

# Tesis Doctoral

## Caracterización y uso eficiente de la energía solar en sistemas hortícolas intensivos de Ecuador



Vicente Zavala Zavala  
Universidad de Almería  
Tesis Doctoral





## **UNIVERSIDAD DE ALMERÍA**

**Escuela Superior de Ingeniería**

**Departamento de Agronomía**

**Programa de Doctorado en Agricultura Protegida**

---

### **Caracterización y uso eficiente de la energía solar en sistemas hortícolas intensivos de Ecuador**

Characterization and efficient use of solar energy in intensive  
horticultural systems in Ecuador

---

Memoria presentada por D. Vicente Zavala Zavala para aspirar al grado de  
**Doctor** por la Universidad de Almería.

Directores:

Dr. Juan Reca Cardeña

Codirectores:

Dr. Rafael López Luque

Dra. María Teresa Lao Arenas

Almería, noviembre 2021



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Departamento de Agronomía



Programa de Doctorado en Agricultura Protegida

TESIS DOCTORAL

**Caracterización y uso eficiente de la energía solar en sistemas hortícolas intensivos de Ecuador.**

Memoria de Tesis Doctoral presentada por D. Vicente Zavala Zavala para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Almería.

Fdo.: Vicente Zavala Zavala

**Vº Bº Director y codirectores del trabajo:**

Fdo. Juan Reca Cardeña  
Arenas

Rafael López Luque

María Teresa Lao

**Almería, noviembre 2021**



*La energía solar es una energía limpia e inagotable, en nuestras manos está aprovecharla.*





## Agradecimientos

Quiero iniciar agradeciendo a todos quienes hacen la Universidad de Almería-España UAL, por la oportunidad de recibir la formación académica en el programa doctoral que hoy concluyo con la presente tesis; así como también, al Dr. Juan Reca Cardeña, al Dr. Rafael López Luque y a la Dra. Ma. Teresa Lao Arenas, mis directores, por el acompañamiento brindado y por la guía permanente; al Dr. Alfonso Llanderal Quiroz, por sus constantes orientaciones y al Dr. John Eloy Franco Rodríguez quien permanentemente me ha apoyado en el ejercicio de mi profesión.

Debo expresar mi reconocimiento permanente a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil-Ecuador UCSG, por el auspicio docente recibido para financiar la participación del suscrito en este programa de posgrado.

A mis compañeros profesores del Grupo de Investigación en Agricultura Protegida de la Carrera de AGROPECUARIA de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, Rosa Pérez Jiménez, Noelia Caicedo Coello, Manuel Donoso Bruque, Ángel Triana Tomalá y Pedro García Caparrós, por su respaldo en mi accionar como miembro de los importantes proyectos internacionales de I+D+i que se desarrollan entre ambas instituciones de educación superior.

Y de forma especial, a mi familia que es la energía para no desmayar en un proceso como este que demanda mucha dedicación.



## Publicaciones incluidas en la tesis y otras aportaciones científicas derivadas de esta tesis doctoral

### Artículos publicados incluidos en la Tesis Doctoral

Zavala, V., López-Luque, R., Reca, J., Martínez, J., & Lao, M. T. (2020). Optimal management of a multisector standalone direct pumping photovoltaic irrigation system. *Applied Energy*, 260, 114261.

### Artículos pendientes de publicar incluidos en la Tesis Doctoral

V. Zavala, A. Llanderal, P. García-Caparros, J. Franco, R. López-Luque, M.T. Lao and J. Reca. XXXX. Estimation of solar irradiance from heliophany as a tool to use in the agricultural technification of the coastal region of Ecuador. *International Symposium on Models for Plant Growth, Environments, Farm Management in Orchards and Protected Cultivation*. Almería (2021).

V. Zavala, A. Llanderal, P. García Caparros, J. Barbero, J. Franco, R. López-Luque, J. Reca and M.T. Lao. XXXX. Optical and climatic evaluation of a cool film cover greenhouse in the coastal region of Ecuador. *International Symposium on Models for Plant Growth, Environments, Farm Management in Orchards and Protected Cultivation*. Almería (2021).



## Índice general

Resumen .....	20
Summary .....	21
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>31</b>
2.1. El Clima en Ecuador .....	31
2.1.1. Situación climatológica del Litoral Ecuatoriano .....	35
2.1.1.1. Precipitación.....	35
2.1.1.2. Temperatura. ....	35
2.1.2. El clima en San Elena.....	36
2.2. Situación de la horticultura .....	38
2.2.1. Situación de la horticultura en el mundo.....	38
2.2.2. Sistema de mercado en la horticultura .....	39
2.2.3. Evolución cuantitativa y cualitativa de la horticultura.....	40
2.2.4. Importancia de la horticultura en el Ecuador .....	40
2.3. El invernadero para la producción hortícola .....	41
2.3.1. Ventajas y limitaciones de invernaderos en la región tropical .....	41
2.3.2. Invernaderos en Ecuador.....	42
2.4. El uso del plástico en la agricultura.....	42
2.4.1. Materiales plásticos fotoselectivos empleados en la cubierta .....	43
2.4.2. Plásticos fotoselectivos .....	44
2.5. Influencia del material de cubierta en el balance energético.....	44
2.6. Soluciones para el control térmico de las altas temperaturas dentro del invernadero en relación con las cubiertas .....	47
2.6.1. Técnicas de sombreo .....	48
2.6.1.2. Malla de sombreo .....	49
2.7. Cubiertas fotovoltaicas.....	51
2.8. Gestión de la energía fotovoltaica para el riego .....	51
<b>3. CAPÍTULO 3. INTERÉS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>55</b>
3.1. Interés.....	55
3.2. Objetivos .....	56

CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS .....	59
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	63
5.1. Estimation of solar irradiance from heliophany as a tool to use in the agricultural technification of the coastal region of Ecuador .....	67
5.2. Optical and climatic evaluation of a cool film cover greenhouse in the coastal region of Ecuador .....	79
5.3. Gestión óptima de un bombeo fotovoltaico directo autónomo multisectorial del sistema de riego.....	91
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	105
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	109

## Índice de Tablas

Tabla 1. Características de los materiales de cubierta (Valera et al., 2008)..... 47

Tabla 2. Temperatura bajo distintos tipos de mallas (Montero et al., 2014)..... 51





## Índice de figuras

Figura 1. Mapa de isotermas media anual (INAMHI, 2013).....	32
Figura 2. Mapa de isoyectas media anual (INAMHI, 2013).....	33
Figura 3. Espectro electromagnético (Levine 1993, Hanan1998).....	34
Figura 4: Mapa de radiación media anual (INAMHI, 2013).....	35
Figura 5. Precipitación registrada en el litoral en junio del 2014 (Manobanda, 2014).....	36
Figura 6. Temperatura registrada en el litoral junio del 2014 (Manobanda, 2014).....	37
Figura 7. Temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diario con las bandas de los percentiles 25° a 75°, y 10° a 90° (Spark, 2018).....	38
Figura 8. Porcentaje de días en los que se observan diferentes tipos de precipitación (Spark, 2018).....	38
Figura 9. Promedio de la velocidad media del viento por hora (línea gris oscuro), con las bandas de percentil 25° a 75° y 10° a 90° (Spark, 2018).....	39
figura 10. Flujograma de la cadena de valor de la horticultura (Martinez, 2011).....	40
Figura 11. Participación de la horticultura en el Ecuador (FAO, 2018).....	41



## Índice de fotografías

Fotografía 1. Estación meteorológica La Teodomira.....	60
Fotografías 2 y 3. Finca Experimental San Isidro de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y unidades experimentales.....	61
Fotografía 4. Planta fotovoltaica acoplada a riego sectorizado.....	61



## Resumen

Esta tesis se desarrolla en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la Organización de Naciones Unidas (ONU) en la agenda 2030, entre los que se encuentran: poner fin a la pobreza, eliminar el hambre en el mundo, salud y bienestar, acceso a energía asequible y no contaminante, trabajo decente y crecimiento económico.

La República de Ecuador está situada en el noroeste de Sudamérica, distinguiéndose 4 regiones: Región interandina, Amazonía, Región insular y Región costera, bañada por el océano Pacífico. Con una población de unos 17 millones de habitantes y un índice de desarrollo humano de 0.758, ocupa el lugar 85 de 185 países y presenta un nivel de pobreza del 21.5%, aún más grave en zonas rurales (39.3%), y una renta *per capita* de 10.141 \$. Este escenario pone de manifiesto la necesidad de tecnificar el sector agrícola para mejorar estas cifras. La horticultura intensiva es una magnífica fuente de alimentos y puede contribuir a mejorar la economía de las zonas rurales. Sin embargo, se necesita llevar a cabo un desarrollo tecnológico *in situ* para aprovechar los recursos locales de forma sostenible. El sol es una de las grandes fuentes de energía renovables, por lo que es necesario caracterizar la radiación para optimizar el diseño de las cubiertas de los invernaderos y para su uso fotovoltaico.

El objetivo general de esta tesis es fomentar el uso de la energía solar disponible para desarrollar una agricultura protegida más sostenible en Ecuador. La agricultura protegida bajo invernaderos es necesaria especialmente en la temporada de lluvias para controlar la incidencia de plagas y evitar el uso masivo de pesticidas.

En la primera parte de la tesis, se ha desarrollado una metodología para caracterizar la radiación solar incidente a partir de los datos disponibles de heliofanía. La ecuación de Ångström-Page modificada ha sido calibrada localmente para las condiciones locales de la región costera del Ecuador para estimar la irradiancia a partir de los datos de heliofanía ampliamente disponibles en diversas estaciones meteorológicas de la zona.

A continuación, se realizó un estudio experimental para evaluar el comportamiento de los plásticos "fríos" en comparación con los convencionales, analizando el descenso de temperatura que éstos producen en modelos experimentales de invernadero a escala reducida. Los resultados encontrados son prometedores y demuestran que estos materiales pueden ser adecuados para evitar el calentamiento excesivo del ambiente interior del invernadero.

Por último, un tercer estudio explora la rentabilidad del uso de la energía solar para regar los cultivos utilizando sistemas de riego fotovoltaico independientes con bombeo directo. Estos sistemas son adecuados para zonas sin un fácil acceso a las líneas de distribución eléctrica y tienen la ventaja de que no necesitan estar equipados con baterías o acumuladores de energía, los cuales encarecen las instalaciones y las hacen más contaminantes. El modelo desarrollado permite manejar eficientemente sistemas de riego fotovoltaico complejos con múltiples sectores de riego heterogéneos que pueden funcionar simultáneamente.

Como conclusión general, se ha puesto a punto una herramienta robusta y útil para la estimación de la irradiancia y se han caracterizado los plásticos utilizados constituyen un buen precedente para seguir trabajando en el desarrollo tecnológico de la horticultura intensiva bajo plástico en la región Costa de Ecuador. El uso eficiente de la energía solar fotovoltaica mediante los modelos propuestos, puede ser la clave del éxito del sector.

## Summary

This thesis work is developed within the framework of the objectives proposed by the United Nations (UN) in the 2030 agenda for sustainable development (SD), namely, no poverty, zero hunger, Ensure healthy lives and promote well-being, access to affordable and clean energy, decent work and economic growth.

In the Republic of Ecuador, located in the northwest of South America, 4 regions can be distinguished: the inter-Andean region, the Amazon region, the insular region and the coastal region bathed by the Pacific Ocean. With a population close to 17 million inhabitants, a human development index of 0.758 ranked 85th out of 185 countries and territories, and a *per capita* income of \$ 10,141, it presents a poverty level of 21.5%, especially serious in the rural areas (39.3%). This scenario highlights the need to technify the agricultural sector to improve these figures. Intensive horticulture is a great source of food and can help to develop the economy of rural areas. However, on-site technological development is needed to harness local resources in a sustainable way. The sun is one of the great sources of energy, and it is necessary to quantify the radiation received locally to optimize its use on greenhouse roofs and to produce photovoltaic energy.

The overall objective of this thesis is to foster the use of the available solar energy to develop a more sustainable protected agriculture in Ecuador. Protected agriculture under greenhouses is necessary especially in the rainy season in order to control the incidence of pests and avoid the massive use of pesticides.

In the first part of this Thesis, a methodology has been developed to characterize the incoming solar radiation from the available data on heliophany. The modified Ångström-Page equation has been locally calibrated to estimate irradiance from the broadly available heliophany data for the local conditions of the coastal region of Ecuador.

Then, an experimental study has been carried out to assess the behavior of "cold" plastics with respect to conventional ones by analyzing temperature drops in some experimental greenhouse model units. The results found are promising and demonstrate that these materials can be well suited to prevent the excessive warming up of the interior environment of the greenhouse.

Finally, a third study explores the profitability of using the solar energy to irrigate the crops using off-grid standalone direct pumping irrigation systems. These systems are well suited for areas without an easy access to the power supply lines and have the advantage that they do not need to be equipped with batteries or energy accumulators, which make these facilities more expensive and contaminating. The developed model makes it possible to efficiently manage complex photovoltaic irrigation systems with multiple heterogeneous irrigation sectors that can operate simultaneously.

As a general conclusion, in this Thesis, a robust and useful tool for estimating irradiance has been developed, the behavior of the used plastics, constitute a good precedent to continue working on the technological development of intensive horticulture under plastic in the Costa region of Ecuador. The efficient use of photovoltaic solar energy through the proposed models may be the key to the success of the sector.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN







## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Ecuador se localiza en América del Sur (entre los paralelos  $01^{\circ} 30' N$  y  $03^{\circ} 23.5' S$  y los meridianos  $75^{\circ} 12' W$  y  $81^{\circ} 00' W$ ), y está delimitado por Colombia (norte), Perú (sur y este) y el Océano Pacífico (oeste) (INOCAR, 2012). El territorio nacional es atravesado por la línea ecuatorial a 22 km al norte de la ciudad de Quito (capital de Ecuador), también, la Cordillera de los Andes atraviesa al Ecuador de norte a sur dividiendo al territorio continental en tres regiones naturales (INOCAR, 2012):

- Región interandina o sierra, ubicada entre las cordilleras Occidental y Central, las mismas que se unen entre sí cada cierto tramo, formando altos valles en donde se asientan los núcleos humanos a una altura media de 2.500 m.s.n.m.

- Región oriental o amazónica, se encuentra al este de la cordillera Central hasta los límites con Perú. La región se divide en Alto Oriente y Bajo Oriente, el primero es más habitado por tener un clima benigno, en cambio en el Bajo Oriente, predomina la selva virgen con abundantes bosques y junglas, además se encuentran zonas pantanosas, sobre todo cerca de los grandes ríos que la atraviesan.

- Región litoral o costa, desde la cordillera Occidental hasta la costa bañada por el Océano Pacífico. Está constituida por densas llanuras muy aptas para la agricultura, terrenos anegadizos (sobre todo en época de lluvias), salitrales y manglares. Dentro de ésta se encuentra la Zona de Planificación 8 del Ecuador, compuesta por los cantones de Guayaquil, Samborondón y Durán, los cuales serán el objeto de estudio del presente Trabajo Técnico.

Es preciso mencionar que Ecuador tiene como cuarta región a la Región Insular o islas Galápagos y como una quinta región el territorio en el cual se tiene presencia en el continente Antártico. El país está dividido en diferentes niveles, primero las provincias las mismas que se dividen en cantones y parroquias. Las provincias en las cuales se divide el territorio se distribuyen de la siguiente forma:

Región litoral: El Oro, Esmeraldas, Guayas, Los Ríos, Manabí, Santo Domingo y Santa Elena.

- Región interandina: Azuay, Bolívar, Cañar, Carchi, Chimborazo, Cotopaxi, Imbabura, Loja, Pichincha y Tungurahua.

- Región oriental: Morona Santiago, Napo, Orellana, Pastaza, Sucumbios y Zamora Chinchipe.

- Región insular: Galápagos.

Hoy en día, cerca de 30.000 ha se utilizan para la producción de hortalizas en Ecuador, la mayoría de la producción hortícola se destina al consumo local, y en menor medida se exporta a los países vecinos como Colombia, Perú y Estados Unidos (Salcedo et al., 2015; Ministerio de salud Pública de Ecuador, 2009). Los cultivos en Ecuador se caracterizan por su baja productividad ( $2 \text{ kg m}^{-2}$  para el tomate) que se puede relacionar con la lluvia excesiva en el período de diciembre a abril. La región tiene una radiación abundante ( $15.17 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), y se caracteriza por la alternancia de meses secos con aquellos con alta precipitación, que no permite el cultivo de muchos cultivos en campo abierto durante parte del año (Salcedo et al., 2015). Por esta razón, surge el interés en la producción en cultivos protegidos para mejorar la calidad y el suministro de manera continua al mercado, aumentando la competitividad de este sector con un impacto en la estructura socioeconómica del país.

Los productores han implementado diversos sistemas de riego, permitiendo una mayor eficiencia y productividad en sus cultivos, sumado a las buenas condiciones de luminosidad que posee esta zona específica del Ecuador (Lizarzaburu, 2016). Sin embargo, es importante destacar que las producciones de hortalizas en invernadero han presentado problemas asociados a las altas temperaturas que se encuentran en el interior. La temperatura ejerce una gran influencia sobre el crecimiento y el metabolismo de las plantas, todos los procesos fisiológicos están influenciados por la temperatura (Palma-Pérez, 2009). En lo que se refiere a la mayoría de los cultivos agrícolas, el desarrollo y el crecimiento óptimo se encuentra dentro del rango de temperatura de 10 y 35°C (Alpi y Tognoni, 1999).

La aplicación del plástico en la agricultura supuso una revolución en este campo desde los años 60; entre los usos más comunes del plástico se pueden enunciar los sistemas de riego, acolchados de impermeabilización y por supuesto en cubierta. Esta incursión del plástico conllevó a cambios en los sistemas agrarios con una considerable repercusión en la productividad de las explotaciones, así mismo destacan otras ventajas en el ahorro del agua, abonos, fitosanitarios entre otros; que finalmente permitieron el desarrollo de cultivos en invernaderos tal y como se conoce en la actualidad.

Con más de medio siglo en innovación tecnológica, han aparecido nuevos materiales con propiedades insospechadas en 1960; estos materiales plásticos ahora se debaten entre un cúmulo de propiedades que aportan una razonable ventaja técnica para la propia actividad agrícola y que por otro lado tienen una repercusión negativa con respecto al medio ambiente.

Teniendo en cuenta las limitaciones que presentan los invernaderos en la costa del Ecuador es necesario establecer un modelo de producción hortícola sostenible y adecuado para las condiciones de cultivo. Tomando como ejemplo algunos países como España (principalmente en Almería), India, Indonesia, Israel, Colombia, Costa Rica, Venezuela y México. En las zonas de producción hortícola bajo invernadero, el control climático se reduce a la ventilación natural del invernadero para controlar las condiciones extremas de humedad o temperatura (De Pedro, 2015; Ruiz-García et al., 2015). En la mayoría de los casos la ventilación natural no es suficiente para extraer el exceso de energía durante los días soleados de verano (Luo et al., 2005; Baille, 1999). Debido a esto, adicional a la ventilación natural podemos encontrar otras técnicas de control térmico en el invernadero como el encalado y la utilización de mallas de sombreo (De Pedro, 2015). El encalado es una técnica de bajo coste que presenta una serie de inconvenientes como son la permanencia en el invernadero durante días nublados, la falta de homogeneidad en su aplicación, que hace que lleguen cantidades distintas de luz hacia las plantas, la mano de obra necesaria en las operaciones de aplicación y, sobre todo de limpieza, o la falta de selectividad que hace transmitir aproximadamente, el mismo porcentaje de radiación fotosintéticamente activa (PAR) que de infrarrojo cercano, que es la que transmite principalmente calor (Montero et al., 1998). En lo que respecta a la efectividad de esta técnica, Francescangelli et. al. (1992) encontraron diferencias de temperatura entre el testigo (sin aplicar el encalado) y los demás tratamientos entre 4,6 a 3,3 °C en un cultivo de tomate. Es importante destacar que, aunque es una técnica bastante utilizada por distintos países, en la región de la costa ecuatoriana no puede ser utilizada, debido a las altas precipitaciones en la zona (Salcedo et al., 2015), las cuales limpiarían la cubierta del invernadero.

El uso de mallas de sombreo ofrece las ventajas, con respecto al método previamente descrito, ya que el sombreo es más uniforme y existe la posibilidad de recogerse fácilmente durante días nublados o en cualquier situación que así lo demande (De Pedro, 2015). Sin embargo, este sistema de mallas móviles tiene el inconveniente de su elevado coste. Experimentos realizados por Martínez et al. (1985), donde compararon entre un sistema de sombreo fijo y uno móvil, encontraron aumentos significativos en el peso seco total del 65% en *Cyclamen*, 132% y 106% en *Neprolepis*.

Es importante mencionar que el sombreo que se realiza es principalmente por excesos de temperatura, pero este sombreo conlleva una disminución de la radiación dentro del invernadero. En el caso del cultivo de tomate, cuando éste se encuentra frente a una baja intensidad lumínica (ocasionada por un exceso de sombreo) las consecuencias son la reducción de la fotosíntesis neta, una mayor competencia por los fotoasimilados afectando el desarrollo y la producción de la planta (Lorenzo et al., 2010). En relación con lo anterior, en Brasil, bajo un clima subtropical húmedo, se observó que con un sombreo del 52% el rendimiento disminuyó un 20% (Sandri et al., 2003) y en Inglaterra, bajo un clima frío y con poca luz, con un sombreo del 23% también se obtuvo una reducción del 20% del rendimiento (Cockshull et al., 1992) y en Almería con un clima mediterráneo bajo un sombreo del 48% se redujo el rendimiento un 25% (Llandal, 2017).

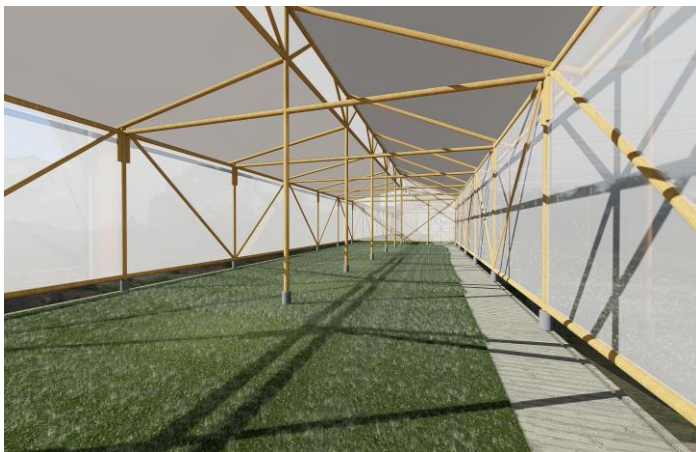
Bouzo et al. (2003) consideran que uno de los inconvenientes del uso de las técnicas previamente descritas con los materiales actualmente disponibles es que la reducción de la radiación solar no es selectiva, disminuyendo tanto la radiación infrarroja como la PAR. Junto con las otras formas de refrigeración, la correcta elección del material de cubierta puede ayudar a controlar las altas temperaturas del invernadero en zonas tropicales y desérticas (Espí, 2012), el material de cubierta generalmente empleado en cubiertas de invernadero se puede clasificar en filmes flexibles, placas rígidas y mallas, aunque el empleo de los primeros supera con mucho a las otras dos opciones (Díaz et al., 2001). Dentro de los materiales de cubierta existe un especial interés en los plásticos fríos, filmes antitérmicos o “cool films” son materiales fotoselectivos, esto puede ser posible gracias a los aditivos que bloquean la NIR evitando de esta manera el sobrecalentamiento diurno del invernadero (Hemming et al., 2006). La importancia del bloqueo de la radiación infrarroja cercana (NIR) (700–2500nm) que presenta una baja absorción por las plantas, pero es absorbida principalmente por el suelo del invernadero, las instalaciones y los elementos de construcción del invernadero. Luego se libera de nuevo al aire de invernadero como calor convectado que aumenta la temperatura del aire del invernadero (Abdel-Ghany et al., 2012). En consecuencia, la NIR es la principal fuente de carga de calor que debe eliminarse del aire del invernadero para evitar el exceso de calor. La radiación NIR puede reducirse dentro del invernadero a través de reflexión (pigmentos metálicos), absorción e interferencia (pigmentos con una capa delgada de óxidos metálicos) (Hoffmann y Waaijenberger, 2002). Mediante reflexión e interferencia, la energía innecesaria es reflejada fuera del invernadero, mientras que, mediante absorción, el material de cubierta solo podrá emitir fuera del invernadero una parte de la energía mientras que otra parte de ésta será emitida dentro del invernadero, contribuyendo a su calentamiento. De acuerdo con Hemming et al. (2006) los materiales que reflejan la radiación NIR son más eficientes que los que la absorben.

En la distribución espectral de radiación solar global, en una superficie horizontal, que incide o se transmite a un invernadero puede dividirse en radiación ultravioleta (UV: 200-400 nm, aproximadamente el 5% de la radiación solar global), radiación fotosintéticamente activa (PAR: 400-700 nm, aproximadamente 45%) y radiación infrarroja cercana (NIR: 700-2500 nm, aproximadamente 50%) (Abdel-Ghany et al., 2012). En todo el espectro de radiación solar global, la PAR es muy importante para el crecimiento de las plantas por la formación de bioasimilados mediante fotosíntesis (Perez et al., 2006). Por lo tanto, las cubiertas deseables para invernaderos en regiones cálidas y soleadas deberían transmitir PAR y rechazar NIR y UV. La contribución de la radiación UV a la carga de calentamiento del invernadero es insignificante porque representa solo el 5% de la radiación global (Abdel-Ghany et al., 2012). Sin embargo, los rayos UV deben rechazarse porque pueden dañar los cultivos y aumentar la población de insectos, hongos y otros patógenos (Abdel-Ghany et al., 2012). Recientemente, la mayoría de las películas plásticas utilizadas para cubrir invernaderos son absorbentes de UV. Esto reduce el impacto de plagas y enfermedades en los cultivos y reduce la carga y los costos de plaguicidas, a la vez que contribuye a alargar la vida de la cubierta.

