. Enlace, innovación y Progreso, 2006.
- [41] H. A. O.-O. y. T. P. S.-D. Bielinski M. Santos, «Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: estructuras para la agricultura protegida», 2013. [En línea]. Available: <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/HS/HS118200.pdf>.
- [42] E. R. Jaimes, «Energías renovables, el rumbo para México. Tres centros inician operaciones; se espera que, para el 2030, 35% de la energía del país provenga del Sol, la Tierra o el viento.», 12 Marzo 2014.
- [43] H. L. /. A. B. /. C. A. K. /. M. K. /. A. B. /. H. P. /. A. A. /. M. P. Scott, *Biología Celular y Molecular*, EE.UU.: Panamericana, 2015.
- [44] C. N. d. A. (. y. S. M. Nacional, «Clima en México», [En línea]. Available: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80.
- [45] I. N. d. E. y. Geografía, «El sector alimentario en México», México, 2011.
- [46] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, FAO], «Agricultura mundial y medio ambiente: perspectiva hacia los años 2015 / 2030», Departamento Económico y social, FAO, 2015.
- [47] I. FERTRI, «Pantalla Térmica, Catálogo», España.



[48] D. d. I. C. y. T. SOLARTRONIC, «Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal para la república mexicana,» 2003.