En lo que se refiere a la aplicación de plásticos fríos en la agricultura, García-Alonso (2006) encontró un incremento significativo de la producción del 26% en un cultivo de pimiento comparado con un sistema plástico de uso habitual en la zona de Murcia España. Adicionalmente, López-Marín et al. (2007) recomiendan el uso de los plásticos fotoselectivos para la producción pimiento en el suroeste español. Sin embargo, es importante destacar que aún falta bastante investigación para desarrollar plásticos fotoselectivos de calidad, ya que encontramos que con el uso de los plásticos fríos se observa una reducción importante de la radiación PAR (15%), pero reduce un 38% la radiación NIR (Meca-Abad, 2013).

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO





2.1. El Clima en Ecuador

El Ecuador se localiza en la línea ecuatorial, razón por el cual tiene 12 horas de luz en forma natural todo el año (365 días) y su temperatura no varía mucho en todo el año y el único cambio de estación se relaciona con la precipitación (Leòn, 2010). En la figura 1 se presenta el mapa de isotermas de la media anual de temperaturas.

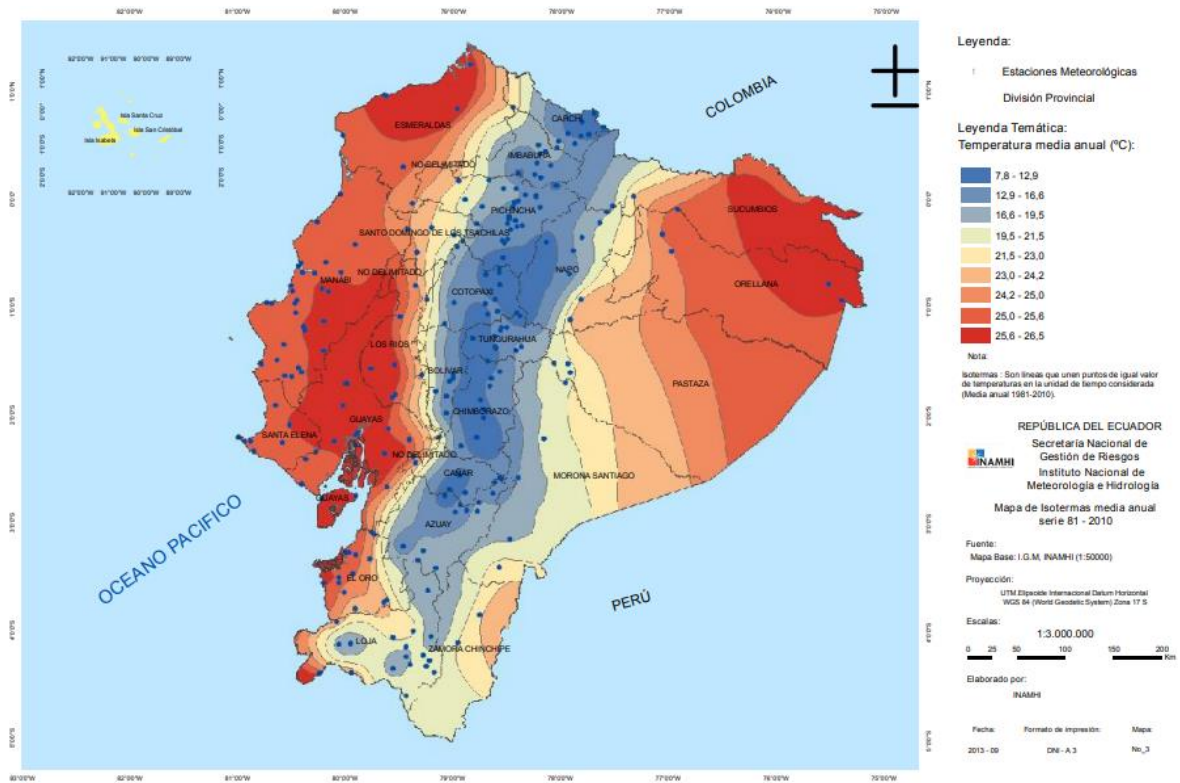
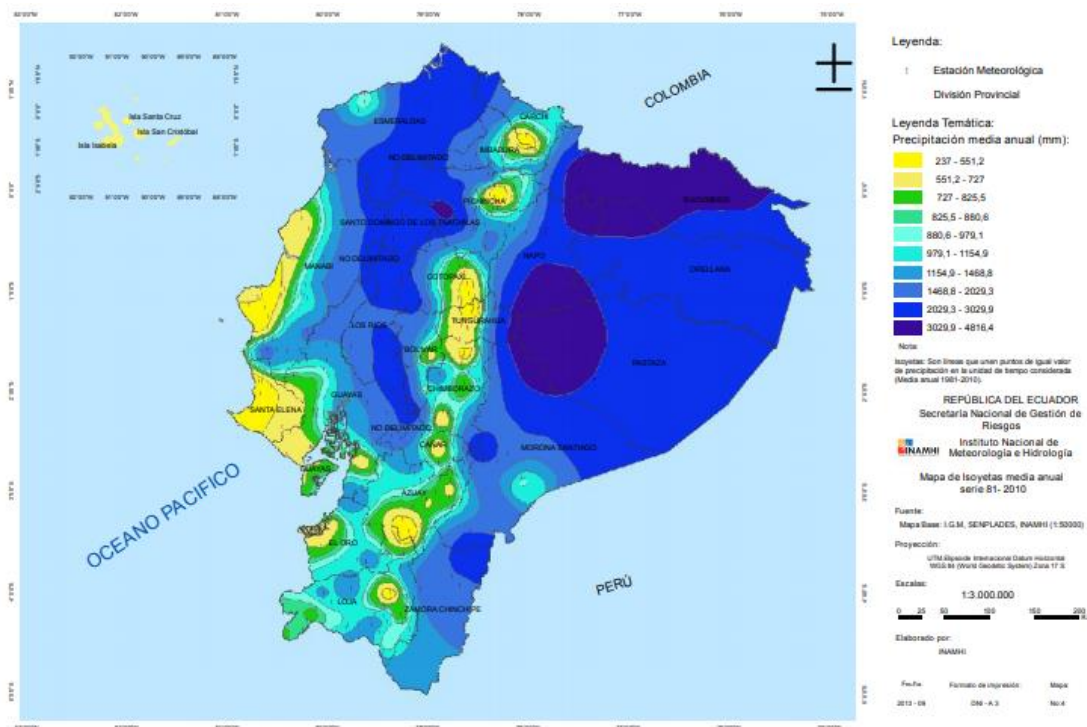


Figura 1. Mapa de isotermas media anual (INAMHI, 2013).





**Figura 2.** Mapa de isoyetas media anual (INAMHI, 2013).

Entre los principios fundamentales que influyen en las condiciones climáticas se encuentran: la latitud por estar ubicado sobre el Ecuador geográfico, una formación de relieves o altitud constituida por la cordillera de los Andes como parte importante para el movimiento de masas de aire que pueden ser local o regional y mediante la corriente marina se producen diferentes grados de temperatura y humedad (Arredondo, 2018) (Figura 2).

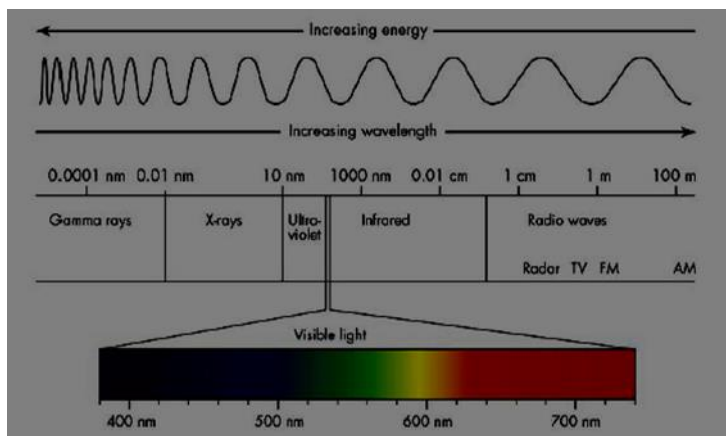
Existen dos corrientes marinas opuestas que influyen en el clima del Ecuador. Desde diciembre hasta mayo, la corriente cálida de El Niño que se genera en el océano Pacífico y llega del norte y de mayo hasta diciembre, la corriente fría de Humboldt llega desde el sur. Al volverse una de estas corrientes más fuerte y duradera, se producen alteraciones en las precipitaciones en el continente. Es decir, si la corriente de El Niño es más vigorosa que la corriente de Humboldt, las lluvias aumentarán causando inundaciones. Por lo contrario, si la corriente Humboldt es más fuerte, las lluvias disminuirán dando como resultado la sequía (Leòn, 2010).

Especial mención merece la radiación. El concepto de radiación de acuerdo al Programa de Naciones Unidas para El Medio Ambiente (2016): considera que es la energía transmitida por medio de todos los cuerpos en medio de ondas electromagnéticas. Por lo que es necesario distinguir las particularidades que tienen los diferentes tipos de radiación:

- ✓ Se propaga en diferentes intervalos o longitudes de onda ( $\lambda$ ).
- ✓ Con determinada frecuencia ( $\nu$ ) y a una velocidad  $c=\lambda*\nu$ .

Por tanto, el conjunto de todas las longitudes de ondas forma un espectro electromagnético, como se puede observar en la figura 8.

Para Steiner y Chapuis (2013) en la radiación es necesario enunciar que cada tipo de radiación tiene las siguientes características: se propaga en diferentes intervalos o longitudes de onda ( $\lambda$ ), con determinada frecuencia ( $\nu$ ) y a una velocidad  $c=\lambda*\nu$ . El conjunto de todas las longitudes de ondas construye el espectro electromagnético tal como se muestra a continuación en la figura 3:



**Figura 3.** Espectro electromagnético (Levine 1993, Hanan1998).

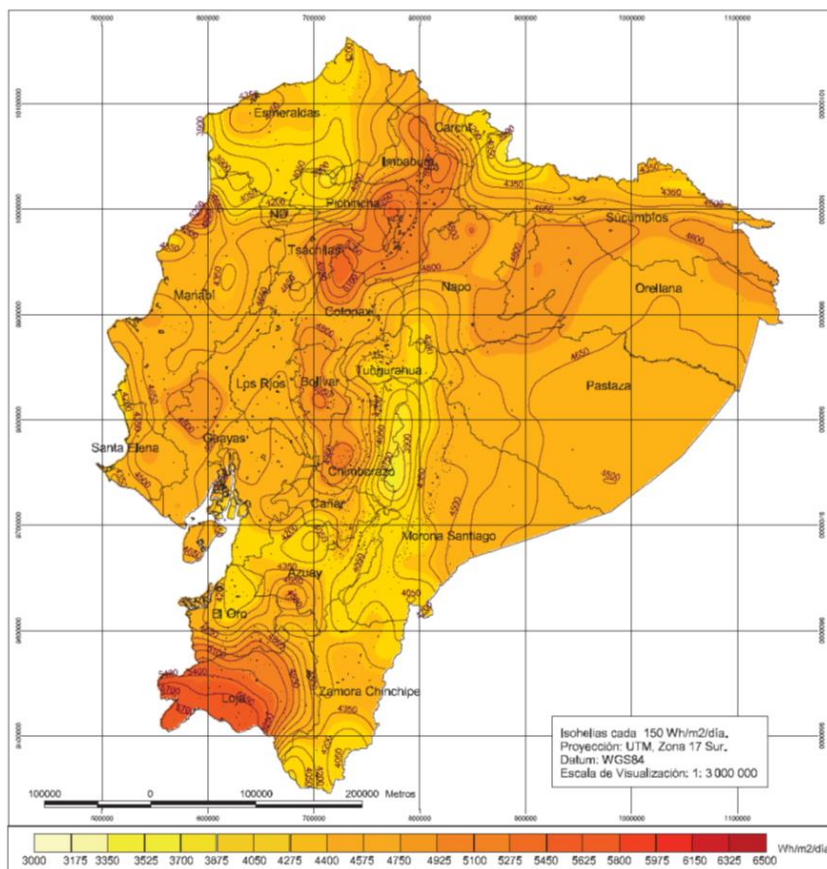
En este contexto la radiación está compuesta por la región ultravioleta con un porcentaje de 8 – 9% (aproximado), del total de la radiación del solar, por otro lado, tenemos la radiación fotosintética activa (PAR), representado por un 45-50% de la energía constituida y por un 50% que representa un aproximado en la radiación solar infrarroja de la energía solar (Castilla, 2005).

Por este motivo la importancia de la radiación radica que es la fuente primordial para la síntesis de la materia orgánica, por lo que es necesario para la vida en el planeta tierra porque a su vez regula el calor y el agua de la misma (Pérez et al., 2006).

Según Pérez et al. (2006) el responsable del intercambio y balance de agua y nutrientes, así como su transporte se debe en gran medida a la radiación solar.

La caracterización espaciotemporal de la irradiancia es vital en el ámbito agrícola, no sólo porque, como se ha comentado, la radiación PAR interviene directamente en el proceso de fotosíntesis, verdadero motor productivo de la planta, sino que la radiación solar aporta la energía necesaria para mantener las condiciones ambientales de temperatura adecuada para el desarrollo del cultivo. Pero, además, el aprovechamiento de la energía solar en el ámbito agrícola puede proporcionar una energía limpia y renovable para satisfacer las demandas energéticas de las explotaciones.

Debido a la posición geográfica del país cercano a la línea ecuatorial, la irradiancia en Ecuador es relativamente elevada, tal como se ilustra en el “Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica” (Conelec, 2008). Según este documento, el valor máximo de la radiación global promedio en el Ecuador es de  $5748 \text{ Wh m}^{-2}\text{día}^{-1}$ , con un mínimo de  $3634 \text{ Wh m}^{-2}\text{día}^{-1}$  y una media de  $4575 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$  (Figura 4).



**Figura 4:** Mapa de radiación media anual (INAMHI, 2013).

Es importante resaltar que la peculiar distribución de la radiación entre directa y difusa debida fundamentalmente a la elevada nubosidad de la región que origina que una importante fracción de radiación se difracte. El valor máximo de la radiación directa promedio es de  $5119 \text{ Wh m}^{-2}\text{día}^{-1}$  por  $3105 \text{ Wh m}^{-2}\text{día}^{-1}$  de difusa, pero si comparamos los valores medios de ambas resulta que el valor promedio de directa ( $2543 \text{ Wh m}^{-2}\text{día}^{-1}$ ) es inferior al de difusa ( $2737 \text{ Wh m}^{-2}\text{día}^{-1}$ ), lo que supone que en grandes zonas del Ecuador de alta nubosidad el porcentaje de radiación difusa supera al de directa, al contrario de otras muchas regiones del planeta afectadas por menor nubosidad (Almería, por poner un ejemplo).

El desarrollo de la horticultura protegida de invernadero en el Ecuador requiere, por tanto, de una adecuada modelación de la distribución de radiación incidente para el cálculo de las necesidades de riego del cultivo, el manejo de las condiciones ambientales del cultivo y la posible generación de energía solar fotovoltaica. Esta modelación de la radiación debe estar basada en la disponibilidad de una serie histórica de datos de radiación medida en diferentes estaciones de la región. El inconveniente radica en que la red de estaciones meteorológicas carece, en la mayoría de los casos, de dispositivos de medida de radiación y, el único dato del que se dispone en la mayoría de ellas es el dato de heliofanía (horas de sol diarias), registradas mediante dispositivos que se conocen con el nombre de heliógrafos. De todos ellos, el más conocido, y ampliamente empleado, es el heliógrafo de Campbell-Stokes. Este dispositivo consiste en una bola de vidrio macizo de unos 10 cm de diámetro que concentra los rayos solares. El foco recorre una banda o cartulina fijada en un marco metálico en semicírculo, la cual se carboniza al paso del foco radiante dibujando una línea más o menos marcada dependiendo de la intensidad de radiación. La medida de la longitud de la línea indica el tiempo (en h) de fuerte insolación recibida.

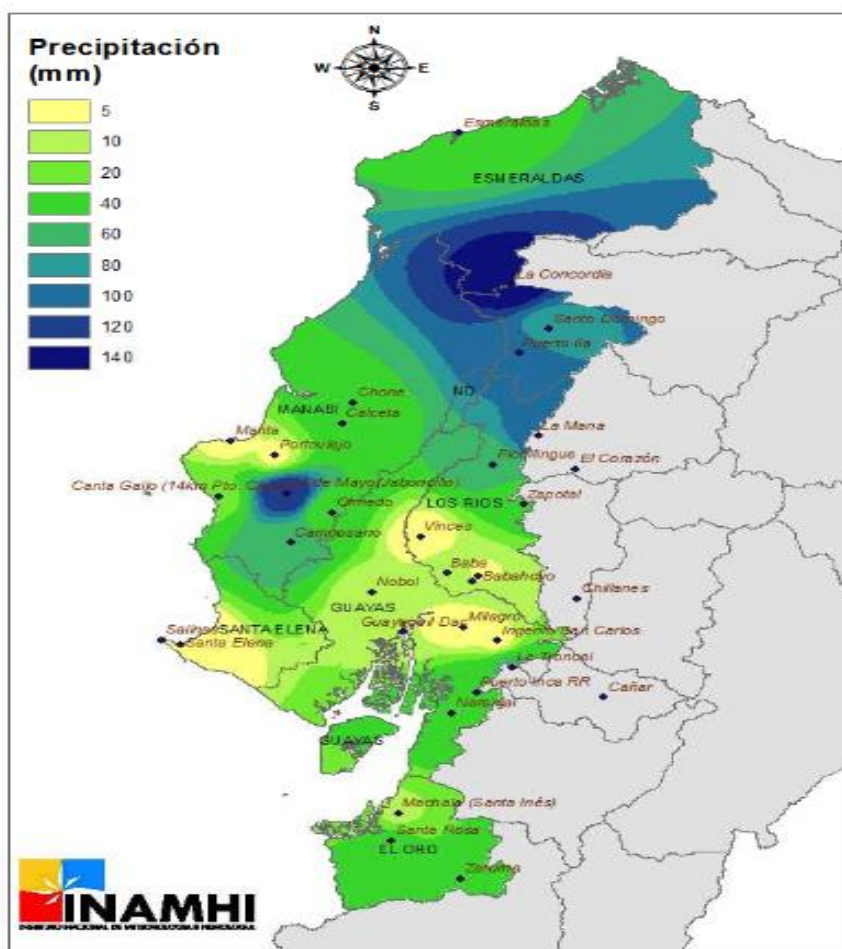
Para aprovechar la gran cantidad de información disponible en forma de heliofanía, es necesario utilizar y ajustar a las condiciones locales modelos que permitan estimar los valores de radiación en función de la heliofanía. Entre ellos, cabe destacar el modelo de Angstrom

(1924). El modelo de Angstrom es un modelo simple que se ha utilizado con excelentes resultados por diversos autores en diversos países de América del Sur con condiciones similares a Ecuador como Colombia (Guzmán et al., 2013), Venezuela (Almorox et al., 2008) o Brasil (Da Silva et al., 2017). Además del modelo de Ångström, otras ecuaciones empíricas simples se han propuesto (Vélez-Pereira et al., 2013). Modelos más complejos como el de Collares-Pereira y Rabl (1979) permiten estimar con más precisión la partición entre radiación directa y difusa.

### 2.1.1. Situación climatológica del Litoral Ecuatoriano

#### 2.1.1.1. Precipitación

De acuerdo con Manobanda (2014), la precipitación registrada en el mes de junio del 2014 fue significativamente mayor hacia el interior en el norte del Litoral. Los máximos diarios registrados se reportan en las estaciones: La Concordia el día 7 con 64 mm, Pichilingue el día 9 con 44.1 mm y Jaboncillo con 35.1 mm los días 1 y 4 (Donoso, 2010) (figura 5).



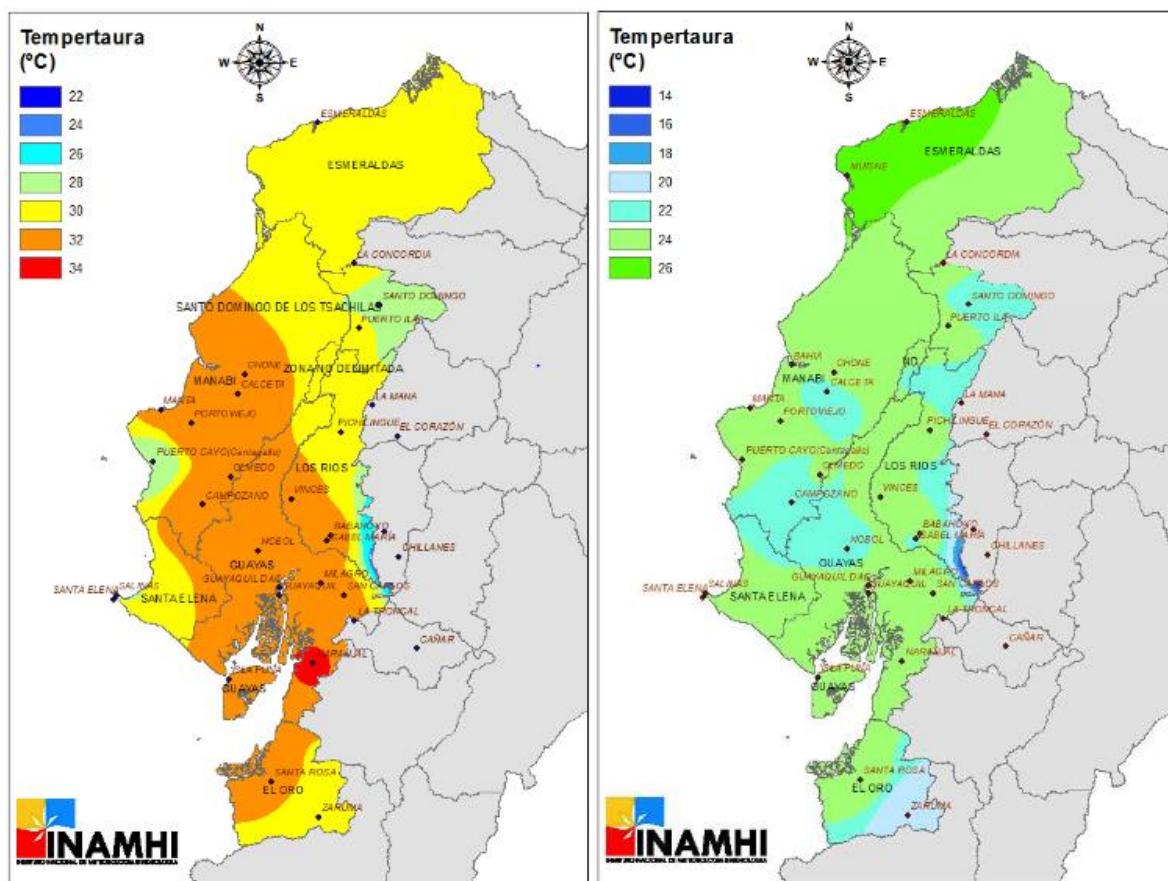
**Figura 5.** Precipitación registrada en el litoral en junio del 2014 (Manobanda, 2014).

#### 2.1.1.2. Temperatura.

De acuerdo con Manobanda (2014), la temperatura registrada en el litoral en el mes de junio del 2014, las máximas temperaturas se registraron mayormente en el centro y sur del Litoral. Los valores máximos diarios se registraron en: Portoviejo (35°C, 34.7°C y 33.7°C),

Guayaquil (34.4°C y 33.6°C), Olmedo, Calceta y La Troncal (33.5 °C). San Cristóbal registró una máxima de 30.8°C (INAMHI, 2013).

Las mínimas temperaturas se registraron mayormente en el centro costanero y en el límite sur del Litoral. Los valores mínimos diarios se registraron en: Zaruma (15.8°C), La Maná (18.5°C), Santo Rosa (19.3°C), Calceta, Nobol y Puerto Cayo (19.4°C). San Cristóbal registró una mínima de 22.4°C (Donoso, 2010) (figura 6).



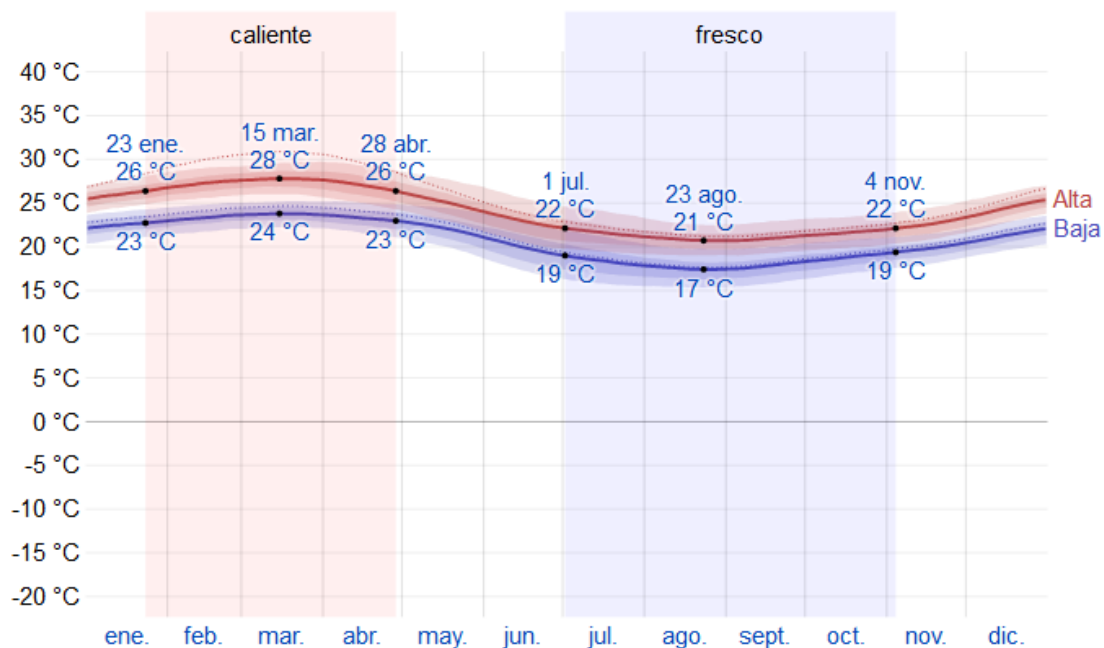
**Figura 6.** Temperatura registrada en el litoral junio del 2014 (Manobanda, 2014).

### 2.1.2. El clima en Santa Elena

En el cantón de Santa Elena, la época de lluvia es caliente y nublada; la época seca es parcialmente nublada y es opresivo durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 17 °C a 28 °C y puede bajar en muy pocas ocasiones a menos de 15 °C o sube a más de 30 °C (INOCAR, 2018).

#### 2.1.2.1. Temperatura

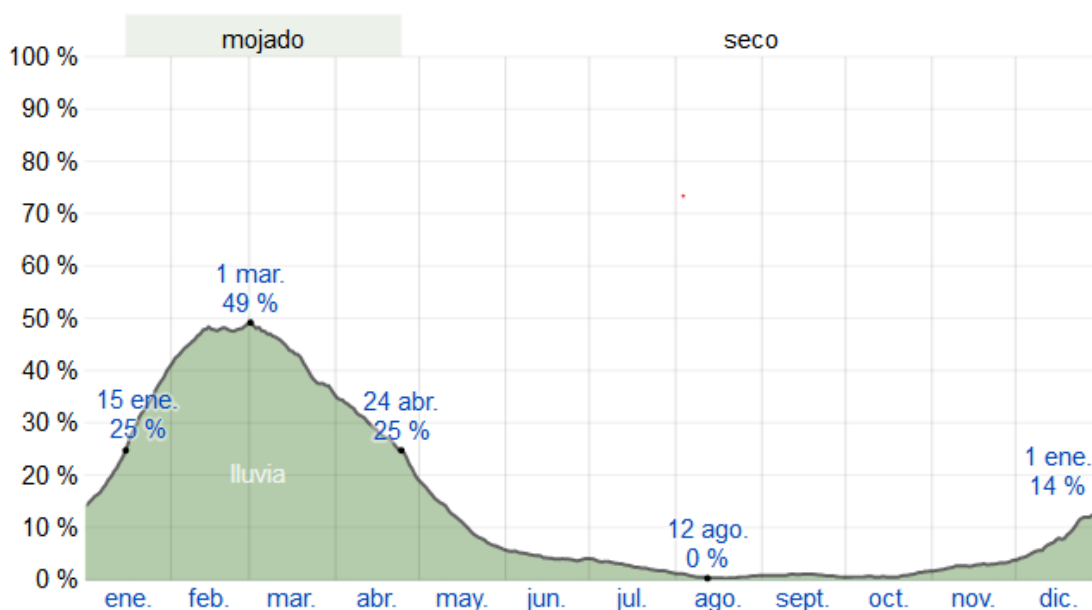
La temporada templada dura 3,2 meses, del 23 de enero al 28 de abril, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 26 °C. El día más caluroso del año es el 15 de marzo, con una temperatura máxima promedio de 28 °C y una temperatura mínima promedio de 24 °C. La temporada fresca dura 4,1 meses, del 1 de julio al 4 de noviembre, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 22 °C. El día más frío del año es el 23 de agosto, con una temperatura mínima promedio de 17 °C y máxima promedio de 21 °C (Spark, 2018) (figura 7).



**Figura 7.** Temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) promedio diario con las bandas de los percentiles 25° a 75°, y 10° a 90° (Spark, 2018).

#### 2.1.2.2. Precipitación.

La temporada más húmeda tiene una duración 3,3 meses, de 15 de enero a 24 de abril, con una probabilidad superior al 25 %. La probabilidad máxima es del 49 % y corresponde con la fecha del 1 de marzo. La temporada más seca dura 8,7 meses, del 24 de abril al 15 de enero. La probabilidad mínima de un día húmedo es del 0 % el 12 de agosto. En cuanto a la categorización, el tipo más común de precipitación durante el año es solo lluvia, con una probabilidad máxima del 49 % el 1 de marzo (INOCAR, 2018) (figura 8).

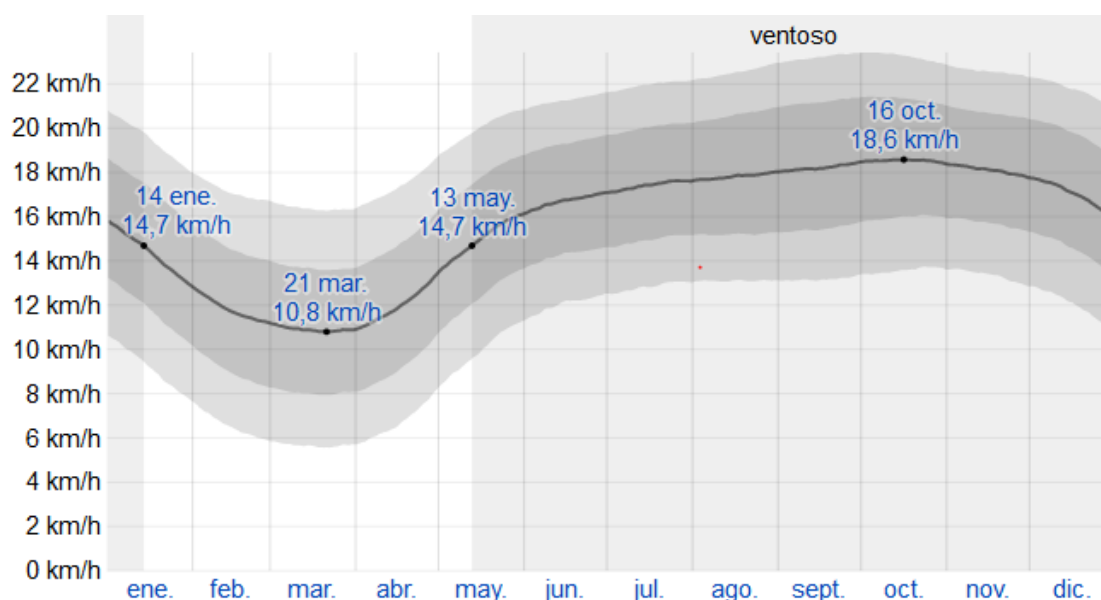


**Figura 8.** Porcentaje de días en los que se observan diferentes tipos de precipitación (Spark, 2018).

La temporada de lluvias dura 5,9 meses, del 11 de diciembre al 9 de junio, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia de por lo menos 13 milímetros. La mayoría de la lluvia cae durante los 31 días centrados alrededor del 3 de marzo, con una acumulación total promedio de 129 mm. El periodo del año sin lluvia dura 6,1 meses, del 9 de junio al 11 de diciembre. La fecha aproximada con la menor cantidad de lluvia es el 25 de agosto, con una acumulación total promedio de 1 mm (Spark, 2018).

### 2.1.2.3. Viento

La velocidad promedio del viento por hora en la provincia de Santa Elena tiene variaciones estacionales notables en el transcurso del año. La zona donde existe mayor presencia de viento del año dura 8,0 meses, y ocurre en el intervalo del 13 de mayo al 14 de enero, con velocidades promedio del viento de más de  $14,7 \text{ Km h}^{-1}$ . El día con más presencia de vientos del año es el 16 de octubre, con una velocidad promedio del viento de  $18,6 \text{ Km h}^{-1}$ . El día con menos presencia de vientos del año es el 21 de marzo, con una velocidad promedio del viento de  $10,8 \text{ Km h}^{-1}$ . La dirección dominante del viento predominante en Santa Elena es del oeste (INOCAR, 2018) (figura 9).



**Figura 9.** Promedio de la velocidad media del viento por hora (línea gris oscura), con las bandas de percentil 25° a 75° y 10° a 90° (Spark, 2018).

## 2.2. Situación de la horticultura

### 2.2.1. Situación de la horticultura en el mundo

La oferta mundial de alimentos actualmente se encuentra en el mismo nivel que la producción mundial de hortalizas y experimenta una tendencia al alza en estos últimos años. En los datos de producción comparados según la FAO (2015) desde los años 2003 al 2012 se puede observar una tasa de crecimiento del 12.6%.

La población agrícola varía mucho según los países y su nivel de vida. En continentes como África, el número de personas dependientes de la agricultura como medio de vida es

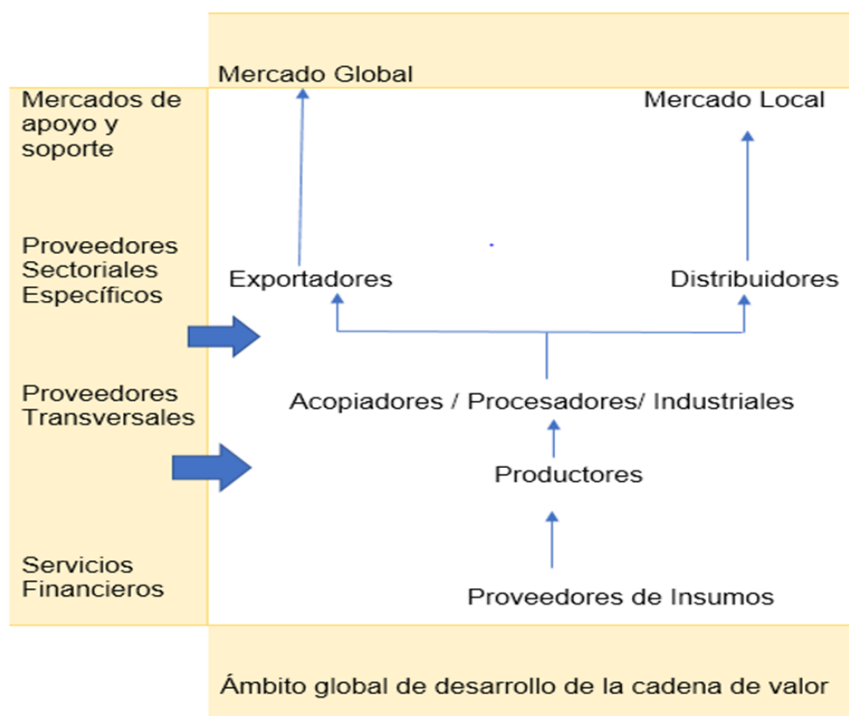
elevado, mientras que en Europa cada vez es menor. En promedio, el 38 % de la población mundial está ligada a la agricultura (Saavedra Del Real, 2013).

Algunos países como es el caso de Japón, Gran Bretaña, Irlanda del Norte y Chile, han promovido proyectos para estimular el consumo de vegetales, impulsando el consumo de 5 frutas o verduras diferentes de forma diaria, llegando aún más allá al promover que estos frutos sean de diferentes colores (Real, 2013).

Los cultivos hortícolas son un instrumento invaluable para el desarrollo agrícola debido a su alto valor económico, nutritivo, y su capacidad latente para servir como un motor para la agricultura y la diversificación económica, especialmente para los pequeños propietarios que pueden adaptar la producción a productos específicos locales, regionales o de exportación. La horticultura, sin embargo, es altamente técnica y el proceso dependiente del conocimiento y el éxito es contingente sobre la adopción de cultivares y manejo apropiados (USAID, 2005).

### 2.2.2. Sistema de mercado en la horticultura

Según (USAID, 2005) el mercado moderno para la horticultura está cambiando rápidamente y nuevas adquisiciones de estrategias, alimentadas en parte por el crecimiento de supermercados alrededor del mundo, requieren cada vez más, que los productores cumplan estándares de calidad, consistencia y cantidad. Este es un reto especial para los pequeños productores porque no tienen ni los recursos ni las habilidades para acceder e interpretar la información del mercado, ni capital financiero adecuado, humano o social para desarrollar los vínculos necesario para triunfar en el mercado. En la figura 10 se presenta un flujograma de la cadena de valor en horticultura.



**Figura 10.** Flujograma de la cadena de valor de la horticultura (Martinez, 2011).



### 2.2.3. Evolución cuantitativa y cualitativa de la horticultura

La producción de hortalizas se ha incrementado de manera significativa a escala mundial, como por ejemplo en China que ha aumentado la superficie sembrada de hortalizas de 4 a 22 millones de ha. China domina actualmente el mercado mundial (Ckrarup, 2008).

El segundo productor de hortalizas mundial es India con 126.578 10<sup>6</sup> Kg producidos en 2014. Le sigue EE. UU. con 36.598 10<sup>6</sup> Kg (Info, 2018).

En la actualidad existen varias tendencias en el comercio internacional de hortalizas:

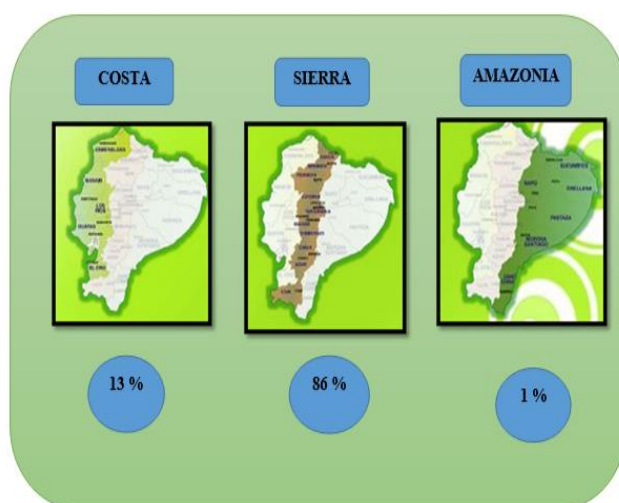
- El requerimiento de hortalizas frescas (preparadas) aumenta.
- Las hortalizas orgánicas tienen una mayor demanda en países desarrollados.
- Aparecen nuevos centros de importación como es el caso de la India, China y Estados Unidos (Risjwick, 2018).
- El incremento del cultivo en condiciones protegidas en invernadero particularmente en zonas cercanas a grandes centros de consumo en el hemisferio norte (Reho, 2018).

### 2.2.4. Importancia de la horticultura en el Ecuador

La agricultura en el país ocupa al 25% de la población económicamente activa por lo que es el principal origen de empleo obteniendo como resultado que un 1,6 10<sup>6</sup> de personas que laboran en este área (UTN, 2017).

La horticultura en Ecuador creció de manera progresiva a comienzos de la década de los 90, con el tiempo, los hábitos en la alimentación han tenido una transformación hacia una dieta más saludable impactando de manera positiva en un incremento de consumo de hortalizas y en una mayor producción de vegetales para exportación como es el caso del brócoli, esparrago y palmito. De forma que se está implementando la industrialización de vegetales para el mercado exterior (FAO, 2018).

Según la FAO (2018), la horticultura se desarrolla principalmente en la sierra, con una participación del 86%, y el resto en la costa ecuatoriana 13% y en el oriente (1%). Las provincias productoras son: Tungurahua, Chimborazo, Azuay, Pichincha y Cotopaxi. En la figura 11 se presenta la participación porcentual de la horticultura en el Ecuador.



**Figura 11.** Participación de la horticultura en el Ecuador (FAO, 2018).

Sin embargo, en la actualidad, la producción hortícola se realiza por pequeños productores, que se encuentran en situación de estancamiento y en situación de pobreza, resultado de medios externos e internos que amenazan la sustentabilidad de estas estructuras productivas (Van Konijnenburg, 2010).

### 2.3. El invernadero para la producción hortícola

El cultivo en invernadero actualmente permite establecer las condiciones eficientes para un correcto incremento de la producción, por el motivo que cuenta con un buen aislamiento con el exterior. Otra de las bases para aumentar la producción es la posibilidad de usar estas instalaciones es el control climático que mejora notablemente el cultivo (MSC, 2017).

El invernadero es un sistema que conlleva incrementar la eficiencia en la utilización del agua, generando un microclima para optimizar la fotosíntesis de los cultivos, disminuyendo la evapotranspiración excesiva y aumentando los rendimientos (Salazar, 2014).

Los invernaderos no pueden ser copias exactas de otros invernaderos, sino el resultado de un estudio concreto de las condiciones climáticas del lugar y del microclima que se debe proveer al cultivo. Entre los elementos a estudiar para su instalación están la altitud, temperatura, humedad relativa, terreno, dirección y velocidad del viento, disponibilidad y calidad del agua, accesibilidad, disponibilidad de mano de obra, cultivo a sembrar, estudio de mercado, entre otros (Peralta , 2014).

#### 2.3.1. Ventajas y limitaciones de invernaderos en la región tropical

El uso de invernaderos presenta muchas ventajas para el productor, sin embargo, siempre es necesario tomar en cuenta las limitaciones que este tipo de estructuras conlleva. Entre las ventajas de este tipo de producción se encuentra la intensificación de la producción. La producción de hortalizas bajo invernadero provee a las plantas de condiciones apropiadas para su crecimiento como la temperatura, la iluminación y la humedad relativa. Adicionalmente, la producción se intensifica al contar con un mayor número de plantas por superficie de cultivo. Otra de las ventajas es el poder cultivar hortalizas todo el año o poder producir más de un ciclo. Esta ventaja lleva al productor a otra ventaja, el poder obtener productos fuera de temporada, lo que representa una ventaja en cuanto a precio y mercado (Pacheco y Bastida, 2011).

Una de las principales ventajas de producir bajo invernadero, es producir en regiones con condiciones restrictivas o inadecuadas para el crecimiento de las plantas. El aumento del rendimiento es otra de las ventajas, gracias a que se utilizan sustratos con los nutrientes necesarios para las plantas, se controla la humedad y el ambiente en el interior. Generalmente, los productos producidos bajo invernadero son de mejor calidad en comparación con los producidos a campo abierto, ya que no están expuestos a daños por lluvias, heladas, granizo y viento. Adicionalmente, permite al productor controlar el riego para evitar sequías e inundaciones y permite suministrar algunos nutrientes mediante fertirriego. Asimismo, otra ventaja es el control de plagas, malezas y enfermedades ya que facilita el uso de tratamientos preventivos. Finalmente, el uso de invernaderos es muy adecuado para realizar

investigaciones ya que se controlan las condiciones climáticas en el interior, por lo cual se pueden observar las respuestas a ciertos cambios (Pacheco y Bastida, 2011).

Al hablar de las limitaciones del uso de invernaderos, principalmente se encuentra la alta inversión inicial que conlleva, por lo que se recomienda para la producción de cultivos altamente redituables, como las hortalizas. Este tipo de producción requiere de un alto nivel de especialización y capacitación del productor, ya que es de quien depende totalmente la producción. Adicionalmente, con el uso de estas estructuras aumentan los costos de producción, esto es debido a que se requiere una inversión en insumos y buen manejo, sin embargo, también los rendimientos aumentan.

Es cierto que en los invernaderos se proporciona un ambiente ideal para el crecimiento de las plantas, asimismo, también proporciona un ambiente ideal para el desarrollo de algunas enfermedades y plagas que pueden llegar a dañar toda la producción si no se tratan adecuadamente. Una de las mayores limitaciones es la dependencia del mercado; debido a que las hortalizas son productos perecederos y por lo tanto, es necesario para el productor el estar seguro de la venta total de la producción para invertir en estas estructuras (Pacheco y Bastida, 2011).

### 2.3.2. Invernaderos en Ecuador

De acuerdo con la información presentada por Henao (2000), Ecuador cuenta con aproximadamente 1.000 ha de invernaderos, ubicados en Tungurahua, Chimborazo, Pichincha, Napo, Loja, Cañar, Azuay, Bolívar, Cotopaxi y Guayas. El desarrollo de los invernaderos comienza a inicios de los años 90 para la producción de flores y 5 años después este sistema se extiende hacia nuevos cultivos como el tomate riñón y frutillas (Moreno, 2005).

## 2.4. El uso del plástico en la agricultura

La implementación de las diferentes clases de polímeros sintéticos en la Agricultura es la base de tecnología emergente que permite transformar tierras aparentemente improductivas en aprovechamientos agrícolas eficientes y, en algunos casos, mejorar la calidad de frutas y de hortalizas (Ingeborg Zenner de Polanía, 2013).

La utilización de plásticos tiene múltiples aplicaciones, que se concentran en su uso en invernaderos, en túneles, en microtúneles, en alcochado o mulching, en mallas de sombreo y de embolsado.

Los materiales plásticos que se utilizan como cubierta en la agricultura son los siguientes:

- ✓ Polietileno (PE): de alta y baja densidad.
- ✓ Poliamidas: Nylon y Rilsan.
- ✓ Copolímero EVA.
- ✓ Policloruro de vinilo (PVC): rígido, flexible y semiflexible, reforzado con fibra de vidrio.
- ✓ Poliéster.
- ✓ Polimetacrilato de metilo.
- ✓ Poliestireno.
- ✓ Polipropileno.
- ✓ Polimetacrilato de metilo (PMM).

✓ Policarbonato (Cermeño, 2011).

#### 2.4.1. Materiales plásticos fotoselectivos empleados en la cubierta

Dentro de los avances de la industria química del uso de plásticos, está la mejora en los materiales en relación a sus propiedades mecánicas y selectivas de la radiación. Durante los últimos años, en la agricultura se han desarrollado diferentes tipos de plásticos denominados “fotoselectivos” (López-Marín et al., 2009). La función de los plásticos fotoselectivos se basa principalmente en modificar el espectro de luz dentro del invernadero, influyendo en el comportamiento de las plantas o en el ambiente en el que se desarrollan (López-Marín et al., 2009).

La unión de aditivos con polímeros da como resultado la selección de radiaciones de determinadas longitudes de onda. Los aditivos por su parte se incorporan en el proceso de fabricación del plástico y pueden ser de procesamiento es decir que facilitan el proceso de transformación o funcionales que aportan a ciertas funciones al plástico (López-Marín et al., 2009).

Dentro de los aditivos funcionales encontramos los fotoestabilizadores, antiácidos, bloqueadores de la radiación infrarroja larga y corta y los aditivos de luminiscencia. Estos aditivos funcionales ralentizan el envejecimiento de las láminas agrícolas, debido a la degradación de los polímeros por la acción de los rayos UV (López-Marín et al., 2009). El balance espectral dentro de los cultivos de invernadero está definido por la intensidad y la calidad de la radiación que penetra en los invernaderos, debido a la modificación de la temperatura interna que genera cambios morfológicos y fisiológicos en los cultivos (López-Marín et al., 2009).

Las plantas dentro del invernadero presentan adaptaciones en el tamaño, composición y eficiencia en la captación de energía solar. Las adaptaciones de las plantas se debe a la acción conjunta de los fotorreceptores como la clorofila, carotenoides y fitocromos con los que la planta interpreta las características de radiación en cuanto a la calidad espectral. Estudios sobre la fotomorfogénesis han demostrado la influencia de la calidad espectral de la radiación en el crecimiento de las plantas (López-Marín et al., 2009). Es importante mencionar que al contar con un gran aporte energético, es decir con altos niveles de radiación, se genera un aumento de consumo de agua en las hojas por efecto del calentamiento de las mismas.

El espectro solar correspondiente a la región ultravioleta es una parte de la región no ionizante del espectro electromagnético resultando entre el 8-9% del total de la radiación solar (Frederik, 1993). Dentro de la clasificación de la radiación ultravioleta se consideran tres rangos de longitud de onda:

- ✓ UV-C (200-280 nm) se considera extremadamente dañina pero bajo condiciones normales de radiación solar no se considera relevante.
- ✓ UV-B (280-320 nm) representa el 1.5% del total del espectro pero puede ocasionar efectos negativos en las plantas.
- ✓ UV-A (320-400 nm) representa el 6.3% del total de la radiación total, es considerada la parte menos peligrosa de la radiación ultravioleta.

La radiación UV-B posee un efecto fotobiológico presentando alteraciones en el material genético, procesos fotosintéticos, crecimiento, morfología, floración y en el equilibrio competitivo entre las especies (López-Marín et al., 2009). Es importante acotar que el uso de filmes absorbentes de UV-B como la cubierta de invernadero promueven la disminución de plagas, insectos y enfermedades producidas por hongos. Por tanto el uso de

estos filmes abosorbedores de UV-B puede ser usado como una medida de proteccion contra hongos y enfermedades que tiene mayor incidencia en la horticultura, debido a que los materiales fotoselctivos anti-UV limitan la proliferacion de hongos y enfermades causadas por los mismo (López-Marín et al., 2009).

#### 2.4.2. Plasticos fotoselectivos

Los plasticos fotoselectivos modifican la radiacion debiado a la influencia en la cantidad y en la calidad espectral de la radiacion, la cual se ve reflejada en el crecimeinto de las plantas. Estudios de la fotomorfogenesis en relación a los flujos de fotones rojo/rojo lejano (610-700/700-800 nm) actuan en el alargamiento de los tallos. Los fotones rojo (610-700 nm) y azul (410-510 nm) son donde hay mayor radiacion PAR. De esta manera a traves de los plasticos fotoselectivos se seleccionan longitudes de onda con el fin de adaptarlos a los requerimientos luminicos de la planta durante el desarrollo fenologico del mismo (INFOAGRO, 2020).

#### 2.5. Influencia del material de cubierta en el balance energético

El conocimiento de las diferentes técnicas de climatización en aras de hacer viable la producción hortícola a lo largo del año se complementa con el estudio de los balances de radiación solar y energía, la dinámica de los fluidos y la temperatura de las plantas. Todo ello permite obtener una base para el criterio de diseño y manejo de estas estructuras productivas conocidas como invernaderos (De Pedro, 2015).

El balance de energía otorga la comprensión del sistema, así como de los fundamentos de análisis ante la manera en que las plantas y el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta para el calentamiento del aire, la evapotranspiración y el calentamiento del suelo, en otras palabras, el balance energético permite interpretar como afectan los elementos del clima al ambiente interior que rodea a los cultivos bajo el invernadero (De Pedro, 2015).

Según Wang y Boulard (2000), predecir el microclima dentro de un invernadero permitiría a los productores una mejor gestión de los cultivos y a los diseñadores mejorar los sistemas de ventilación, así como de calefacción. Entre todos los estudios realizados inherentes al balance energético dentro de invernadero destacan Garzoli y Blackwell (1981) y Al Jamal (1994) entre otros, que consideran el modelo simplificado propuesto por Valera et al. (2008):

$$R_n + Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} \quad (1)$$

Donde:

$R_n$ , corresponde a la radiación neta.

$Q_{cli}$ , energía ganada o perdida a través del sistema de climatización.

$Q_{cc}$ , calor perdido o ganado por medio de conducción-convección.

$Q_{ren}$ , calor sensible y latente perdido o ganado por renovación del aire interior.

$Q_{evp}$ , Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo.

$Q_{sue}$ , flujo de calor perdido o ganado por la conducción a través del suelo.

Dentro del análisis del balance energético en un invernadero, es importante mencionar que existen otros factores debidos al material de cubierta que influyen sobre la radiación que alcanza a las plantas, al suelo y consecuentemente sobre la radiación que es emitida de éstos hacia el exterior. Citando el trabajo de Valera et al. (2008) de forma descriptiva la ecuación siguiente, considera que la radiación neta que calienta el invernadero es equivalente a la energía absorbida por la cubierta, por el suelo y por las plantas menos la radiación emitida por la cubierta.

$$R_n = S_s * [I * (a + \tau * a_s)] + S_c * \sigma * \tau_{ter} (\epsilon_{atm} * T_{atm}^4 - \epsilon_{ter} * T_{cb}^4) \quad (2)$$

Donde:

$R_n$ , corresponde a la radiación neta en ( $J m^{-2}s^{-1}$ ).

$S_s$ , superficie captadora de radiación solar en ( $m^2$ ).

$I$ , radiación solar incidente en ( $J m^{-2}s^{-1}$ ).

$a$ , coeficiente de absorción de la cubierta para la radiación solar que depende del tipo de material (tabla adjunta)

$\tau$ , coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar.

$a_s$ , coeficiente de absorción de las plantas y el suelo.

$S_c$ , superficie de techo en ( $m^2$ ).

$\sigma$ , constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} W m^{-2}K^{-4}$ )

$\tau_{ter}$ , coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación térmica.

$\epsilon_{atm}$ , emisividad de la atmósfera.

$T_{atm}$ , temperatura de emisión de la energía de la atmósfera en (K).

$\epsilon_{ter}$ , emisividad del material de cubierta para la radiación térmica.

$T_{cb}$ , temperatura absoluta de la cubierta en (K).

El término  $R_n$  corresponde al balance de radiación de onda corta en el invernadero, de esta forma analizando la ecuación anterior se obtienen dos frentes; uno externo y otro interno. Externamente la radiación de onda corta que incide sobre la superficie captadora de la radiación solar sufre procesos de absorción por la cubierta. Internamente la radiación que es transmitida dentro del invernadero es absorbida por las plantas y el suelo. Es justamente la interacción entre ambos frentes que crea el balance de energía (Varela et al., 2008).

Los valores de los coeficientes  $a$  y  $\tau$  dependen al tipo de material que se emplee como cubierta, estos se muestran en la tabla adjunta.

Por otro lado, hay una relación entre el coeficiente de absorción de las plantas, el índice de área foliar (IAF) y la fracción de suelo cubierto por las plantas del cultivo albergado en el invernadero.

Necesariamente se debe tomar en cuenta el índice de reflexión solar o albedo  $\alpha$  que es determinante.

El segundo término de la ecuación anterior establece el balance de radiación de onda larga que aflora del invernadero. La fracción de energía emitida por la atmósfera, así como la

emitida por el material de cubierta dependen de su respectiva temperatura absoluta; por otro lado, la energía que logra escapar del invernadero depende de las propiedades de transmisión de radiación térmica del material de cubierta y la superficie ocupada por el mismo; por aquello el uso de superficies que tengan un bajo coeficiente de emisividad constituyen técnicas de ahorro energético (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características de los materiales de cubierta (Valera et al., 2008).

Materiales utilizados en cubiertas simples, en dobles paredes o como pantallas térmicas	Ref	Espesor (mm)	Radiación solar (300-2500 nm)			Radiación visible (380-760 nm)			Radiación térmica (2500-40000 nm)			K <sub>d</sub>	ρ <sub>c</sub>
			(α=ε)	(τ)	(δ)	(α=ε)	(τ)	(δ)	(α=ε)	(τ)	(δ)		
Vidrio hortícola (VH)	2;4	4	0,03	0,89	0,08	0,01	0,91	0,08	0,9	0,00	0,10	6,7	2,4
PVC rígido	7;6	18	0,11	0,62	0,27	0,02	0,61	0,37	0,92	0,01	0,07	3,8	1,3
Polietileno sin aditivos (PE)	4;7;6	0,1	0,01	0,88-0,11	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)	1;7;2	0,18	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,1	0,13-0,4	0,53-0,8	0,07	9,4-16,2	0,91
Polietileno de larga duración (PEld)	7;2	0,1	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,1	0,2-0,2	0,53-0,76	0,04-0,07	9,4-16,2	0,92
Polietileno infrarrojo (PEir)	8;4	0,1	0,03	0,89	0,08	0,01	0,89	0,1	0,77	0,2	0,03	8,6-13	0,92
Polietileno térmico (PEt)	1;4	0,18	0,03	0,89	0,08	0,02	0,9	0,08	0,8	0,1	0,03	8,6-13	0,92
Copolímeros EVA	7;6	0,1	0,02	0,89-0,91	0,07-0,09	0	0,9-0,92	0,08-0,1	0,42-0,58	0,39-0,55	0,03	7,8	0,94
PE+EVA	7;2	0,1+0,1	0,03	0,87	0,1	0	0,88	0,12	0,59-0,7	0,27-0,38	0,03	9,4-10,2	
Pantalla aluminizada	1	0,04						0,5	0,1	0,4		7,6	

El flujo de calor que atraviesa la superficie de la cubierta y es perdido o ganado por conducción-convección es determinado por un gradiente de temperatura entre el exterior y el interior del invernadero y por un coeficiente de pérdidas global que se asume a valores propios para cada invernadero, que depende del espesor, conductividad térmica, así como la temperatura del material de cubierta. Este calor según Valera et al. (2008) puede ser expresado como:

$$Q_{cc} = S_d K_d (t_i - t_e) \quad (3)$$

Donde:

$S_d$ , corresponde a la superficie de la cubierta que conforman paredes y techo del invernadero en (m<sup>2</sup>).

$t_i$ , temperatura interior en (°C).

$t_e$ , temperatura externa en (°C).

$K_d$ , coeficiente global de pérdidas de calor por convección-conducción (W m<sup>2</sup> °C<sup>-1</sup>).

El coeficiente determinado por  $K_d$  depende de la hermeticidad del invernadero, del sistema de calefacción, de la velocidad del viento, del sistema de riego, de la cantidad de nubes que cubren el cielo y de la precipitación (FAO, 2000).

La entrada de aire desde el exterior de un invernadero puede inferirse a una pérdida o ganancia de energía, esto dentro del balance energético se puede representar con el término  $Q_{ren}$ , que corresponde al calor sensible y latente perdido o ganado como consecuencia de la

renovación de aire interior y que obedece a la diferencia de temperatura y humedad entre el exterior e interior.

Los factores determinantes en la ganancia o pérdida en energía de un invernadero corresponden al volumen de aire que encierra ( $m^3$ ), la tasa de renovación del aire y la presión dentro del invernadero en función a la elevación con respecto al nivel del mar (atm).

Cuando se busca como objetivo evitar una pérdida excesiva de energía del invernadero como sucede en la época invernal en climas templados, la renovación del aire debe ser la menor posible por lo que se añade importancia al mantenimiento de la hermeticidad del invernadero; los daños constructivos pueden incrementar esta pérdida de forma excesiva.

A través de la transpiración, los cultivos hortícolas bajo un invernadero, pueden disipar la energía incidente dependiendo de cada especie (coeficiente  $K_c$  específico) y en el momento de desarrollo en que se encuentre. Para determinar la cantidad de calor absorbido para provocar el cambio de estado de agua líquida a vapor mediante la evapotranspiración representada por  $Q_{evp}$  es necesario conocer el déficit de presión de vapor dentro del invernadero, la radiación incidente sobre el cultivo y velocidad del viento dentro del invernadero.

Según Valera et al. (2008) aproximadamente el 10% de las pérdidas de calor en un invernadero se realiza a través del suelo. Este flujo de calor ganado o perdido mediante conducción a través del suelo que se representa por  $Q_{sue}$  es dependiente de la profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura, de un coeficiente de intercambio térmico  $K_s$  y de la temperatura del suelo dentro del invernadero.

Finalmente, la importancia de establecer el balance energético permite determinar la cantidad de energía que es necesaria ceder o absorber del invernadero a través de los sistemas de calefacción o refrigeración.

## 2.6. Soluciones para el control térmico de las altas temperaturas dentro del invernadero en relación con las cubiertas

Dado que la radiación absorbida por el cultivo hortícola debe ser convertida de forma eficiente en asimilados que forman parte del tejido vegetal y de forma particular, en los órganos de interés comercial, la incorporación tecnológica en el invernadero permite mejorar esta eficiencia al modificar y controlar el valor de los parámetros climáticos que constituyen el microclima donde se desarrolla el cultivo (radiación, temperatura, concentración de  $CO_2$ , déficit de presión de vapor, velocidad de viento), duración del período productivo, aporte mineral e hídrico así como el control de plagas y enfermedades. Para conseguir un aumento de productividad hortícola en invernaderos, se debe implicar la gestión concluyente en innovación de estructuras para el manejo del invernadero y la gestión ambiental (Montero et al., 2014). En esta sección se tratarán soluciones para el control térmico en aras de contrarrestar las altas temperaturas dentro del invernadero. Las técnicas de control de temperatura son del tipo sombreado, que permitirán aprovechar el espectro de radiación solar en la región fotosintéticamente activa (PAR) en la medida aceptable, y rechazar la energía que provoque el calentamiento indebido en la región del infrarrojo cercano (NIR), de tal forma que las variables de perturbación que describen el clima en el exterior del invernadero no sean tan influyentes. A continuación, se describen las soluciones para contrarrestar las altas temperaturas dentro de los invernaderos en relación con las cubiertas (Montero et al., 2014).



### 2.6.1. Técnicas de sombreo

Constituye la técnica de refrigeración de invernaderos más común, sin embargo, no está libre de inconvenientes como la no selectividad de los productos usados. Mediante las técnicas de sombreo se produce la reducción de temperatura con el inconveniente de disminuir el porcentaje de radiación fotoactiva, mientras que la radiación infrarroja corta llega en exceso a los cultivos (Montero et al., 2014). Sin embargo, es muy probable que el declive térmico no sea notorio, como en el caso de usar pantallas de sombreo durante la temporada de verano con el propósito de sombrear.

Los sistemas de sombreo pueden categorizarse en dos tipos:

Sistemas estáticos que cuando se instalan al invernadero, lo sombrean de forma invariable sin posibilidad de graduación o control.

Sistemas dinámicos que cuando se instalan al invernadero, permiten un control gradual de la radiación solar en función de las necesidades climáticas del invernadero.

#### 2.6.1.1. Encalado

El proceso de encalado consiste en el blanqueamiento de las paredes, así como de la cubierta del invernadero, mediante la aplicación de  $\text{CaCO}_3$  o cal apagada y un agente humectador. Esta técnica ha tenido una amplia ejecución en la cuenca mediterránea. Para zonas con poca incidencia de lluvias es más recomendable el carbonato cálcico, por la razón de ser más fácil de eliminar mediante lavado; mientras que para zonas más húmedas es preferible usar soluciones de cal apagada (Bailey et al., 1993). El blanqueamiento con cal apagada en el recubrimiento del invernadero presenta una serie de inconvenientes, entre estos se pueden enunciar:

- ✓ El impedimento en el ajuste del grado de sombreo en función a las condiciones ambientales dada la permanencia de la cal en el invernadero durante el periodo de cubierta.
- ✓ La heterogeneidad de la cantidad de luz que alcanza al cultivo debida a la aplicación no homogénea de cal en el invernadero.
- ✓ El uso de soluciones ácidas para remover los restos de cal ya que con el uso de agua y fricción quedan manchas sobre la cubierta o paredes de plástico.
- ✓ El dispendio considerable de mano de obra tanto en la ejecución como en la limpieza.

Inherente al efecto del encalado sobre las temperaturas del aire los datos son escasos, así como difícil de comparar entre estos, debido a que la aplicación de cal tendrá distintos resultados según el tipo de invernadero sobre el que se utilice. En invernaderos con buena ventilación, el efecto del encalado será menor que en otros más herméticos (Montero et al., 2014).

Es importante enunciar que la dosis de encalado dependerá del porcentaje de radiación que se desea disminuir, complementariamente en aras de no provocar una drástica reducción de la actividad fotosintética. Para ello, se puede complementar esta técnica de sombreo con sensores radiación, que permitirán determinar el momento adecuado de reemplazar el plástico encalado con base a la luminosidad, aun cuando se ha lavado o eliminado el exceso de cal (Robinson, 2011).

Francescangelly et al. (1992), consideran la aplicabilidad del encalado en relación a la dosificación y su influencia directa para la reducción en un porcentaje de radiación. Para ello se aplicaron 2 concentraciones de blanqueo: 95 y 34 g de cal hidratada por 5 L de agua. En la ejecución del experimento se registraron las temperaturas entre el invernadero testigo y los blanqueados, siendo esta diferencia de 2 a 3 °C, con la particularidad de tener las

ventanas totalmente abiertas que suponían el 18% de superficie respecto al suelo. El cultivo ensayado fue tomate, la reducción de la temperatura de la planta fue de 4.6°C para el invernadero con blanqueado denso y 3.3°C para el liviano; el proceso de blanqueo afectó en mayor medida a la temperatura del suelo desnudo con un descenso térmico de 8 o 9°C con el invernadero totalmente abierto, resultados que se consideran muy importantes durante las primeras fases del desarrollo del cultivo.

Bailey et al. (1993) estudiaron el microclima de un invernadero de rosas antes y después de blanquear. Con el blanqueo se produjo un descenso de luz del 62% al 31%, el DPV pasó de 6 a 4 kPa y un salto térmico alrededor de 7°C a 2°C, por último, se obtuvo un incremento promedio en la transpiración del 18%.

Mientras el encalado no logra una optimización por si solo del clima en cultivos de zonas cálidas, es su relativa efectividad y economía la que hace popular esta técnica (Montero et al., 2014).

#### 2.6.1.2. Malla de sombreo

La aplicación de mallas de sombreo constituye un sistema estático al igual que el encalado, que son usadas durante los meses más cálidos del año, mostrando gran efectividad y reemplazando la cubierta por las mallas. La estructura que resulta luego es conocida como umbráculo. La malla de sombreo disminuye la radiación solar incidente y reduce considerable los efectos del viento, que se considera como una variable de perturbación (Montero et al., 2014).

Dado que la reducción de luz es permanente y la protección al frío se considera nula, el método se restringe a regiones en las que la insolación es extrema en verano y la temperatura nocturna no es demasiada baja. Otra restricción radica en cultivos que no toleran ciertos límites de radiación como consecuencia de sus bajos puntos de saturación lumínica.

Muchas de las mallas de sombreo suelen ser de polietileno, sin embargo, existen mallas de polipropileno, poliéster o derivados acrílicos. La gama de mallas con distinto porcentaje de reflexión, transmisión y porosidad al aire resulta ser amplia dados los diferentes materiales con las que son fabricadas y sus propiedades particulares (Montero et al., 2014).

La desventaja principal que representan las mallas de sombreo es la baja selectividad que poseen, debido a que disminuyen tanto la transmisión de radiación fotoactiva como la del infrarrojo corto.

Un factor importante en la elección de mallas es el grado de sombreo, de tal forma que la radiación transmitida esté próxima al punto de saturación lumínica del cultivo. Por lo tanto, se considera imprescindible el conocimiento de la curva de saturación radiativa del cultivo, así como el régimen térmico del invernadero, ya que la respuesta fotosintética varía con la temperatura (Montero et al., 2014).

Se recomienda la instalación de las mallas de sombreo en el exterior del invernadero, aunque tal disposición limite su vida útil al igual que dificulte su instalación. Sin embargo, esta disposición es más eficaz en la reducción de temperatura. La cara externa de la malla absorbe radiación solar que es convertida en calor dentro del invernadero, por esta razón el sombreo debe ser asistido por ventilación. Externamente la malla se calienta con radiación y se refrigera con el aire, de aquí se debe tener en cuenta que el sombreo y la ventilación tienen que ir asociados (Montero et al., 2014).

El color de la malla es un aspecto importante con respecto a la vida útil, siendo la de color negro la de mayor duración, pero no la mejor desde el punto de vista climático. A

continuación, se presenta la tabla 2 con valores de temperatura bajo invernaderos con mallas aluminizadas, negras y blancas con la misma transmisión (40%) donde las condiciones exteriores fueron las siguientes: Ta: 25.3°C; HR: 71%, Rad. Solar global: 891 Wm<sup>-2</sup> (Montero et al., 2014).

**Tabla 2.** Temperatura bajo distintos tipos de mallas (Montero et al., 2014).

<b>RENOVACIONES</b>		
	10	40
<b>TIPO DE MALLA</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	
<b>ALUMINIZADA</b>	30.4	26.8
<b>BLANCA</b>	32.1	27.5
<b>NEGRA</b>	36.3	29.0
<b>SIN MALLA</b>	35.8	28.4

En cuanto a la reflexión de radiación, la malla aluminizada refleja el 55%, la negra el 10% y por último la blanca el 40%, consecuentemente las absorciones de luz corresponden a 5%, 50% y 20% respectivamente.

Finalmente es preciso tener en cuenta los siguientes aspectos respecto al uso de las mallas de sombreo:

- ✓ La proporción de sombreo mencionados en catálogos comerciales, en raras ocasiones concuerda con las determinaciones de laboratorio.
- ✓ Todos los materiales son menos transparentes a la radiación difusa que a la radiación solar directa.
- ✓ No existe relación entre el color de la pantalla y el porcentaje de sombreo, pues el ojo humano no es un buen medidor de las propiedades ópticas de las mallas.

La producción agrícola hoy en día demanda de nuevas alternativas y estrategias agrícolas dado que el crecimiento poblacional a nivel mundial, según la FAO (2009), la población se incrementará hasta 9.1 billones para el 2050, esperando un aumento del 70% en la demanda de alimentos. Con el fin de lograr sistemas de producción agrícola eficientes, las coberturas de plásticos para invernaderos permiten el control de la temperatura, la humedad y de otros factores relacionados con el crecimiento de los cultivos. De acuerdo con FAO (2013), el área de invernaderos de plástico para el cultivo de hortalizas ha aumentado en todo el mundo. Dentro de los factores claves para una producción rentable se encuentra la selección del lugar, el cual juega un papel importante dentro de los costos de producción, rendimiento de la producción y costos de transporte (Nelson, 1985; Castilla, 2007). Es importante mencionar que el costo y la calidad de producción están netamente relacionados con las condiciones climáticas del lugar, siendo así dependientes del clima y las condiciones de controladas dentro del invernadero (FAO, 2013). Por otro lado, tenemos el uso de mallas de sombreo idóneo para temperaturas en latitudes medias. El efecto invernadero es mínimo debido que la luz del sol se reduce siendo menor que en las películas convencionales de plástico (FAO, 2013). El efecto invernadero mínimo varía según los intercambios de aire con el ambiente exterior y la transmisión de la luz solar (FAO, 2013). Los plásticos en el ámbito agrícola por su parte han sufrido cambios que se ven reflejados en los efectos que produce la radiación solar en el material de cubierta referente a las plantas que protege.

## 2.7. Cubiertas fotovoltaicas

La necesidad de reducir la radiación que llega al interior del invernadero mediante técnicas de sombreado selectivo que reduzcan las altas temperaturas que se alcanzan en su interior en épocas de alta radiación plantea el reto de aprovechar dicho exceso de radiación de forma productiva. Las cubiertas de los invernaderos suponen una excelente oportunidad para disponer los colectores fotovoltaicos favoreciendo el sombreado necesario al cultivo y produciendo energía eléctrica al mismo tiempo. Esta práctica está en línea con el nuevo concepto de Producción Agrivoltaica que propugna simultanear la producción agrícola y de electricidad como medio para mejorar la rentabilidad del agricultor y práctica una agricultura limpia, sin emisiones de gases de efecto invernadero y respetuosa con el medio ambiente. En los últimos años la tecnología de los captadores solares ha evolucionado considerablemente y existen múltiples soluciones técnicas disponibles (placas rígidas y flexibles, opacas o translúcidas) para diseñar un invernadero solar (Pérez y Sánchez, 2012). Estudios experimentales han demostrado que porcentajes de sombreado parcial de la cubierta no tienen una influencia importante en el rendimiento del cultivo (Callejón-Ferre et al., 2009; López et al., 2008) y han investigado el tipo de módulos fotovoltaicos y su disposición más adecuada en la cubierta del invernadero (Pérez-Alonso et al., 2012).

## 2.8. Gestión de la energía fotovoltaica para el riego

El aprovechamiento de la energía solar mediante captadores fotovoltaicos, bien sea dispuestos sobre la cubierta del invernadero o bien mediante una planta fotovoltaica independiente, es uno de los elementos claves para un desarrollo sostenible de la agricultura intensiva en el Ecuador. El uso de energías limpias permite desarrollar una agricultura sostenible que no solo es capaz de reducir el impacto sobre el cambio climático, sino que, al mismo tiempo, resulta económicamente rentable, especialmente en aquellas explotaciones alejadas de las infraestructuras de distribución eléctrica. En estos casos en los que las explotaciones no están conectadas a la red eléctrica, el sistema fotovoltaico debe funcionar de forma autónoma y ser suficiente para aportar la energía necesaria, ya que no se puede apoyar en la red eléctrica. Consecuentemente, no se pueden emplear modelos de gestión basados en balance neto (net-metering) en los que la energía producida puede almacenarse en la red en los momentos de exceso de producción y extraerse de ella cuando exista un déficit de producción fotovoltaica. Otra alternativa es utilizar baterías o acumuladores eléctricos para almacenar la energía. No obstante, estos sistemas son caros y contaminantes por lo que es conveniente eliminarlos por completo o, al menos, reducir su capacidad. La mejor manera es intentar consumir la energía justo en el momento en el que ésta se produce. En climas cálidos, la principal demanda energética de la explotación agrícola es producida por el riego de los cultivos (López-Luque et al. 2017), ya que no se suelen emplear sistemas de calefacción interior del invernadero. Si existen picos de calor excesivo, podría ser interesante utilizar sistemas de refrigeración activa, pero esta práctica no suele ser habitual en la mayor parte de casos.

Las ventajas de utilizar la energía fotovoltaica en el riego es que el consumo de agua de los cultivos aumenta con la radiación recibida, por tanto, existe una cierta sincronía entre la producción de energía fotovoltaica y las necesidades energéticas de la explotación para riego. El aprovechamiento de la energía eléctrica para el riego de cultivos intensivos cuando se utilizan instalaciones autónomas sin almacenamiento de energía requiere el desarrollo de estrategias de gestión que permitan simultanear eficientemente la oferta y la demanda de energía. Se han planteado diferentes estrategias para conseguir dicha simultaneidad. Entre

ellas cabe destacar la utilización de emisores no autocompensantes que varía su caudal en respuesta a la presión adaptándose de esta manera a la potencia disponible, el aumento del tiempo de riego de la explotación aumentando el número de sectores de riego de ésta y el riego de 1 o más de un sector de forma simultánea para aprovechar eficientemente la energía disponible (Reca et al., 2016). En esta tesis, se pretende optimizar el manejo de sistemas de riego fotovoltaicos autónomos con bombeo directo y sin almacenamiento de energía desarrollando un modelo que permita optimizar el manejo del riego simultáneo de múltiples sectores de riego heterogéneos. Este modelo de sistemas puede extrapolarse directamente a las condiciones de los sistemas de cultivos intensivos en Ecuador para optimizar el uso de la energía solar para el riego de la explotación.

## CAPÍTULO 3

### INTERÉS Y OBJETIVOS





### 3. CAPÍTULO 3. INTERÉS Y OBJETIVOS

#### 3.1. Interés

El clima tropical húmedo se caracteriza por presentar un periodo de alta pluviometría con una duración de 3-4 meses, que imposibilita el desarrollo de cultivos hortícolas al aire libre con producciones competitivas. Por ello se hace necesario el desarrollo de protecciones de cultivo (invernaderos), además, el empleo de mallas de protección frente a plagas puede permitir el desarrollo de cultivos con menor presión de pesticidas.

La radiación solar es una variable que afecta de forma decisiva al desarrollo de los cultivos, especialmente de los sistemas de cultivo bajo invernadero. Por un lado, la radiación es necesaria para la actividad productiva de las plantas, pero por otro, el exceso de radiación puede generar serios inconvenientes. Por ejemplo, la gran problemática que se presenta para los cultivos de invernadero de la zona de la costa de Ecuador son las elevadas temperaturas que se generan en el interior de las instalaciones, que conllevan un estrés térmico de los cultivos y como consecuencia sus bajos rendimientos. Estas altas temperaturas se producen como consecuencia de la elevada radiación solar. Para evitar este inconveniente, es necesario, la utilización de diferentes métodos de sombreo, pero una disminución drástica de la radiación en su conjunto podría suponer altas pérdidas productivas asociadas a las bajas tasas de fotosíntesis. Por ello, es necesario, por un lado, una precisa modelación y cuantificación de la radiación solar incidente y, por otro, la adecuada caracterización y selección de los materiales de cubierta mejor adaptados a dichas condiciones, así como determinar el efecto de dichos materiales sobre el sombreo y la transmisión de radiación.

En relación con la caracterización de la radiación incidente, un aspecto importante a considerar y, que justifica el desarrollo de este trabajo, es que en las estaciones meteorológicas existentes en la zona se dispone de una gran serie histórica de datos de heliofanía o brillo solar, pero son muy pocas las que miden la irradiancia, lo que dificulta la posibilidad de realizar análisis sobre instalaciones y rendimientos potenciales de cultivos en las condiciones de la costa ecuatoriana. Por ello, se pretende calibrar modelos específicos que permitan estimar la irradiancia en función de la base de datos de heliofanía disponibles.

La caracterización del comportamiento de los materiales de cubierta del invernadero va a estar basada en la realización de ensayos de laboratorio para caracterizar la transmisividad del material para todo el espectro de radiación y el uso de modelos experimentales que permitan analizar el comportamiento térmico del modelo experimental con distintos tipos de material de cubierta.

Finalmente, esta Tesis se plantea como objetivo el aprovechamiento integral de la energía solar no sólo para optimizar el desarrollo del cultivo, sino también para satisfacer las necesidades energéticas de la explotación, concretamente para el riego de los cultivos que es la técnica de cultivo más exigente en energía. Para ello se plantea desarrollar un modelo que permita optimizar el aprovechamiento energético de la energía fotovoltaica producida para el riego de cultivos. Este modelo considerará la posibilidad de gestionar sistemas de riego complejos compuestos por múltiples sectores de riego heterogéneos y no requerirá ni estar conectado a la red ni disponer de sistemas de acumulación de energía ya que la energía producida es consumida de forma instantánea. El modelo se ha calibrado para un sistema de cultivo en la zona mediterránea se adapta perfectamente a las condiciones climáticas y de cultivos del Ecuador.



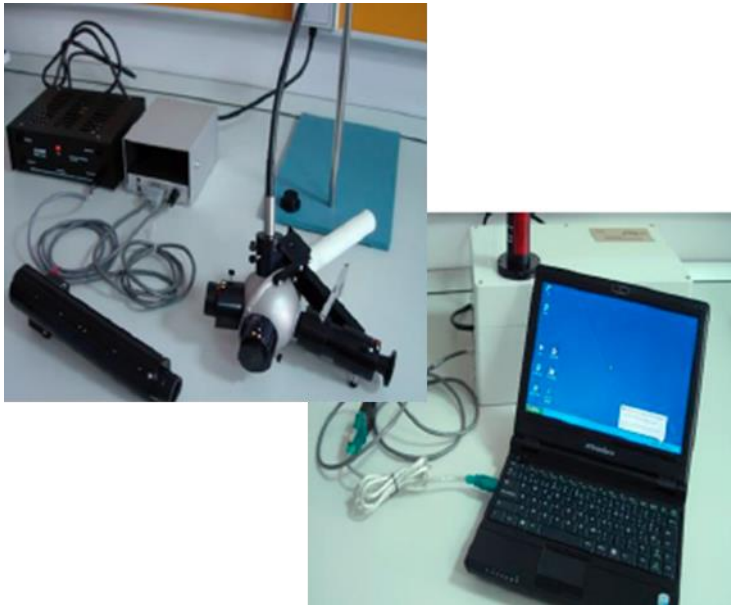
### 3.2. Objetivos

Como consecuencia de lo comentado, el objetivo general que se plantea en esta Tesis es contribuir al aprovechamiento integral de la energía solar para el desarrollo de la horticultura bajo invernadero de la costa de Ecuador. Para la consecución de este objetivo general, relativamente amplio, se ha delimitado los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Desarrollo y calibración de un modelo de estimación de la irradiancia a partir de las series históricas de datos de heliofanía disponibles para analizar las condiciones de radiación en la costa de Ecuador.
- ✓ Caracterización y comportamiento de los materiales de cubierta frente a la radiación y selección de los más apropiados mediante ensayos de espectrofotométricos de laboratorio y ensayos experimentales con modelos.
- ✓ Desarrollo de un modelo para optimizar el aprovechamiento de la energía solar para el riego directo de los cultivos en sistemas de riego fotovoltaico autónomos sin almacenamiento y con la posibilidad de riego simultáneo de varios sectores.

## CAPÍTULO 4

### MATERIAL Y MÉTODOS





## CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS

En los estudios climáticos previos para el establecimiento y diseño de invernaderos de protección en la costa de Ecuador se observa una carencia de datos de irradiancia, sin embargo, la mayoría de las estaciones climáticas ofrecen datos de heliofanía. Por lo tanto, se requiere de una herramienta que permita estimar la irradiancia a partir de la heliofanía calibrada para la región.

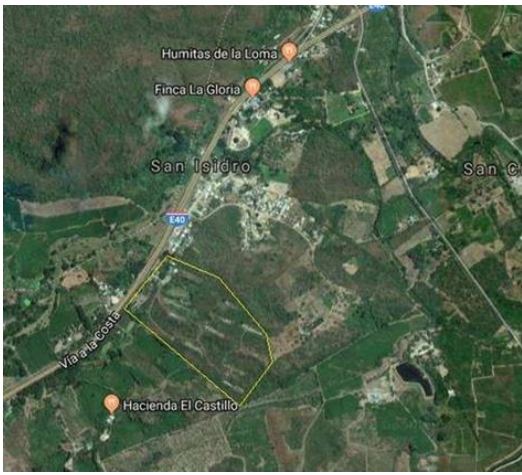
El primer trabajo se llevó a cabo con datos de la estación climática de La Teodomira (1° 09' S, 80° 23' W) situada en la provincia de Manabi (Ecuador) (fotografía 1), debido a tener en un periodo de 3 años de datos tanto de heliofanía como de irradiancia, lo que nos ha permitido poder calibrar el modelo de Angström-Page (Page, 1964) para la región. Los datos específicos del ensayo quedan recogidos en el capítulo 5.1. de este documento.



*Fotografía 1. Estación meteorológica La Teodomira.*

La protección de los cultivos del periodo de lluvias puede llevarse a cabo con invernaderos de protección, sin embargo, generan problemas de altas temperaturas en su interior que estresan los cultivos y por lo tanto redundan en bajos rendimientos. Por otra parte, existen en el mercado plásticos denominados “fríos”, que pueden disminuir los excesos térmicos generados. Con el objetivo de tener una primera aproximación del comportamiento de dichos plásticos en condiciones experimentales, se estableció un ensayo que se presenta en el segundo trabajo de esta tesis doctoral.

El segundo trabajo se llevó a cabo en la finca experimental de San Isidro (2° 10' S, 79° 74' W) de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil (Ecuador) (fotografía 2). Mediante este trabajo se trata de conocer mediante unidades experimentales las posibilidades del empleo de plásticos fríos en la Costa de Ecuador como una herramienta del diseño de los mismos (fotografía 3). Los datos específicos del ensayo quedan recogidos en el capítulo 5.2. de este documento.



**Fotografías 2 y 3.** Finca Experimental San Isidro de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y unidades experimentales.

Otra de las problemáticas a la que nos enfrentamos en la región de la costa de Ecuador es la falta de suministro eléctrico en muchas de las explotaciones. Por lo tanto, el uso de energía fotovoltaica, fundamentalmente para el manejo del riego es una herramienta clave para la tecnificación de estas explotaciones.

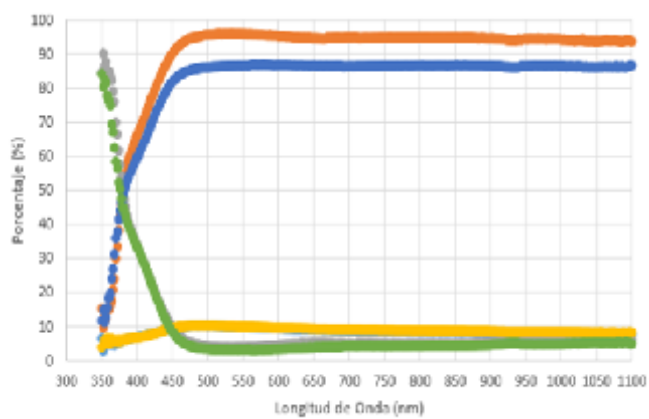
En este sentido se plantea el tercer trabajo que se presenta en esta tesis doctoral. De todos es conocido el uso de energía fotovoltaica para el bombeo de agua de riego (fotografía 4). Sin embargo, en el diseño de plantas fotovoltaicas para uso en riego, se suelen diseñar acumuladores, que suponen un encarecimiento de las mismas. En este trabajo se plantea la optimización del uso de la energía obtenida directamente de las placas fotovoltaicas, generando programas de riego que mediante el diseño de instalaciones mediante la sectorización y diseño del sistema permitan abastecer las necesidades de los cultivos implantados. Los datos específicos del ensayo quedan recogidos en el capítulo 5.3. de este documento.



**Fotografía 4.** Planta fotovoltaica acoplada a riego sectorizado.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN





## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y discusión se estructuran en 3 capítulos dedicados a:

- ✓ Capítulo 1. El conocimiento de la irradiancia solar a partir de datos históricos de heliofanía, con el objeto de poder utilizarlos en la tecnificación de la costa de Ecuador en el diseño de cubiertas plásticas para el desarrollo de una horticultura productiva bajo plástico. Que será presentado como comunicación al “International Symposium on Models for Plant Growth, Environments, Farm Management in Orchards and Protected Cultivation” que se celebrará en Almería en 2021.
- ✓ Capítulo 2. La evaluación del comportamiento óptico y climático de un filme frío para su uso como cobertura plástica de invernaderos en las condiciones experimentales de la costa de Ecuador. Que será presentado como comunicación al “International Symposium on Models for Plant Growth, Environments, Farm Management in Orchards and Protected Cultivation” que se celebrará en Almería en 2021.
- ✓ Capítulo 3. Asociado al ahorro energético y a la tecnificación del riego en explotaciones que no acceden a la red eléctrica, sin almacenamiento de la energía producida, se ha estudiado la gestión óptima de bombeo directo autónomo multisectorial del sistema de riego fotovoltaico. Este trabajo tiene especial aplicación en países en desarrollo, que necesitan la tecnificación de sus explotaciones para incrementar su productividad. Este trabajo ha sido publicado en la revista Applied Energy (2020)





Estimación de la irradiancia solar a partir de la heliofanía, como herramienta a utilizar en la tecnificación agrícola de la región costera de Ecuador.





## 5.1. Estimation of solar irradiance from heliophany as a tool to use in the agricultural technification of the coastal region of Ecuador

V. Zavala<sup>1</sup>, A. Llanderal<sup>1</sup>, P. García-Caparros<sup>2</sup>, J. Franco<sup>1</sup>, R. López-Luque<sup>3</sup>, M.T. Lao<sup>2</sup> and J. Reca<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Catholic University Santiago of Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, <sup>2</sup>University of Almeria, CIAIMBITAL, Agrifood Campus of International Excellence ceiA3. Almería, Spain, <sup>3</sup>University of Cordoba, Cordoba, Spain.

### **Abstract**

**The accurate determination of solar radiation received by plants is essential to discern its effect in a great variety of scientific studies. Sunshine is the only data about radiation in most meteorological stations in Ecuador. For that, it needs to use models that allow to estimate global radiation from sunshine. In this work, the Angström-Page model has been used to determine the fitness of the correlation between the data of daily sunshine and the global radiation relate to the data recorded in one representative meteorological station in the region “Costa” of Ecuador. Characterization of this area was made by a ten years data of different climatic parameters. The average values (four years) of the coefficients  $a$  and  $b$  determined by the Angström-Page model were the following: annual (0.2848 and 0.4895), wet season (0.2826 and 0.4904) and dry season (0.2803 and 0.4914). Considering the lower values of the coefficients of variation reported in our experiment, it can be highlighted that irradiance could be estimated by the model Angström-Page from annual sunshine with precision because  $R^2$  was around of 0.8. This estimation could be used as useful tool in agricultural studies in the coastal region of Ecuador.**

**Keywords:** empirical models, meteorological stations, sunshine, tropical conditions

### **INTRODUCTION**

The agricultural sector in Ecuador accounts nearly to 9% of gross domestic product (GDP). This sector is based on permanent, transient, and fallow crops, as well as natural and cultivated pastures, representing a surface of 5,279,613 ha. The most significant permanent crops (sugarcane, banana and African palm) representing nearly to the 26.2% of the total agricultural surface (ESPAC, 2018).

The region of Ecuador is ubicated in the northwestern coast of South America and is characterized by a high level of radiation, approximately  $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (Salcedo et al., 2017). As far as climatic conditions is concerned, it is necessary to mention that there is a huge diversity of tropical climate types in the region of Ecuador, but they are mainly characterized by average temperatures higher than  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  and plenty rainfall ( $1200 \text{ L m}^{-2}$ ) especially in the winter season, since the summer season is dry (Pourrut, 1983; Salcedo et al., 2015).

Nowadays, in the region of Ecuador, there are 1,252 climatic stations distributed in 7 subregions under the supervision of the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAHMI, 2019). Nevertheless, the mostly of these climatic stations only have devices for the registration of the daily sunshine without auxiliary devices to estimate the global solar radiation.

The accurate calculation of the amount of solar radiation reached in one area and its respective variations due to the correlations with other meteorological parameters are crucial for the performance of a wide range of scientific studies (Srivastava and Pandey, 2013). For instance, climatic studies (Trenberth et al., 2015), thermal design of environmental control of buildings (Agboola, 2011), energetic balance studies in greenhouses (Mobtaker et al., 2016),

crops irrigation requirements (Valipour, 2015) as well as the use of this photovoltaic energy in rural areas (Zavala et al., 2019).

Reviewing in previous literature, there are several empirical models for the calculation of the global solar radiation through the recording of different parameters. These empirical models can be categorized into three different groups: a) sunshine-based models, b) cloud-based models, and c) meteorological data-based models (Menges et al., 2006; Yang et al., 2006). The Angström model and the respective modifications are sunshine-based models widely applied to estimate the global solar radiation (Almorox et al., 2008).

Therefore, the main aim of this work is to evaluate the goodness of the correlation between the data of sunshine duration in a day and the global solar radiation recorded in one weather station in the region “Costa” of Ecuador using the Angström model with the modifications reported by Page in 1964.

---

<sup>a</sup> E-mail: mtlao@ual.es

## MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out in a meteorological station called “Teodomira” (1° 09’ S, 80° 23’ W) at 60 m a.s.l. located in Manabi (region “Costa” of Ecuador). The meteorological data were recorded from 2009 to 2019. Meteorological parameters and sensors used were the following: daily sunshine (Campbell-Stokes model 240-1070-L, NovaLynx), temperature and relative humidity (sensors model HMP155-Humicap, Vaisala), wind speed (ultrasonic anemometer model Young 85000, Young company) and total precipitation (pluviometer model TR-525M, Texas Electronics). Also, global radiation data were recorded from 2014 to 2017 using a pyranometer model SR-11, Hukseflux.

### Climatic characterization

Values of absolute maximum, average of maximum, average, average of minimum and absolute minimum of the meteorological parameters were estimated considering the 2009-2019 period.

### Global radiation estimation

The original Angstrom-type regression equation was used to correlate monthly average daily radiation to clear day radiation in each location and average fraction of possible sunshine hours. In our study, we used the Angstrom-type regression but with slight modifications established by Page (1964) according to the following equation:

$$H/H_0 = a + b n/N \quad (\text{Eq. 1})$$

where  $H$  = monthly average daily global radiation,  $H_0$  is the monthly average daily extraterrestrial radiation,  $n$  = actual sunshine duration in a day obtained by heliograph ubicated in the weather station (expressed in hours),  $N$  = monthly average maximum possible bright sunshine duration in a day (expressed in hours), and  $a$  and  $b$  = empirical coefficients. These coefficients are location specific coefficients referred to as fractions of extraterrestrial radiation on overcast days and on average days, respectively.

To estimate  $a$  and  $b$ , the values of  $H$  were recorded using a radiometer ubicated in the weather station.

The daily calculation of  $H_0$  (expressed in  $J\ m^{-2}\ day^{-1}$ ) was computed using the following equation:

$$H_0 = S_0 \cdot 3600 \cdot (\sin(90 - \phi + \delta)) \cdot (2Nd/\pi) \quad (\text{Eq. 2})$$

where  $S_0$ = maximum possible daily sunshine duration,  $\phi$ = latitude,  $\delta$ = solar declination and  $Nd$ = daily average maximum possible bright sunshine duration.

The calculation of  $S_0$  (expressed in  $W\ m^{-2}$ ) was carried out using the following equation:

$$S_0 = 1367 (D/d)^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

where  $D$ = average distance earth-sun,  $d$ = average distance earth-sun for a concise date.

Finally, the estimation of  $d$  was assessed through the following equation:

$$d = 1.496 * 10^{13} * [1 - 0.017 * \sin(0.9856 J)] \quad (\text{Eq. 4})$$

where  $J$ = number of the day of the year starting from the 22 of March.

Each year was assessed annually and as well considering the different established seasons (dry and wet) separately.

The correlations were obtained using MS Excel and Statgraphic Plus for Windows (version 5.1.). Maximum, minimum and average values and the coefficients of variation of the periods studied were also estimated.

## RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the climatic parameters recorded during the last ten years classified by months in the weather station of "Teodomira". With respect to the sunshine duration, it is necessary to mention that the average values ranged from 77.34 (January) to 125.09 (May) hours, with the minimum and the maximum absolutes of 46.30 and 199.00 hours, respectively in the month of January. In the case of temperature determinations, the ranges of the average values recorded during the experimental period were from 25.02°C (November) to 28.63°C (April), showing the minimum and the maximum absolute of 9°C and 38°C; respectively in the month of September. This climate could be classified as megathermic from a thermic point of view considering the classification established by Pourrut (1983). During the experimental period, the average relative humidity ranged from 74.64 % (November) to 83.73% (February) with the minimum and the maximum absolutes of 19% (February) to 100% (January), respectively. The wind speed showed average values ranging from 0.48  $m\ s^{-1}$  (June) to 2.54  $m\ s^{-1}$  (February), showing the highest values 6.00  $m\ s^{-1}$  in April. Finally, the average precipitation during the experimental period varied considerably between months being the period from December to May which showed a high amount of rainfall, ranging around 150  $L\ m^{-2}$ . The annual amount of rainfall ranged around 800  $L\ m^{-2}$  and considering the classification established by Pourrut (1983), it can be pointed out that our experimental area can be classified as dry-semiwet. Finally, it is necessary to mention that the climatic data recorded in our experiment were similar with the ranges reported by Hurtado-Pindal et al. (2018) for the Ecuatorian coast zone.

Table 1. Climatic characterization from meteorological parameters recorded from 2009 to 2019 in the weather station “Teodomira”.

		Year											
		Wet season						Dry season					
Climatic parameter		January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
<b>Sunshine duration (hours) (n)</b>	<b>Max Abs.<sup>1</sup></b>	199.00	122.70	178.00	152.00	182.00	121.00	132.60	145.30	161.00	149.00	163.00	130.40
	<b>Max. Av.<sup>2</sup></b>	122.35	102.65	155.36	135.36	157.24	88.75	100.36	127.63	135.62	131.25	133.54	112.36
	<b>Average<sup>3</sup></b>	77.34	86.86	122.55	124.41	125.09	88.75	89.36	118.83	124.83	122.31	113.08	93.34
	<b>Min. Abs.<sup>4</sup></b>	46.30	59.50	96.20	61.20	85.00	65.90	51.30	95.00	84.00	86.00	74.00	39.90
	<b>Min Av.<sup>5</sup></b>	58.36	68.25	111.25	92.35	102.66	73.24	65.24	107.36	105.66	107.36	95.36	72.36
<b>Temperature (°C)</b>	<b>Max Abs.<sup>1</sup></b>	35.60	35.00	35.00	35.00	35.00	34.20	35.00	35.50	38.00	35.20	36.00	36.00
	<b>Max. Av.<sup>2</sup></b>	33.80	33.73	34.05	33.51	33.19	33.56	33.50	34.10	34.96	34.64	34.43	34.59
	<b>Average<sup>3</sup></b>	26.42	26.37	26.54	28.63	25.81	25.07	25.55	25.17	25.35	25.20	25.02	26.26
	<b>Min. Abs.<sup>4</sup></b>	19.00	19.60	19.80	17.00	6.30	17.20	17.40	17.50	9.00	18.00	17.00	18.80
	<b>Min Av.<sup>5</sup></b>	20.38	21.04	21.52	21.72	19.35	18.80	19.48	18.68	17.85	19.18	18.65	19.45
<b>HR (%)</b>	<b>Max Abs.<sup>1</sup></b>	100.00	99.00	98.00	99.00	98.00	99.00	99.00	100.00	98.00	98.00	98.00	98.00
	<b>Max. Av.<sup>2</sup></b>	98.00	97.91	95.36	96.27	97.55	97.45	97.73	96.73	96.55	95.82	95.09	96.09

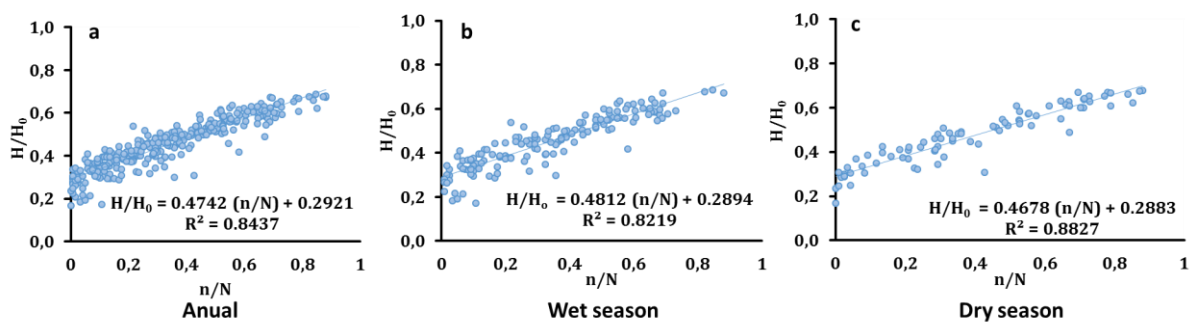
	<b>Average<sup>3</sup></b>	79.73	83.73	82.45	82.91	82.82	80.18	81.36	78.18	76.45	75.82	74.64	77.82
	<b>Min. Abs.<sup>4</sup></b>	46.00	19.00	40.00	27.00	45.00	47.00	49.00	43.00	40.00	39.00	40.00	42.00
	<b>Min Av.<sup>5</sup></b>	55.00	51.00	53.18	59.36	54.91	53.09	55.55	49.82	47.00	46.18	45.55	47.73
<b>Wind speed (m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Max Abs.<sup>1</sup></b>	1.40	2.90	1.50	6.00	2.50	1.70	1.60	1.80	1.10	1.90	1.10	1.00
	<b>Max. Av.<sup>2</sup></b>	1.25	2.84	1.28	4.50	2.01	1.55	1.32	1.45	1.00	1.48	1.05	0.91
	<b>Average<sup>3</sup></b>	0.79	2.54	0.77	1.45	0.63	0.48	1.14	0.52	0.90	1.03	1.02	0.83
	<b>Min. Abs.<sup>4</sup></b>	0.40	1.20	0.30	0.50	0.10	0.20	1.00	0.30	0.70	0.80	0.70	0.60
	<b>Min Av.<sup>5</sup></b>	0.53	0.98	0.41	0.56	0.19	0.31	1.09	0.39	0.82	0.91	0.85	0.71
<b>Total monthly precipitation (L m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Max Abs.<sup>1</sup></b>	237.00	284.80	256.00	270.20	101.00	148.40	56.50	7.20	2.60	14.40	7.20	207.00
	<b>Max. Av.<sup>2</sup></b>	205.36	235.20	201.65	207.36	78.95	75.68	41.36	5.30	1.41	7.52	4.36	105.64
	<b>Average<sup>3</sup></b>	136.13	182.65	183.48	146.87	59.24	14.97	13.82	1.27	0.80	2.86	0.78	51.39
	<b>Min. Abs.<sup>4</sup></b>	45.40	67.60	79.00	31.10	25.30	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60
	<b>Min Av.<sup>5</sup></b>	55.60	84.30	100.63	74.60	33.65	4.64	5.63	0.62	0.45	1.03	0.39	3.01

<sup>1</sup>Maximum absolute; <sup>2</sup>Average maximum, <sup>3</sup>Average, <sup>4</sup>Minimum absolute, <sup>5</sup>Average minimum



Although the climatic parameters were registered during the last ten years, only we get data of global radiation from 2014 to 2017. We have been able to be correlated for these years. Figure 1 shows the high and positive correlation between the ratios  $H/H_0$  and  $n/N$  considering annual, seasonal data in 2016. The estimation referred of the years studied are presented in table 2.

Our data showed high values of  $R^2$  what allow to consider this model adequate to estimation of global radiation from heliophany. On the other hand, the similarity between the values estimated ( $a$  and  $b$ ) for annual and seasonal periods, what allow to use the sole annuals coefficients. Although, usually the  $b$  coefficient is very sensitive to cloud cover percentage (Almorox et al., 2005), in our work related with the calibration for wet and dry seasons, not consistent differences have been found. The lower coefficient of variation (CV) between years (1.98% and 2.31%) for  $a$  and  $b$  respectively, assessed the goodness of the model estimations. In this experiment, the average values of  $a$  and  $b$  were 0.29 and 0.49; respectively. These values are consistent with values reported by FAO (0.25 and 0.50 for  $a$  and  $b$ , respectively) (Allen et al., 1998).



**Figure 1.** Correlation between  $H/H_0$  and  $n/N$  in 2016 (a= including wet and dry season data, b) wet season data and c) dry season data)

Comparing the results of calibration of the model Angström-Page obtained in our experiment with the data recorded in other studies carried out in Ecuador, there are similarities since Arla-Odio et al. (2017) registered the values of the coefficients ( $a$  and  $b$ ) through the model of Angström-Prescott in two regions of Ecuador: “Sierra” and “Costa”. The values of  $a$  and  $b$  recorded in Sierra region were the following: 0.25 and 0.45 whereas in Costa region were the following: 0.28 and 0.54; respectively. If our results are compared with the data recorded in other tropical regions, it can be highlighted that there were differences between the values assessed. For instance, Almorox et al. (2008) estimated the values of  $a$  and  $b$  in the model of Angström-Prescott for the global solar radiation in different weather stations in Venezuela. They reported that the mean value of  $a$  is 0.26 and the mean value of  $b$  is 0.34. On the same hand, Guzman et al. (2013) recorded the coefficients of  $a$ ,  $b$  and the values of  $R^2$  using the model of Angström-Prescott for the global solar radiation in the Colombian coffee zone in 15 climatic stations. The values of the coefficients in the different weather stations ranged for  $a$  (0.19 to 0.31),  $b$  (0.40 to 0.60) and  $R^2$  (0.72 to 0.97); respectively.

These differences were more accentuated when our values were compared with the data reported in other countries around the world. For instance, in Nigeria where there are several reports about the calculation of the coefficients  $a$  and  $b$ ; respectively, using the Angström model. In this sense, Arinze and Obi (1983) reported values of  $a= 0.23$  and  $b= 0.74$  in Northern Nigeria. Later, Burari et al. (2001) determined the coefficients of  $a$  and  $b$  in Bauchi (ubicated in the northern of Nigeria) reporting values of 0.24 and 0.46, respectively. On the same hand, years later, Gana and Akpootu (2013) carried out a study for the determination of these coefficients in north-eastern Nigeria estimating the value of  $a= 0.36$ ,  $b= 0.40$  and  $R^2= 0.99$ . On the same line, in India, Srivastava and Pandey (2013) recorded the coefficients of  $a$ ,  $b$  and the values of  $R^2$  of seven weather stations where these values ranged for  $a$  (0.05 to 0.34),  $b$  (0.33 to 0.64) and  $R^2$  (0.52 to 0.96), respectively. Finally, it is necessary to mention that the differences in the values of  $a$ ,  $b$  and

$R^2$  in different regions or even in the same area can be justified by the changes in latitude, altitude and other meteorological factors involved in the models studied as reported by Rahimi et al. (2012). These constants can assume a wide range of values depending on the location considered. Variations in  $a$  and  $b$  values were explained as a consequence of local and seasonal changes in the type and thickness of the clouds, effects of snow-covered surfaces, concentration of pollutants (Almorox et al., 2005).

Table 2. Determination of coefficients (*a* and *b*) and the value of the coefficient of determination ( $R^2$ ) during the annual period, wet and dry seasons in the period from 2014 to 2017.

	Annual period			Wet season			Dry season		
Year	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2$
2017	0.2815	0.4889	0.73	0.2883	0.4875	0.81	0.2790	0.4915	0.70
2016	0.2921	0.4742	0.84	0.2894	0.4812	0.82	0.2883	0.4678	0.88
2015	0.2794	0.5005	0.84	0.2757	0.5065	0.89	0.2757	0.5065	0.89
2014	0.2862	0.4946	0.87	0.2783	0.4998	0.87	0.2783	0.4998	0.87
<b>Average</b>	<b>0.2848</b>	<b>0.4895</b>		<b>0.2826</b>	<b>0.4904</b>		<b>0.2803</b>	<b>0.4914</b>	
<b>Maximum</b>	0.2921	0.5005		0.2883	0.5065		0.2882	0.5065	
<b>Minimum</b>	0.2794	0.4742		0.2757	0.4677		0.2757	0.4677	
<b>CV<sup>1</sup></b>	<b>1.98%</b>	<b>2.31%</b>		<b>2.34%</b>	<b>3.47%</b>		<b>1.96%</b>	<b>3.44%</b>	

<sup>1</sup>CV: Coefficient of variation.

## CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from this work:

- The values  $a$  and  $b$  are in the acceptable ranges.
- The calculation of the coefficients  $a$  and  $b$  and the value of  $R^2$  were similar during all the experimental period and also in both seasons (dry and wet).
- Our results indicate that the regression proposed in this paper may be used satisfactorily for the estimation of global radiation in the coastal region of Ecuador.

## Literature cited

Agboola, O.P. (2011). Importance of climate to architectural designs in Nigeria. *J. Environ. Issues Agric. Devel. Countries* 3, 15-28.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Rome.

Almorox, J., Benito, M., and Hontoria, C. (2005). Estimation of monthly Angström–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, 30(6), 931-936.

Almorox, J., Benito, M., and Hontoria, C. (2008). Estimation of global solar radiation in Venezuela. *Interciencia* 33, 280-283.

Arinze, E.A., and Obi, S.E. (1983). Solar energy availability and prediction in Northern Nigeria. *Nig. J. Solar Energy* 3, 3-10.

Arla-Odio, S., Tapia-Zurita, M., Guasumba-Codena, J., Martínez, J., Asitimbay, J., and Tapia-Zurita, E. (2017). Validación del recurso solar en el Ecuador para aplicaciones de media y alta temperatura. *INNOVA Res. J.* 7, 34-45.

Burari, F.W., Sambo, A.S., and Mshelia, E.D. (2001). Estimation of global solar radiation in Bauchi. *Nig. J. Renewable Energy* 9, 34-36.

Encuesta de Superficie y Producción Agraria. Instituto Nacional de Estadística y Censos (ESPAC). (2018). [www.ecuadorencifras.gob.ec](http://www.ecuadorencifras.gob.ec).

Gana, N.N., and Akpootu, D.O. (2013). Angstrom type empirical correlation for estimating global solar radiation in north-eastern Nigeria. *Int. J. Eng. Sci.* 2, 58-78.

Guzman, M.O., Baldion, R.J.V., Simbaqueva, F.O., Zapata, H.J., and Chacon, C.C. (2013). Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé* 64, 60-76.

Hurtado-Pindal, J.R., Fabian Espitia, E.S., Suntaxi-Aluisa, F. (2018). Climatic characterization of Ecuadorian littoral zone. In EGU General Assembly Conference Abstracts 20, 11513.

Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología de Ecuador (INAHMI). (2019). [www.serviciometeorologico.gob.ec](http://www.serviciometeorologico.gob.ec).

Menges, H.O., Ertekin, C., and Sonmete, M.H. (2006). Evaluation of global solar radiation models for Konya, Turkey. *Energy Conv. Manag.* 47, 3149-3173.

Mobtaker, H.G., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S.F., and Matloobi, M. (2016). Solar energy conservation in greenhouse: Thermal analysis and experimental validation. *Ren. Ener.* 96, 509-519.

Page, J.K. (1964). Estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitude 40° N – 40° S. *Proc. U.N. Conf. New Sources Ener.* 4, 378.

Pourrut, P. (1983). Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. CEDIG Documentos de Investigación 4, 8-40.

- Rahimi, I., Bakhtiari, B., Qaderi, K., and Aghababaie, M. (2012). Calibration of Angstrom equation for estimating solar radiation using meta-heuristic harmony search algorithm (case study: Mashhad-East of Iran). *Ener. Proc.* *18*, 644-651.
- Salcedo, G.A., Pérez-Saiz, M., Reca-Cardena, J., Barbero-Francisco, F.J., and Lao, M.T. (2015). Climate characterization under protection facilities in the American intertropical region. *Acta Hortic.* *1170*, 1077-1084.
- Salcedo, G.A., Reca, J., Pérez-Sáiz, M., and Lao, M.T. (2017). Irrigation water consumption modelling of a soilless cucumber crop under specific greenhouse conditions in a humid tropical climate. *Ciência Rural*, *47*, e20151538.
- Srivastava, R.C., and Pandey, H. (2013). Estimating Angstrom-Prescott coefficients for India and developing a correlation between sunshine hours and global solar radiation for India. *ISRN Ren. Ener.* doi.org/10.1155/2013/403742.
- Trenberth, K.E., Zhang, Y., Fasullo, J.T., and Taguchi, S. (2015). Climate variability and relationships between top-of-atmosphere radiation and temperatures on Earth. *J. Geophys Res.: Atmospheres* *120*, 3642-3659.
- Valipour, M. (2015). Study of different climatic conditions to assess the role of solar radiation in reference crop evapotranspiration equations. *Arch. Agron. Soil Sci.* *61*, 679-694.
- Yang, K., Koike, T., and Ye, B. (2006). Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Agric. For. Meteorol.* *137*, 43-55.
- Zavala, V., López-Luque, R., Reca, J., Martínez, J., and Lao, M.T. (2019). Optimal management of a multisector standalone direct pumping photovoltaic irrigation system. *Applied Energy* (In press).

Evaluación óptica y climática de un invernadero de cubierta de plástico frío en la región costera de Ecuador.





## 5.2. Optical and climatic evaluation of a cool film cover greenhouse in the coastal region of Ecuador

V. Zavala<sup>1</sup>, A. Llanderal<sup>1</sup>, P. García Caparros<sup>2</sup>, J. Barbero<sup>2</sup>, J. Franco<sup>1</sup>, R. López-Luque<sup>3</sup>, J. Reca<sup>2</sup> and M.T. Lao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Catholic University Santiago of Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, <sup>2</sup>University of Almeria, CIAIMBITAL, Agrifood Campus of International Excellence ceiA3. Almería, Spain, <sup>3</sup>University of Cordoba, Cordoba, Spain.

### *Abstract*

The knowledge about optical and climatic characteristics of films used in greenhouse can involve an improvement in plant growth and yield under tropical conditions. In this work, we evaluated two types of cover films (cool and standard films) installed in experimental units, using the optical and climatic data recorded inside and outside. The optical analysis of the two cover films was carried out with a spectroradiometer. The climatic conditions inside and in the outside of the experimental units were assessed through different data loggers. The results obtained reported a decrease of transmittance and absorbance in the cool film respect to the standard film, being necessary to point out especially, the reduction of the transmittance of NIR and PAR regions related to the heating of the greenhouse and photosynthesis capacity; respectively. As far as climatic indoor characterization was concerned, the use of a standard film had a higher value of PAR, temperature and relative humidity compared to the cool film. Although the use of cool-film resulted in PAR decrease, it is necessary to highlight the importance of these films especially in terms of temperature and relative humidity decrease in the coastal region of Ecuador for an adequate plant growth.

**Keywords:** absorbance, reflectance, transmittance, tropical conditions

### INTRODUCTION

The main climate characteristics of Ecuador are the high level of radiation, approximately  $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (Salcedo et al., 2017) as well as average temperatures higher than  $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and plenty rainfall ( $1200 \text{ L m}^{-2}$ ), especially in the winter season and a dry summer season (Pourrut, 1983; Salcedo et al., 2015). This fact implies many difficulties for the adequate plant's growth and consequently in the improvement of the agricultural sector that with a surface of 5,279,613 ha grown involves a high source of incomings (9% of gross domestic product (GDP)) (ESPAC, 2018).

Solar radiation is crucial in plant growth since induces photosynthesis and also is involved in the energetic balance of the greenhouse (Gulrez et al., 2013). The spectral distribution of the solar radiation can be categorized into three groups: ultraviolet radiation (UV: 200–400 nm), visible light (VL: 400–700 nm) and near infrared radiation (NIR: 700–2500 nm). Photosynthetically active radiation (PAR) almost overlaps with VL, whereas NIR is involved in the heating process in greenhouses (Kumar et al., 2009).

One of the main drawbacks for the establishment of greenhouses in different areas is the maintenance of adequate air temperatures and relative humidity for plant's growth



(Abdel-Ghany et al., 2012). This fact is crucial in tropical regions where plant production in greenhouses is hampered by excess solar radiation which causes high temperatures and relative humidity exceeding the optimal plant growth (Kumar et al., 2009). Under these harsh conditions, the cooling of the greenhouse takes a pivotal role in plant's development but using natural ventilation there is a non-constant cooling in the greenhouse since it depends on the wind speed and direction. Nevertheless, the use of active cooling systems involves a high price that is not affordable to the growers in these tropical regions (Mutwiwa et al., 2017). In this sense, the use of shading techniques like whitening or shading screen would be a perfect complement to natural ventilation helping to reduce the high temperatures recorded in the greenhouse, but there is a loss of PAR which affects considerably to the photosynthesis and final yield (Mahmood et al., 2018). Currently, the recent development of cool films (NIR-filtering) with reduction of temperature inside the greenhouse and minimum PAR radiation transmission have converted to these films as the perfect complement for the cooling process in the greenhouses of tropical and subtropical areas (Hoffmann and Waaijenberg, 2002; Sonneveld et al., 2006).

Considering the above mentioned and taking into account that the selection of a suitable covering material is important to attain the required plant growing environment, the aim of this work is to evaluate two types of cover films installed in experimental units using the optical and climatic data recorded inside and outside.

<sup>a</sup> E-mail: mtlao@ual.es

---

## **MATERIALS AND METHODS**

This experiment consisted on the comparison of two different polyethylene cover films: a) a three-layer co-extruded film stabilized with hindered amine light stabilizers (HALS) and antioxidants with a thickness of 200  $\mu\text{m}$  (cool-film) and b) a transparent standard film stabilized with HALS with a thickness of 177.8  $\mu\text{m}$  commonly used in the "Sierra region" of Ecuador.

### **Films optical analysis**

The optical analysis of the two cover films was carried out in the laboratory of Applied Physics of University of Almeria. The spectral analysis of these cover films has been performed using a LICOR 1800 spectroradiometer associated with an integrative sphere. Determinations of reflectance (R) and transmittance (T) were carried out every 5 nm in the range of 300-1100 nm in each cover film. The determination of the absorbance (A) was estimated in the same range according to the following equation:

$$A = 100 - (R + T) \quad (\text{Eq. 1})$$

The different spectral regions recorded in the two cover films were the following: ultraviolet (UV) (300-400 nm), blue region (B) (400-500 nm), red region (R) (600-700 nm), far-red region (FR) (700-800 nm), which compose the morphogenetically active radiation (MAR), the photosynthetically active radiation (PAR) (400-700 nm), the near infrared radiation (NIR) (700-1100 nm) and the global radiation (GR) (300-1100 nm).

The values of transmittance ( $T_i$ ) in each spectral region were calculated according to the following equation:

$$T_i = \int_a^b T_i'(\lambda) d\lambda / (b - a) \quad (\text{Eq. 2})$$

where:  $T_i$  = average transmittance of the band ( $i$ ) (expressed in %),  $T_i'$  = transmittance for each wavelength ( $\lambda$ ) into the spectral region ( $i$ ) (expressed in %),  $a$  = downer limit and  $b$  is the upper limit of the spectral region ( $i$ ) (expressed in nm). On the same vein, the values of reflectance ( $R_i$ ) and absorbance ( $A_i$ ) were calculated using the Equation 2.

The coefficients between the spectral bands calculated were the following: PAR/GR, PAR/NIR, B/R, B/FR and R/FR. The determination of these coefficients was performed using the following equation:

$$\frac{T_i}{T_j} = \frac{\int_a^b T_i'(\lambda) d\lambda / (b - a)}{\int_c^d T_j'(\lambda) d\lambda / (d - c)} \quad (\text{Eq. 3})$$

where  $T_i$  and  $T_j$  were the transmittance coefficient of the band ( $i$ ) or ( $j$ ) (expressed in %),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and  $d$  are the limits of the range of the band ( $i$ ) and ( $j$ ) (expressed in nm); respectively, and  $T_i'$  and  $T_j'$  were the instantaneous transmittance in each wavelength ( $\lambda$ ) for the spectral region ( $i$ ) or ( $j$ ) (expressed in %).

### Films behaviour under semi-field conditions

The study of the films behaviour under semi-field conditions was carried out in the Experimental Center "San Isidro" belonging to the University Catholic Santiago de Guayaquil (Ecuador) (2° 10' S, 79° 74' W) at 33 m.a.s.l. The main climatic parameters of this experimental area are the following: average values of temperature (25.3 °C), precipitation (1,104 L m<sup>-2</sup>), relative humidity (74%), wind speed (3.4 m s<sup>-1</sup>) (INAHMI, 2018) and global radiation (3 to 4 Kwh m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) (Arla-Odio et al., 2017).

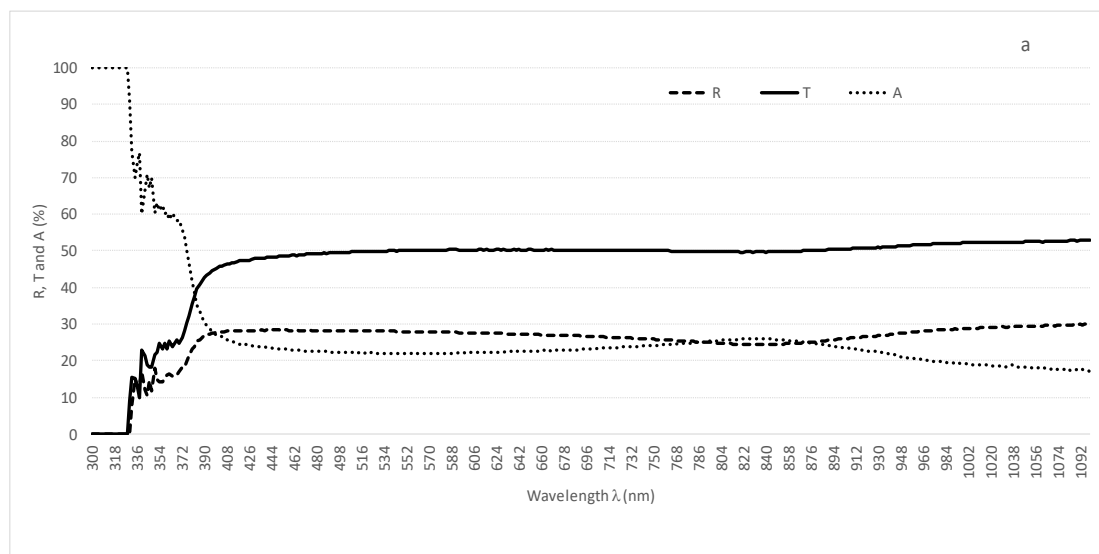
Two experimental designed and constructed units with the following dimensions (1x1x1 m<sup>3</sup>) were used to test the behaviour of the two cover films. The experimental units were ubicated with north-south orientation in a soil covered by grass. The sidewalls were covered with an anti-insect net of 40 Mesh and the roof with the cover films assessed. The experimental period lasted 60 days (March to April, 2018). During this period, inside and in the outside of the experimental units, air temperature and relative humidity were monitored on an hourly basis with an Onset HOBO LCD data logger (model H8 RH/Temp/External H08-004-02, Onset Computers). Also, photosynthetically active radiation (PAR) was measured daily using a pyranometer (model QSO-SUN; Apogee Instruments, Logan, UT)

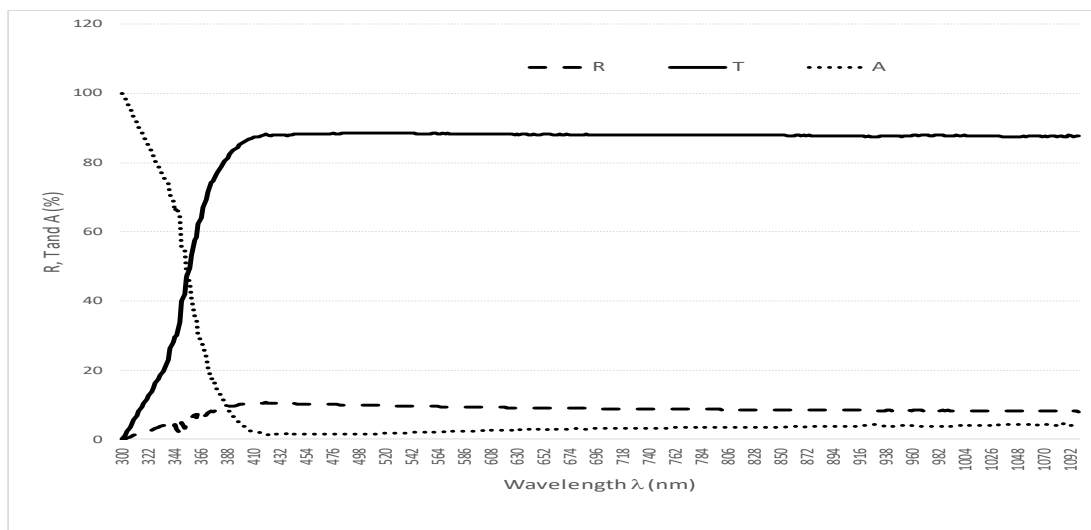
The recording and calculation of the different parameters assessed was carried out using MS Excel.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Optical characterization

Figure 1 shows the percentage of transmittance, reflectance and absorbance in each of the films assessed (cool film (a) and standard film (b)). The cool film increased the value of transmittance and reflectance in 50% and 26% from 300 to 400 nm, respectively; remained then constant for both optical parameters along the different spectral regions. With respect to the absorbance values, there was a decrease from 100% to 25% in the range from 300 to 400 nm, but after of this range, the values of the absorbance remained constant. On the other hand, the standard film increased the value of transmittance in 88% from 300 to 420 nm remaining then constant along the spectrum. Similarly, the value of reflectance in the standard film showed an increase in 10.2% from 300 to 400 nm but without variations until 1100 nm. In the case of the value of absorbance in the standard film, there was a huge decrease from 100 to 2% in the region from 300 to 420 nm but without changes until 1100 nm. The comparison between both films reported a decrease of transmittance and absorbance in the cool film respect to the standard film agreeing with the results reported by Mutwiwa et al. (2017) in an experiment carried out in Thailand comparing a cool film against a standard film. Moreover, this decrease in both optical properties resulted in a cooling effect in the experimental units.





**Figure 1.** Values of reflectance, transmittance and absorbance in the different spectral regions in the cool film (a) and in the standard film (b).

In order to show a better characterization, we recorded the values of the reflectance, transmittance and absorbance in the different spectral regions assessed (Table 1) as well as the different ratios calculated between different spectral regions (Table 2) in each of the film covers studied.

Table 1. Characterization of reflectance, transmittance and absorbance in the different spectral regions studied in the cool and standard film.

		Cool film			Standard film		
	Spectral regions	R(%)	T(%)	A(%)	R(%)	T(%)	A(%)
<b>MAR</b>	UV (300-400 nm)	18	27	55	7	64	29
	B (400-500 nm)	28	48	24	16	78	6
	R (600-700 nm)	27	50	23	11	78	11
	FR (700-800 nm)	26	50	24	11	78	11
<b>PAR</b>	PAR (400-700 nm)	28	49	23	15	78	7
<b>NIR</b>	NIR (700-1100 nm)	27	51	22	11	78	11
<b>GR</b>	GR (300-1000 nm)	<b>26</b>	<b>48</b>	<b>26</b>	<b>12</b>	<b>66</b>	<b>22</b>

\*UV= ultraviolet, B= blue, R= red, FR= far-red, PAR= photosynthetically active radiation, NIR= near infra-red, GR= global radiation.

Table 2. Values of the ratios between different spectral regions in the cool and standard film.

Ratio	Cool film	Standard film
PAR/GR	1.03	1
PAR/NIR	0.97	1
B/R	0.96	1
B/FR	0.96	1
R/FR	1.01	1

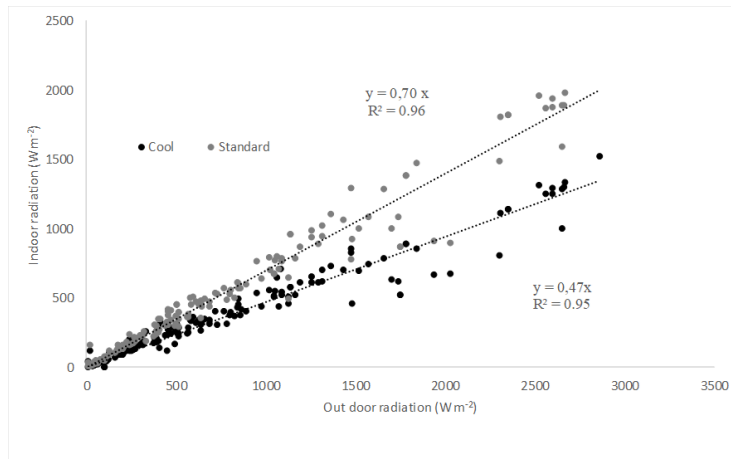
Comparing the optical properties of the cover films, there were differences between the cool and the standard films. For instance, the values of transmittance were lower in the cool film (48%) compared to the standard film (76%), whereas the values of reflectance and absorbance (26% in both optical parameters) in the cool film were higher than in the standard film. The lower values of transmittance in the cool films can be justified by the addition of different reflecting compounds as reported by Hemming et al. (2006). Moreover, the values of the reflectance in the cool film were higher than in the standard film which is a recommendable feature in these cool films especially in tropical regions, since the increase in reflectance involves a lower degradation and a reduction in heat emission into the greenhouse (Ghoulem et al., 2019)

It is necessary to point out that in both films, the value of the transmittance in the UV region was lower compared to the values of transmittance in the other spectral regions recorded in each film assessed. This fact can be explained by the addition of UV-blocking compounds in the cover films (Petchsuk et al., 2019). This reduction of UV radiation involves an increase in the films life, and also, reduces the population and dispersion of certain insect pests in greenhouses (Mutwiwa et al., 2005).

The use of cool films compared to the standard film involved a reduction of the transmittance of NIR and PAR regions. On the same hand, there was a decrease of transmittance in the different spectral regions (R, B and FR) studied in the morphogenetically active radiation (MAR) region. The reduction of NIR by the use of the cover film allows the reduction of the greenhouse air temperature and possible anormal growth of the crop due to the heat increase (Abdel-Ghany et al., 2012). Moreover, the loss of PAR involves a reduction in the photosynthesis capacity and final yield (Mahmood et al., 2018). The ratios calculated between different spectral regions were similar for both cover films studied. These results were in line with the findings reported by Perez et al. (2005).

### **Climatic characterization under semi-field conditions**

Figure 2 shows the relationships between the values of PAR radiation inside and outside of the experimental units as well as the calculation of the transmission coefficients in each cover films assessed. The values of the transmittance calculated under semi-field conditions were 0.47 (or 47%) and 0.70 (or 70%) in the cool and standard films, respectively. These values of transmittance under semi-field conditions were lower compared with the data recorded in the laboratory (49% and 78% in cool and standard films, respectively). This fact can be explained by the dust accumulation, water accumulation on the roof and/or film degradation as reported by Mutwiwa et al. (2017).



**Figure 2.** Regression analysis of PAR radiation of the two cover films assessed and estimation of the transmission coefficients.

Table 3 shows the values of average, average of maximum and average of minimum of PAR, temperature and relative humidity (RH) recorded at midday during the experimental period. The results obtained in this experiment reported a significant decrease in the values of the PAR between the inside and the outside of the experimental units being more accentuated in the cool film. With respect to the temperature, it is necessary to highlight that the average of the minimum temperatures showed different trends in the inside and outside of the different experimental units covered with different films. The minimum temperature in the experimental unit covered with the cool film was cooler than in the outside whereas considering the standard film, the trend was the opposite.

The comparison in indoor conditions between the different cover films reported a higher value of PAR ( $1029 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) in the standard compared to the cool film ( $784 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). In the case of temperature and relative humidity, the use of the cool film involved a reduction of  $7.2^\circ\text{C}$  and  $2.4\%$ ; respectively, compared to the standard film. It is necessary to point out that the values of radiation and temperature, especially maximum temperature could be a limiting factor's growth in several horticultural crops (Iglesias and Valle, 2006; Llanderal et al., 2020).

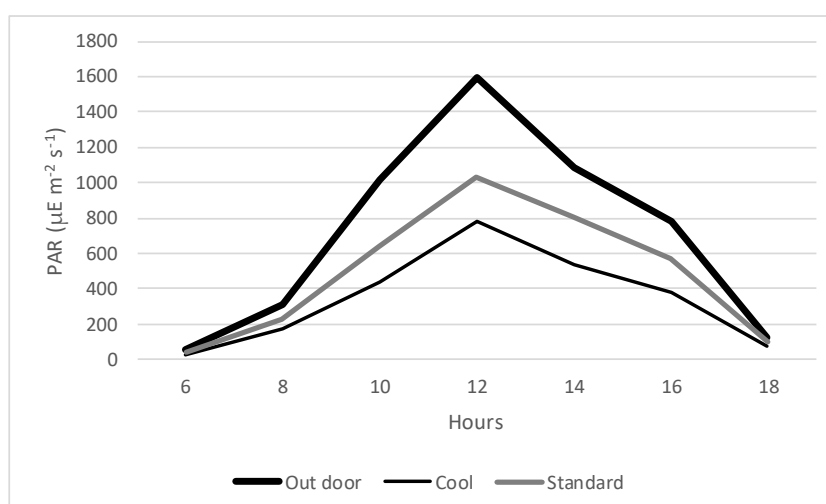
Table 3. Values of average, average of maximum and average of minimum of PAR, temperature and relative humidity (RH) recorded at midday during the experimental period.

Climatic parameters*		Outdoor	Indoor	
			Cool film	Standard film
PAR ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Max. Av. <sup>1</sup>	2860	1669	1979
	Average <sup>2</sup>	1597	784	1029

	<b>Min Av.<sup>3</sup></b>	318	48	60
<b>Temperature (°C)</b>	<b>Max. Av.<sup>1</sup></b>	37.7	35.8	38.1
	<b>Average<sup>2</sup></b>	26.3	26.3	33.5
	<b>Min Av.<sup>3</sup></b>	21.1	18.8	28.8
<b>Relative humidity (HR) (%)</b>	<b>Max. Av.<sup>1</sup></b>		53.4	56.8
	<b>Average<sup>2</sup></b>		41.6	44.0
	<b>Min Av.<sup>3</sup></b>		34.7	36.0

<sup>1</sup>Maximum average, <sup>2</sup>Average, <sup>3</sup> Minimum average.

Figure 3 shows the average horary distribution of PAR in the outside as well as in the inside of the different experimental units covered with cool and standard films. The results obtained reported a similar trend showing higher differences in the middle of the day and decreasing in the first and last hours of the day. The high values of PAR radiation at the midday are related to the high values of global radiation in this period of time (Abdel-Ghany and Helal, 2020).

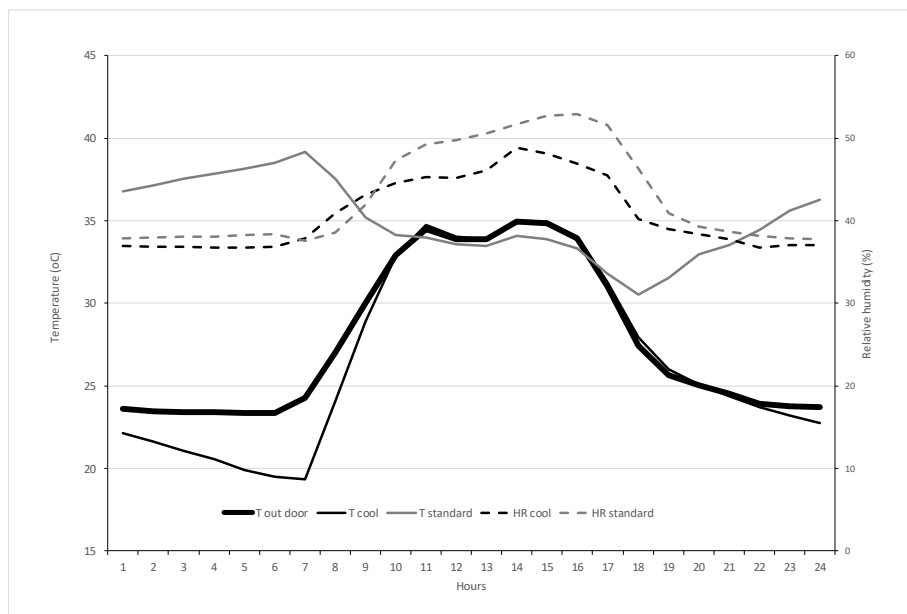


**Figure 3.** Average horary PAR in the outdoor and in the inside of the cool and the standard film.

Figure 4 shows the average horary distribution of the air temperature and relative humidity in the outside as well as in the inside of the different experimental units covered with cool and standard films. In the outside, the air temperature showed values lower to 25 °C during the night (from 19.30 to 6.30 hours) and near to 35 °C (from 9.30 to 16.30 hours) during the lighting period. Considering the data recorded inside, under cool films, the air temperature was lower than in the outside but showing similar values with respect to outside during the lighting period.

Nevertheless, under standard films, the air temperature increased more than 10 °C but being similar with the outside values during the lighting period. The values of relative humidity recorded inside in both films showed similar values ranging from 38% to 52% during the period recorded. The decrease in air temperature under cool films was in the same line with the findings reported by Samaniego-Cruz et al. (2002) in experiments carried

out in Mexico. The drop in air temperature in our experiment under cool films (10 °C) was higher than the drop in air temperature (5 °C) under an NIR-reflecting greenhouse cover reported by Abdel-Ghany et al. (2012). The higher drop in air temperature in our experiment can be explained by the differences in the spectral characteristics between cover films or even taking into account the weather conditions recorded in each experiment carried out.



**Figure 4.** Average horary temperature and relative humidity.

## CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from this work:

- There was a decrease of transmittance and absorbance in the cool film compared to the standard film.
- Our results indicate that the use of cool-films can be an interesting alternative in tropical regions in order to cool the experimental units without expensive cooling systems.

## Literature cited

Abdel-Ghany, A.M., Al-Helal, I.M., Alzahrani, S.M., Alsadon, A.A., Ali, I.M., and Elleithy, R.M. (2012). Covering materials incorporating radiation-preventing techniques to meet greenhouse cooling challenges in arid regions: a review. *The Scientific World Journal* ID 906360, 11 pp.

Abdel-Ghany, A.M., and Al-Helal, I.M. (2020). Towards sustainable agriculture: net-houses instead of greenhouses for saving energy and water in arid regions. In *Sustaining Resources for Tomorrow* (pp. 83-98). Springer, Cham.

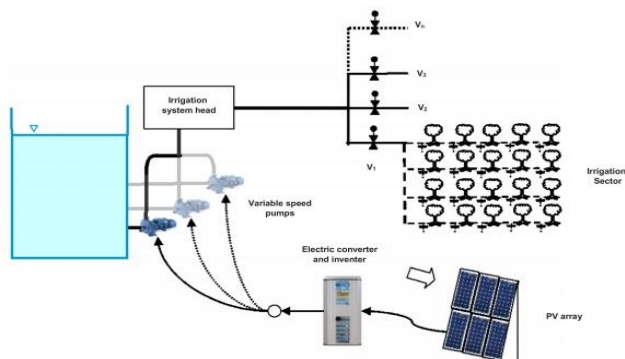
Arla-Odio, S., Tapia-Zurita, M., Guasumba-Codena, J., Martínez, J., Asitimbay, J., and Tapia-Zurita, E. (2017). Validación del recurso solar en el Ecuador para aplicaciones de media y alta temperatura. *INNOVA Res. J.* 7, 34-45.

Encuesta de Superficie y Producción Agraria. Instituto Nacional de Estadística y Censos (ESPAC). (2018). [www.ecuadorencifras.gob.ec](http://www.ecuadorencifras.gob.ec).



- Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., and Calautit, J.K. (2019). Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosys. Engin.* *183*, 121-150.
- Gulrez, S.K., Abdel-Ghany, A.M., Al-Helal, I.M., Al-Zaharani, S.M., and Alsadon, A.A. (2013). Evaluation of PE films having NIR-reflective additives for greenhouse applications in arid regions. *Advan. Mat. Sci. Engin.* ID 575081, 8 pp.
- Hemming, S.F., Kempkes, N., Braak, Van D., Dueck, T., and Marissen, N. (2006). Greenhouse cooling by NIR-reflection. *Acta Hortic.* *719*, 97-106.
- Hoffmann, S., and Waaijenber, D. (2002). Tropical and subtropical greenhouses –A challenge for new plastic films. *Acta Hort.* *578*, 163-171.
- Iglesias, N., and Valle, A.A. (2006). Producción de hortalizas bajo cubierta. *Boletín de Divulgación Técnica* N° 49, 88 pp.
- Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología de Ecuador (INAHMI). (2018). [www.serviciometeorologico.gob.ec](http://www.serviciometeorologico.gob.ec).
- Kumar, K.S., Tiwari, K.N., and Jha, M.K. (2009). Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review. *Ener. Build.* *41*, 1269-1275.
- Llanderal, A., García-Caparrós, P., Pérez-Alonso, J., Contreras, J.I., Segura, M.L., Reca, J., and Lao, M.T. (2020). approach to petiole sap nutritional diagnosis method by empirical model based on climatic and growth parameters. *Agronomy* *10*, 188.
- Mahmood, A., Hu, Y., Tanny, J., and Asante, E.A. (2018). Effects of shading and insect-proof screens on crop microclimate and production: A review of recent advances. *Sci. Hortic.* *241*, 241-251.
- Murakami, K., Fukuoka, N., and Noto, S. (2017). Improvement of greenhouse microenvironment and sweetness of melon (*Cucumis melo* L.) fruits by greenhouse shading with a new kind of near-infrared ray-cutting net in mid-summer. *Sci. Hortic.* *218*, 1-7.
- Mutwiwa, U.N., Borgemeister C., Elsner B., and Tantau, H.J. (2005). Effects of UV-Absorbing plastic films on greenhouse whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *J. Econ. Entomol.* *98*, 1221-1228.
- Mutwiwa, U.N., Tantau, H.J., von Elsner, B., and Max, J.F. (2017). Effects of a near infrared-reflecting greenhouse roof cover on the microclimate and production of tomato in the tropics. *Agric. Engin. Inter. CIGR J.* *19*, 70-79.
- Perez, M., Jiménez, S., Lao, M.T. (2005). Light in intensive horticulture. *Recent Res. Devel. Agricultural & Food Chem.* *6*.
- Petchsuk, A., Srinun, D., Buchatip, S., Supmak, W., and Sirikittikul, D. (2019). Development of multifunctional film for greenhouse applications in tropical regions. *Advan. Mat. Sci. Engin.* ID 1692126, 11 pp.
- Pourrut, P. (1983). Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. *CEDIG Documentos de Investigación* *4*, 8-40.
- Salcedo, G.A., Pérez-Saiz, M., Reca-Cardena, J., Barbero-Francisco, F.J., and Lao, M.T. (2015). Climate characterization under protection facilities in the American intertropical region. *Acta Hortic.* *1170*, 1077-1084.
- Salcedo, G.A., Reca, J., Pérez-Sáiz, M., and Lao, M.T. (2017). Irrigation water consumption modelling of a soilless cucumber crop under specific greenhouse conditions in a humid tropical climate. *Ciência Rural*, *47*, e20151538.
- Samaniego-Cruz, E., Quezada-Martin, M.R.; de La Rosa, M., Munguía-López, J., Benavides-Mendoza, L., Ibarra, L. (2002). Producción de plántulas de tomate y pimiento con cubiertas de polietileno reflejante para disminuir la temperatura en invernadero. *Agrociencia* *36*, 305-318.
- Sonneveld, P.J., Swinkles, G.L.A.M., Kempkes, F., Campen, J., and Bot, G.P.A. (2006). Greenhouse with and integrated NIR filter and a solar cooling system. *Acta Hort.* *719*, 123-130.

Gestión óptima de un bombeo fotovoltaico directo autónomo multisectorial del sistema de riego.





### 5.3. Gestión óptima de un bombeo fotovoltaico directo autónomo multisectorial del sistema de riego

Applied Energy 260 (2020) 114261



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/apenergy](http://www.elsevier.com/locate/apenergy)



## Optimal management of a multisector standalone direct pumping photovoltaic irrigation system



V. Zavala<sup>a</sup>, R. López-Luque<sup>b</sup>, J. Reca<sup>c,\*</sup>, J. Martínez<sup>c</sup>, M.T. Lao<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Technical Education for Development, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador

<sup>b</sup> Department of Applied Physics, University of Córdoba, Room C21E030, Albert Einstein Building, Campus of Rabanales, 14071 Córdoba, Spain

<sup>c</sup> Department of Engineering, University of Almería, CIAIMBITAL, Agri-food Campus of International Excellence Ceta3, Ctra, Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, 04120 Almería, Spain

<sup>d</sup> Department of Agronomy, University of Almería, CIAIMBITAL, Agri-food Campus of International Excellence Ceta3, Ctra, Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, 04120 Almería, Spain

### HIGHLIGHTS

- A model to optimize the operation of Multisector Standalone Direct Pumping PV Irrigation systems has been developed.
- The optimization of this type of PV irrigation implies considering both PV and irrigation subsystems.
- Simultaneous operation of several irrigation sectors reduces the cost of the PV plant.
- Simultaneous operation of several irrigation sectors is also advantageous in terms Efficiency of Energy Use.

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Photovoltaic energy  
PV irrigation systems  
Standalone Direct Pumping PV Irrigation systems  
Multisector  
PV irrigation design and management  
Optimization  
PV Energy Use Efficiency

### ABSTRACT

Standalone direct pumping PV irrigation systems are a special type of PV system in which water is not lifted to a tank but, instead, is pumped to the irrigation system to satisfy the crop water needs. The operation of these PV irrigation systems requires efficient new operation rules in order to maximize the energy use efficiency as the PV energy must be used instantaneously. In this work, we introduce a new multisector approach based on the simultaneous operation of several irrigation sectors according to the incoming energy. An innovative analytical model was implemented in order to optimize the operation of a multisector PV irrigation system. The proposed model was evaluated by applying it to a case study. The results of said study showed that simultaneous operation reduced the cost of the PV plant since it required a lower number of PV modules (lower Peak power) and it also outperformed the individual operation scenario in terms of energy use efficiency as 18.4% of the potential PV energy was effectively delivered to the irrigation sectors (only 15.4% for individual operation). The design of the irrigation system was also affected by the adopted operation strategy. Lower nominal flowrate of the emitters and higher irrigation time per sector were preferable in simultaneous operation than in the case of individual operation.

### 1. Introduction

The use of renewable energy sources for irrigation implies a new paradigm for the agricultural sector. The use of small off-grid PV irrigation systems has increased in recent decades [1] and they are one of the most promising alternatives for rural electrification because many farms are isolated and far from electric grid facilities so the cost of conventional electrification tends to be high. The price of electricity has increased in the recent decades whereas the cost of PV arrays has considerably decreased, making PV irrigation systems economically

competitive [2]. Standalone irrigation systems are also environmentally efficient since they do not require a battery bank to store energy. For this reason, off-grid PV irrigation systems are an active field of research [3,4] and they are being used for many types of agricultural systems throughout the world [5–7].

Standalone direct pumping photovoltaic irrigation systems are a specific type of PV irrigation systems in which water is directly pumped to the on-farm irrigation water distribution system; therefore, they require no storage facility for accumulating neither energy nor water [8]. The advantages of these systems are their null reservoir investment cost

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [fallolur@uco.es](mailto:fallolur@uco.es) (R. López-Luque), [jreca@ual.es](mailto:jreca@ual.es) (J. Reca), [jumartin@ual.es](mailto:jumartin@ual.es) (J. Martínez), [mtlao@ual.es](mailto:mtlao@ual.es) (M.T. Lao).

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114261>

Received 26 July 2019; Received in revised form 30 October 2019; Accepted 24 November 2019

0306-2619/© 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Nomenclature	
<b>A</b>	Valve-opening matrix
<b>H<sup>k</sup></b>	Solution matrix for period $k$ . $n_{im}^k$ are the elements of this array
$a(i,j)$	Element of the matrix A ( $i$ = combination, $j$ = irrigation sector)
$C_i$	Set of sectors in operation for the specific irrigation network configuration $i$
$D_j^k$	Water deficit in the soil in sector $j$ during period $k$
$d_m^k$	Duration of the Power interval $m$ for period $k$
$ET_c$	Crop evapotranspiration
$ET_o$	Reference evapotranspiration
$H_{out}$	Energy head downstream of the pumping station (head of the network) for the sector combination $i$
$H_{int}$	Pumping head for the sector combination $i$
$H_j$	Required head in sector $j$
$h_{in}$	Pressure head required in the inlet of sector $j$
$hf_{o-j}$	Head loss along the path from the head of the network to sector $j$
$hf_p$	Head losses in the pumping station
$I(t)$	Solar Irradiance as a function of time $t$
$I_m^k$	Power interval $m$ for period $k$ .
$K_c$	Crop coefficient
$K_r$	Reduction coefficient for sparse crops
$M$	Penalty function
$N_j^k$	Irrigation requirements for sector $j$ during period $k$
$n_c$	Total number of irrigation sectors combinations
$n_p$	Total number of time periods considered in the irrigation season
$n_r$	Maximum number of irrigation sectors in simultaneous operation
$n_s$	Total number of irrigation sectors
$n_{im}^k$	Number of pumping hours for a specific sectors combination $i$ and Power interval $m$ during period $k$
$P_e$	Effective precipitation
$P_i$	Net Power required for the sectors combination $i$
$P_{PV}$	Photovoltaic power provided by the PV system
$Q_j$	Flow in the sector $j$
$Q_{in}$	Flow pumped in the irrigation combination $i$
$q_j$	Discharge of the emitters in sector $j$
$RAW_j$	Readily available soil water in sector $j$
$Rg_j^k$	Gross irrigation water depth applied (in mm) in sector $j$ for period $k$
$Rn_j^k$	Net water irrigation depth applied (in mm) in sector $j$ for period $k$
$S_j^k$	Depth of water (in mm) stored in the soil in sector $j$ , for a specific period $k$
$SC$	Ground canopy cover fraction.
$V_j$	Annual volume of water supplied to irrigation sector $j$ .
$z_j$	Elevation of the inlet in sector $j$
$z_o$	Elevation of the water level in the supply tank
$\eta_{PC}$	Efficiency of the converter
$\eta_{AM}$	Efficiency of the asynchronous motor
$\eta_p$	Pump efficiency
$\eta_{aj}$	Irrigation application efficiency in sector $j$ .
$\gamma$	Specific weight of the water
<b>Subscripts</b>	
$i$	Combination number, $i = 1 \dots n_c$
$j$	Sector number, $j = 1 \dots n_s$
$m$	Power interval number, $m = 1 \dots n_p$
<b>Superscripts</b>	
$k$	Time period number, $k = 1 \dots n_p$

and the reduction of direct evaporation losses from the reservoir [9]. However, the operation of these systems proves to be more complex since PV energy must be used at exactly the same time it is generated, otherwise, it is wasted [10]. This condition thus requires that the electric energy generated be perfectly matched to that which is consumed [11,12]. Fortunately, both irrigation water requirements and electrical PV energy generation are strongly dependent on radiation [13,14], so they are, essentially, synchronized.

Several previous research works have developed different simulation models to optimize system cost. For instance, Zhang et al. [15] developed a PV simulation model, that included the crop evapotranspiration and groundwater level, to match the irrigation water demand and PV energy generation and to optimize the PV energy use. Campana et al. [11] developed a simulation model of a PV irrigation system with special emphasis on the water demand. In addition, Campana et al. [16] developed a simulation model of a PV irrigation system with the aim of minimizing the cost of the system. Finally, Benlarbi et al. [17] proposed a fuzzy global efficiency algorithm to optimize a PV water pumping system.

Nevertheless, new, more efficient and specific algorithms and methods must be developed for the design and management of standalone direct pumping irrigation systems as new difficulties associated with solar energy availability arise, mainly because it is a stochastic variable superimposed to a seasonal trend. These restrictions not only affect the optimal design problem consisting of sizing the components of the system (PV plant, pumping plant, distribution pipes, etc.) but also the optimal management strategies capable of minimizing costs and maximizing energy use. Regarding this issue, some research works have been conducted focusing on system operation. Mérida et al. [18]

proposed a simple and efficient algorithm to manage in real time the PV irrigation system in a farm with several non-uniform irrigation sectors. In this algorithm, the authors defined the PV threshold required to irrigate each sector and they proposed to prioritize the irrigation sector with the highest power requirements, provided that the PV power generated by the array exceeded the power threshold for that sector. Once the irrigation sector with the highest power requirements has fulfilled its irrigation needs, the algorithm selects the sector with the next highest requirements, repeating this process successively until the irrigation requirements of all sectors have been completely satisfied.

However, previous works focused exclusively on the operation of the PV system in order to supply energy to the irrigation system but considering that the irrigation energy demands were previously determined input data. Our research team suggested a paradigm shift regarding the PV irrigation system design and management. This new paradigm entails considering both PV and irrigation subsystems simultaneously. Consequently, in several previous work, we proposed different approaches to adapt the irrigation energy needs to the produced PV energy from the energy demand side. Among these strategies, López-Luque et al. [19] suggested using non-compensating emitters coupled to a variable speed pump to vary the flow in the irrigation system as a function of the PV energy available. These authors demonstrated that this procedure improved the efficiency of the energy use for an olive orchard. The drawback of this procedure is that it must be limited to flat terrains in which a low hydraulic variability can be attained, otherwise the irrigation uniformity of the system can be seriously compromised. These authors also introduced the concept of PVOI (Photovoltaic Opportunity Irrigation), in which a controlled deficit irrigation strategy was proposed to optimize the farmers' revenue and

EUE.

Another proposed procedure was to increase the number of irrigation sectors. This procedure aims to reduce the Peak Power required and to extend the total irrigation time, with the aim of taking advantage of the solar energy received throughout the entire day. López-Luque et al. [10] proved that this procedure was effective as the increasing number of sectors improved the Energy Use Efficiency (EUE).

Our research group has been the first to introduce a new step toward improving the EUE. This new approach is based on operating several sectors simultaneously as a function of the generated power. Subsequently, Reca et al. [20] tested this strategy for the irrigation of a Mediterranean greenhouse considering several uniform irrigation sectors. They concluded that it improved the EUE, although pumping costs might be increased. When dealing with real farms, nonetheless, sectors are rarely uniform. Most of them have different sizes, elevation and power requirements. Thus, the development of a specific methodology to optimize the irrigation management of PV irrigated farms with heterogeneous sectors is a key requirement for the optimal PV irrigation systems in real farms.

Following this research line, in this work, a new significant advance in the optimal design and operation of direct pumping PV irrigation systems is proposed. A new model aimed to optimize the operation of a multisector direct pumping PV irrigation system is presented. The model considers the possibility of operating a variable number of irrigation sectors simultaneously and provides the optimal irrigation operation of the system that maximizes the EUE of the system. The model can also be used to optimize the design of this type of system and minimize the total cost of the PV plant required to supply the electric power.

The model is based on a robust, fast and efficient linear programming formulation. The model was tested by applying it to a real case study. The proposed case study was the optimal design of a PV irrigation system for an olive orchard farm with 4 heterogeneous sectors, located in Tabernas (Almería).

## 2. Methodology

### 2.1. General description of the photovoltaic irrigation system

A scheme of the proposed system is illustrated in Fig. 1.

The proposed standalone direct pumping photovoltaic irrigation system is composed of the following systems:

- A photovoltaic array that provides electricity
- A frequency converter that allows changing the speed of an electric motor
- A pump or set of pumps operating in parallel
- A set of electric valves that control the irrigation to the different irrigation sectors.

A computer program was developed to simulate the performance of the PV irrigation system. The program is based on mathematical models of each of its components: the PV array, the pumping and the crop subsystems. These mathematical models are described hereafter.

### 2.2. PV subsystem

The net photovoltaic power provided by the PV generator ( $P_{PV}$ ) was calculated as a function of the solar irradiance. The irradiance,  $I(t)$ , was estimated every three minutes over the course of the study period considering an isotropic distribution of the diffuse radiation [21]. Direct and diffuse irradiance values were obtained from the global daily radiation expressed in  $\text{MJ m}^{-2}$  using the model proposed by Collares-Pereira and Rabl [22]. A detailed description of the methods applied to simulate the gross and net PV power supplied to the pumping system are described in López et al. [19], Reca et al. [20] and Reca and López [23].

### 2.3. Irrigation subsystem

The irrigation distribution system is composed of a pumping system that boosts water directly into the irrigation distribution network. On-farm distribution networks are usually branched networks with several outlets or hydrants, each of them supplies water to a specific irrigation

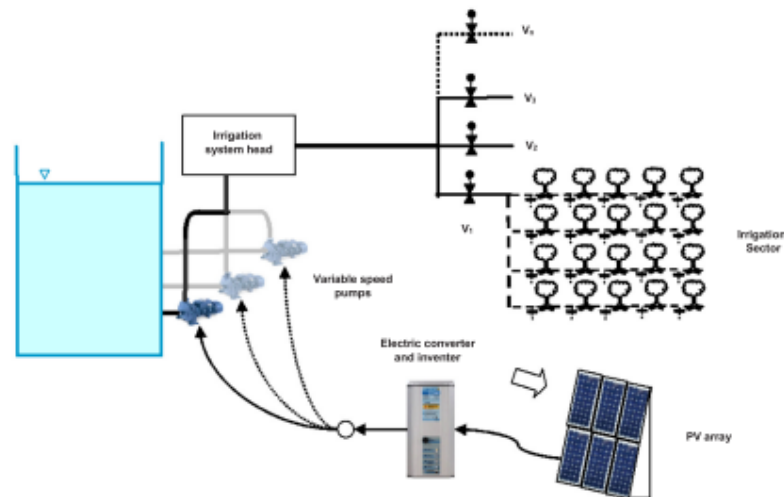


Fig. 1. Scheme of the proposed direct pumping PV irrigation system.

sector. The aim of the proposed system is to pump the required water flow to one, or more than one, irrigation sector depending on the generated PV power, the power required to irrigate each of these sectors and the volume of water needed to irrigate these sectors. For this reason, the proposed model needs to calculate the flow and power required in every possible combination of sectors operating simultaneously

2.3.1. Flow and power requirements per sector

In a direct pumping irrigation system, the pumping system must supply the proper flowrate to every sector in operation with an energy head equal or higher than a minimum required head.

The flow of a specific sector ( $j$ ) can be calculated as a function of the number of the emitters in operation in each sector ( $n_j$ ) and the emitters discharge ( $q_j$  in L/h)

$$Q_j = n_j q_j \tag{1}$$

The minimum required energy head ( $H_{r,j}$ , in m) at the inlet of the sector ( $j$ ) is the sum of the elevation of the inlet ( $z_j$ , in m) and the inlet pressure head ( $h_{o,j}$ , in m), which in turn is a function of the emitters pressure head, head losses in the laterals and manifolds and tertiary pipes in the sector and the relief of the irrigation sector. A hydraulic design of the irrigation sector following appropriate methodologies [24] will provide the value of the required head per sector.

$$H_{r,j} = z_j + h_{o,j} \tag{2}$$

2.3.2. Irrigation requirements and water balance per irrigation sector

To schedule the irrigation timing and amounts, the water demands per irrigation sector must be calculated. These water needs depend on the type of crop and climate. The crop water requirements were calculated using the methodology proposed by FAO [25]. According to this methodology, the crop evapotranspiration ( $ET_c$ ), or water consumption of the crop, is calculated applying the following equation:

$$ET_c = ET_o K_c K_e \tag{3}$$

where:  $ET_o$  is the reference evapotranspiration (mm),  $K_c$  is the crop coefficient and  $K_e$  is a reduction coefficient for sparse crops with limited canopy cover (both coefficients are dimensionless).

The net irrigation requirements,  $N$  (mm) are equal to the  $ET_c$  (mm) minus the effective precipitation [26], that is, rainfall that infiltrates, which is effectively stored in the soil and consequently used by the crop ( $P_e$ , in mm).

By applying a water balance to a soil-crop system for a specific time period ( $k$ ) and for every sector in the farm ( $j$ ), the following equation is obtained:

$$S_j^k = S_j^{k-1} - N_j^k + Rn_j^k \tag{4}$$

where:  $S_j^k, S_j^{k-1}$  (mm) are the depth of water stored in the soil in sector  $j$ , for a specific time period ( $k$ ) and its preceding ( $k-1$ ), respectively,  $Rn_j^k$  (mm) is the net water irrigation depth applied in sector  $j$  for period  $k$ , which can be calculated by multiplying the gross irrigation water depth ( $Rg_j^k$ , in mm) by the irrigation efficiency ( $\eta_{a,j}$ ). Irrigation efficiency accounts for the on-farm water losses.

The depth of water stored in the soil should be between two limits. The lower limit is the Readily Available soil Water (RAW) since, below this limit, plants undergo water stress, whereas the upper limit is the Field Capacity of the soil (FC) because the excess of water applied above this limit would be lost by deep percolation.

For every period  $k$  and irrigation sector  $j$ , the water deficit ( $D_j^k$ , in mm) is equal to zero if  $S_j^k > RAW_j$  and can be computed as  $D_j^k = RAW_j - S_j^k$ , if  $S_j^k < RAW_j$ .

2.4. Statement of the optimization problem

The aim of the model is to optimize the operation of a multisector PV irrigation system with heterogeneous irrigation sectors as a function of the available PV energy.

The proposed methodology involves subdividing the irrigation season into a number ( $n_p$ ) of homogeneous time periods.

Considering that the irrigation system has a total of  $n_s$  irrigation sectors, let  $n_c$  be the maximum number of irrigation sectors allowed to be irrigated simultaneously. The total number of different sector combinations is  $n_c = \binom{n_s}{1} + \binom{n_s}{2} + \dots + \binom{n_s}{n_c}$  with at least one sector in operation. Every combination has a different set of sectors in operation. Let us denote these combinations as  $C_i$ , with sub index  $i$  ranging from 1 to  $n_c$ .

The information of the sectors in operation for every network combination can be structured in an array  $A$ . In this array  $A, a(i,j) = 1$  if sector  $j$  is open in the  $i^{th}$  combination, whereas  $a(i,j) = 0$  if it is closed. In this array, all the rows and columns have at least one not null element. The rows in matrix  $A$  will later be ordered following an ascending criterion from that with the lowest required power to the highest.

For every irrigation combination, the input variables needed to run the model are the flow that must be pumped ( $Q_{tot}$  in  $m^3/s$ ), the required

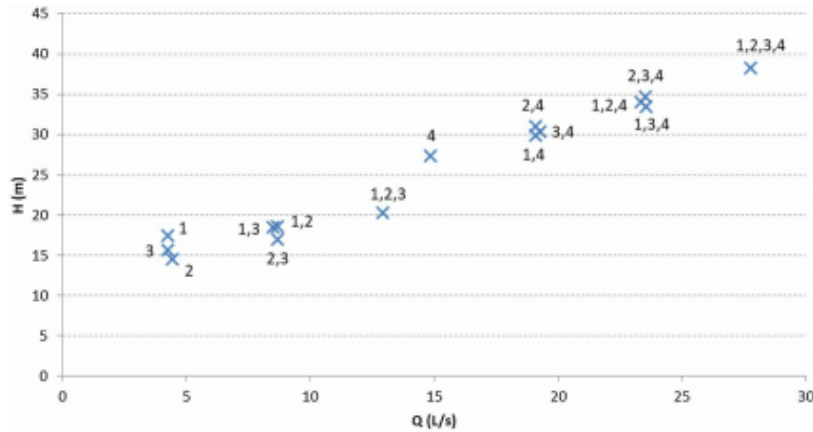


Fig. 2. Head-Discharge graph showing all the possible combinations for a PV irrigation system with 4 sectors and a maximum number of sectors equal to 4.

pumping head ( $H_{st}$  in m) and, finally, the power  $P_i$  (W) that must be supplied to the pumping station in order to operate the system for every specific combination of operating sectors  $i$ .

The total flow pumped by the pumping system for the specific network configuration can be calculated by adding the flow of every sector in operation.

$$Q_{st} = \sum_{j=1}^{j=ns} a(i, j)Q_j \tag{5}$$

The required energy head downstream of the pumping system can be calculated by performing a hydraulic simulation of the pipe distribution network [27] and then applying the following equation.

$$H_{st} = \text{Max}_j (H_{tj} + hf_{0-j}) \quad \forall j \text{ being } A(i, j) = 1 \tag{6}$$

where:  $H_{st}$  (m) is the required energy head downstream of the pumping system (head of the distribution network) for the specific sector combination  $i$ ,  $H_{tj}$  (m) is the energy head required at sector  $j$ ,  $hf_{0-j}$  (m) is the total head losses along the path from the beginning of the network to sector  $j$ .

Finally, the net power that should be supplied by the pumping system is equal to:

$$P_i = \gamma \cdot Q_{st} \cdot H_{st} = \gamma \cdot Q_{st} \cdot (H_{st} - z_0 - hf_p) \tag{7}$$

where:  $H_{st}$  (m) is the pumping head,  $z_0$  (m) is the elevation of the water level in the supply tank, and  $hf_p$  (m) are the head losses in the pumping station.

For this net power ( $P_i$ , in W) to be supplied, the total power that should be produced by the PV plant is given by the following equation:

$$P_{PV} = \frac{P_i}{\eta_p \cdot \eta_{AM} \cdot \eta_{FC}} \tag{8}$$

where:  $P_{PV}$  (W) is the PV power that must be supplied by the PV plant,  $\eta_{FC}$  is the efficiency of the converter,  $\eta_{AM}$  is the efficiency of the asynchronous motor and  $\eta_p$  is the pump efficiency. Eqs. (7) and (8) constitute a simplistic pump model, normally regarded as a valid first approach [16,19,28].

The following step in the proposed methodology is to sort the combinations in an ascending manner according to their required power, from the combination that requires the lowest power ( $P_{PV1}$ ) to that which requires the highest ( $P_{PVn}$ ).

For instance, Fig. 2 illustrates the system curve of the water distribution network showing all the possible combinations for an irrigation system with 4 irrigation sectors and a maximum of 4 sectors in operation. In this case, a total of 15 different network configurations exist. The graph shows the sectors in operation for each combination and the required head and discharge in the pumping system.

In order to calculate the total number of working hours for every specific system combination  $i$ , the distribution function of the power produced by the PV plant as a function of time is necessary. This distribution function can be obtained by performing a simulation of the PV plant by applying the methods discussed in Section 2.2. This distribution function provides the number of hours in which the PV plant yields a power lower than a specific power  $P_{pv}$ . Fig. 3 shows a typical distribution function curve for a specific period  $k$ .

From this function, power intervals  $I_m^k$  ranging from  $I_1^k$  to  $I_{nc}^k$  can be defined. For interval  $I_1^k$ , only combination 1 is feasible as it requires the lowest power, for  $I_2^k$  interval, combinations 1 and 2 are then both possible, and successively until the last interval  $I_{nc}^k$ , in which all combinations from  $P_{PV1}$  to  $P_{PVnc}$  are possible since they have enough power to operate. The duration of the intervals  $d_1^k$  to  $d_{nc}^k$  (in hours) can be obtained from this distribution function as shown in Fig. 3.

For a specific period  $k$  in which the irrigation season is subdivided, the unknown variables that must be solved to properly manage the system are the number of hours in which a specific combination  $C_i$  is operating during a particular power interval  $I_m^k$  ( $n_{im}^k$ ). This number of operating hours can be structured in an array called  $H^k$ . The rows in this array refer to the sorted combinations while the columns indicate the power intervals. It is quite easy to see that this array is triangular.

The number of hours in which a combination  $i$  is working ( $n_i^k$ ) can be obtained by summing row  $i$  in matrix  $H$ .

$$n_i^k = \sum_{m=1}^{m=nc} n_{im}^k \tag{9}$$

This specific combination provides a specific number of irrigation hours to a specific sector  $j$  that can be calculated by Eq. (10):

$$n_j^k = \sum_{i=1}^{i=nc} a(i, j) \cdot n_i^k \tag{10}$$

Combining Eqs. (9) and (10), the total irrigation hours for a specific sector  $j$  can then be computed by applying Eq. (11):

$$n_j^k = \sum_{i=1}^{i=nc} a(i, j) \cdot \sum_{m=1}^{m=nc} n_{im}^k \tag{11}$$

Multiplying the number of hours given by Eq. (11) by the unitary flow of each sector, the gross irrigation water depth supplied to a specific sector  $j$  during period  $k$  is equal to:

$$Rg_j^k = \left( \sum_{i=1}^{i=nc} a(i, j) \cdot \sum_{m=1}^{m=nc} n_{im}^k \right) \cdot \frac{Q_j}{A_j} \tag{12}$$

Where:  $A_j$  ( $m^2$ ) is the area of the irrigation sector  $j$ ,  $Q_j$  ( $m^3/h$ ) is the total flow for irrigation sector  $j$ , and  $Rg_j^k$  (m) is the gross irrigation depth applied to sector  $j$  during period  $k$ .

Considering the variables  $n_{im}^k$  as decision variables, the problem can be formulated as a linear programming problem that requires defining

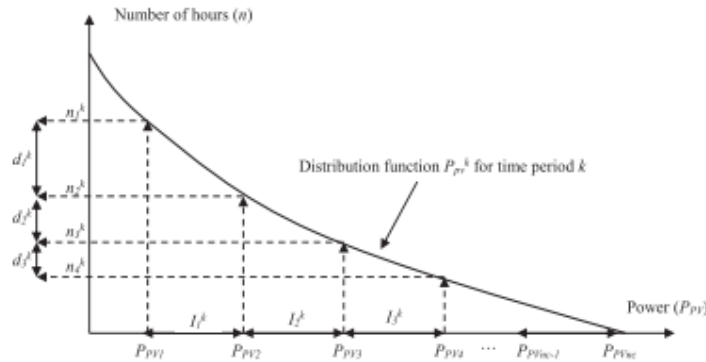


Fig. 3. Distribution function  $P_{PV}^k$  of generated power for time period  $k$ .





Fig. 4. Layout of the experimental farm and PV irrigation system.

Table 1  
Array of operating hours for every irrigation combination and power interval.

Irrigation combination	Power interval					
	$I_1^k$	$I_2^k$	$I_3^k$	$I_4^k$	...	$I_m^k$
$C_1$	$n_{11}^k$	$n_{12}^k$	$n_{13}^k$	$n_{14}^k$	...	$n_{1m}^k$
$C_2$	0	$n_{22}^k$	$n_{23}^k$	$n_{24}^k$	...	$n_{2m}^k$
$C_x$	0	0	$n_{x3}^k$	$n_{x4}^k$	...	$n_{xm}^k$
$C_i$	0	0	0	$N_{im}^k$	...	$N_{im}^k$
-	-	-	-	-	...	-
$C_{no}$	0	0	0	0	...	$N_{noim}^k$

Table 2  
Agronomic characteristics of the experimental olive orchard.

Plantation data		Sector			
		1	2	3	4
Canopy	$D$ (m)	3.0	3.0	4.0	3.0
	Perimeter (m)	9.4	9.4	12.6	4.7
	Area ( $m^2$ )	7.1	7.1	12.6	7.1
Layout	Plant spacing (m)	5.0	5.0	5.0	5.0
	Row spacing (m)	7.0	7.0	6.0	7.0
	SC (%)	20%	20%	42%	20%
	$K_c$	0.41	0.41	0.74	0.41

Table 3  
Emitter discharge and flow per sector and alternative design.

Sector	q (L/h/tree)			Q (L/s)		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3
1	8	12	16	2.06	3.09	4.11
2	8	12	16	2.20	3.30	4.41
3	12	16	20	3.51	4.68	5.85
4	8	12	16	2.12	3.18	4.24

Table 4  
On-farm pipe distribution network characteristics.

Pipe Id.	Pin.	Pfn.	Inner diameter (mm)	Elevation of Pfn. (m)	Pipe length (m)
1	0	1	117.6	594	230
2	1	2	70.6	573	220
3	2	3	84.6	592	85
4	3	4	70.6	595	79

both the objective function and the set of restrictions.

2.4.1. Objective function

The objective function to minimize ( $F$ ) is composed of two different objectives. The primary objective is to minimize the total irrigation deficit for every irrigation sector and period. To prioritize this objective, the irrigation deficits are multiplied by a high penalty function,  $M$  (see Eq. (13)). Only when this primary objective is fully achieved, meaning when the sum of deficits is equal to zero, the secondary objective is relevant. This secondary objective forces the model to maintain the highest water depth of water stored in the soil at the end of the irrigation season by minimizing the difference between the depth of water stored in the soil for sector  $j$  for Field Capacity conditions ( $S_{FC}$ ) and the actual water stored at the end of each period  $k$   $S_j^k = (S_j^{k-1} + Rg_j^k - N_j^k)$  (Eq. (13)).

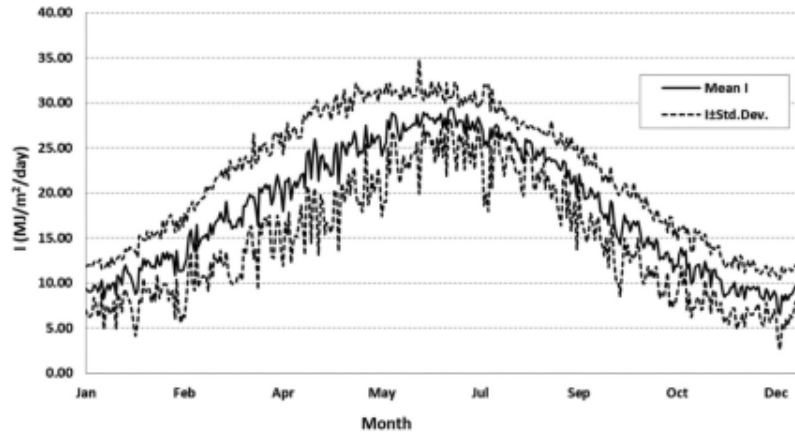
$$F = \sum_{k=1}^{nkp} F^k$$

$$F^k = M \sum_{j=1}^{jmax} D_j^k + \sum_{j=1}^{jmax} [S_{FCj} - (S_j^{k-1} + Rg_j^k - N_j^k) - D_j^k] \quad (13)$$

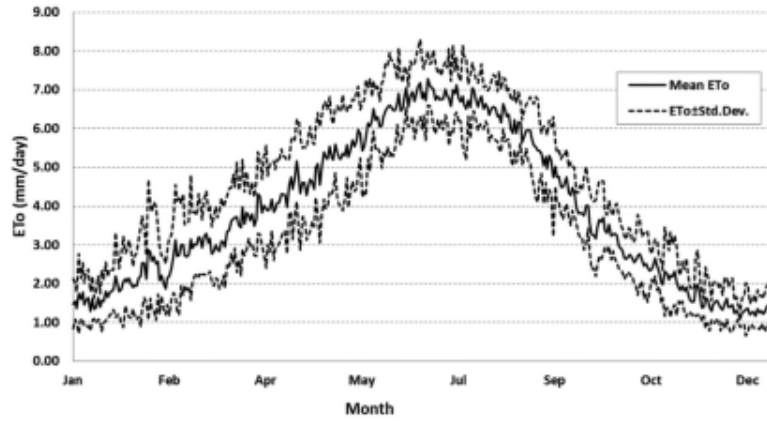
Where:  $M$  is the penalty function and  $D_j^k$  is the irrigation deficit for sector  $j$  during time period  $k$ . This deficit is given by the following set of equations:

$$D_j^k = S_{RAWj} - S_j^{k-1} - Rg_j^k + N_j^k \text{ if } D_j^k \geq 0$$

$$D_j^k = 0 \text{ if } D_j^k < 0 \quad (14)$$



(a)



(b)

Fig. 5. Evolution of the daily solar irradiation (a) and  $ET_0$  in the study area (b) (Period: 2002–2016).

The irrigation deficits ( $D_j^k$ ) must always be either equal to or higher than zero.

The gross irrigation depth applied to sector  $j$  during period  $k$  ( $R_{Gj}^k$ ) is expressed as a function of the decision variables ( $n_{im}^k$ ), as depicted in Eq. (12).

The minimization of the objective must consider a set of restrictions.

2.4.2. Restrictions

a) Available time restrictions:

These are a set of  $n_c$  restrictions for every time period (Eq. (15)). These restrictions guarantee that the sum of operating hours for every irrigation combination does not exceed the available duration of each power interval.

$$\begin{aligned}
 n_{11}^k &\leq d_1^k \\
 n_{12}^k + n_{22}^k &\leq d_2^k \\
 n_{13}^k + n_{23}^k + n_{33}^k &\leq d_3^k \\
 &\vdots \\
 \sum_{m=1}^{m=nc} n_{im}^k &\leq d_{ic}^k
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

b) Maximum and minimum soil water capacity restrictions:

$$S_{RAWj} \leq S_j^k = S_j^{k-1} + \left( \sum_{l=1}^{l=ms} a(l,j) \cdot \sum_{m=1}^{m=nc} n_{im}^k \right) \cdot \frac{q_l}{A_j} - N_j^k + D_j^k \leq S_{FCj}
 \tag{16}$$

Eq. (16) imposes two restrictions per sector; thus, there is a total of  $2 n_s$  restrictions.

A specific linear problem defined by Eqs. (13)–(16) must be stated for every irrigation period  $k$ . In order to solve the complete problem for the  $n_p$  periods in which the irrigation season is decomposed, the set of

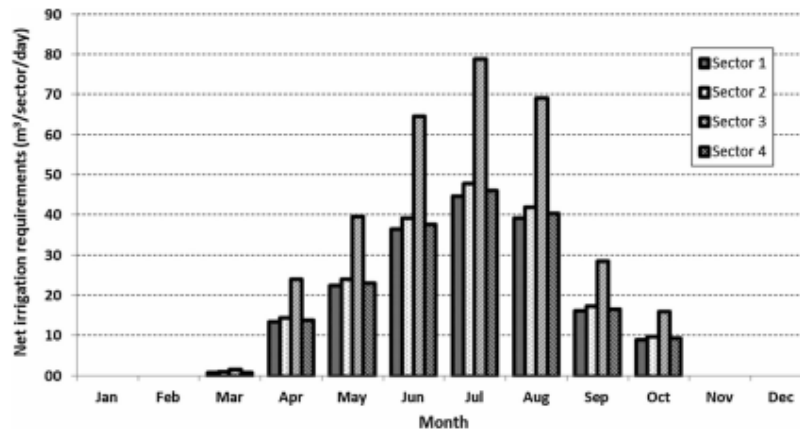


Fig. 6. Calculated mean net irrigation requirements per sector during the study period.

linear problems should be solved. Fortunately, the problem can be solved sequentially for every period ranging from 1 to  $n_p$  and it is not necessary to consider all the equations simultaneously.

After solving the Linear Programming Problem, if in a specific period the sum of deficits is not equal to zero, the irrigation water requirement of the crop in this specific period is not fully satisfied, thereby violating the imposed restrictions. This situation can be due to two different reasons:

The PV does not provide enough power to satisfy the irrigation requirements. To avoid this situation, the algorithm reinitializes, increasing the PV peak power installed.

The irrigation system lacks the capacity to supply the volume of water required. This may be due to insufficient power in the pumping system, insufficient diameters in the pipes of the network or reduced discharge capacity of the emitters. This situation implies redesigning the irrigation system before restarting the algorithm.

The algorithm also provides the water depth stored in the soil at the end of the irrigation season, which is a variable that should be considered when making calculations for the following irrigation season.

If the outcome of the algorithm is successful (sum of deficits equal to zero, meaning irrigation needs have been completely satisfied), the design of the PV irrigation system can be considered feasible. In this case, the matrix  $H$  of working hours for every period, combination and power interval provides the automated system with the optimum rules of operation required to manage the PV system.

## 2.5. Case study

### 2.5.1. PV system input data

A case study was proposed with the aim of testing the developed methodology. The model was applied to the design of a PV irrigation system for a real olive orchard, located in the municipality of Tabernas in the province of Almería (southeast of Spain). We chose this region as it is the driest area in the Mediterranean basin and the crop conditions are thus more restrictive than in other similar locations. The study area has a Mediterranean semi-arid climate, with an average annual rainfall of 260 mm and an extensive dry period during the summer months. Average monthly temperatures range from 8 °C in January to 26 °C in July, which means that winters are mild, with a very low risk of frost since absolute minimum temperature is above 0 °C. The average wind speed is about 2 m/s, and the relative humidity has a monthly average

of 60%, with minimum values in the warmer months.

The climate of this region is characterized by a high number of sunlight hours, making it suited to using photovoltaic (PV) energy systems to irrigate crops. Olives are one of the most widespread crops in the Mediterranean basin. Their contribution to the local economy of many areas is of paramount importance. Traditionally, olives are cultivated under rainfed conditions, however, many studies have shown that the application of irrigation water results in a significant increase in yield and considerably reduces the problem of alternate bearing [29]. For this reason, there has recently been an enormous increase in irrigated olive land area using drip irrigation systems.

The scheme of the farm is shown in Fig. 4.

The PV system is located at 37° 06' North latitude and 02° 18' Western longitude, at an elevation of 597 m above sea level. The tilt angle of the PV cells is 20°. Its azimuth is 0° and the soil albedo is 0.2.

### 2.5.2. Crop data and water requirement calculation.

The reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) was calculated using the Penman-Monteith equation [25]. The irrigation water requirements were calculated from actual climatic data taken from the Tabernas agroclimatic station belonging to the network of agroclimatic stations of the Government of Andalusia. This station is located at 37°05' North latitude and 02° 18' Western longitude, at an elevation of 435 m above sea level. It is equipped with rainfall, temperature, radiation, air humidity and wind speed sensors.

The  $K_c$  values for well-developed olive trees were taken from those proposed by Fereres et al. (2011), which were obtained for the conditions of a dry (less than 400 mm) Mediterranean climate. Finally, for sparse crops such as an olive orchard, a reduction coefficient  $K_r$  must be applied. This coefficient reduces the  $ET_c$  depending on the crop density. The equation proposed by Steduto et al. [30] and recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) was used in this work:

$$K_r = -0.00012 \cdot SC^2 + 0.0226 \cdot SC \quad (17)$$

where:  $SC$  is the ground canopy cover fraction (dimensionless) (see Table 1).

The olive orchard (*Olea Europea*, var. *Picual*) was already in existence and was approximately 15 years of age. Its agronomic characteristics are summarized in Table 2 for every irrigation sector.

### 2.5.3. Soil data

The most common type of soil in the area is a calcareous Cambisol

**Table 5**  
Irrigation combinations for the case study, their associated pumping head, discharge, required and PV power along with the valve-opening matrix A, for the three alternatives analyzed, H1 (a), H2 (b) and H3 (c).

G <sub>i</sub>	H <sub>o,i</sub> (m)	Q <sub>o,i</sub> (L/s)	P <sub>i</sub> (W)	P <sub>PV,i</sub> (W)	Sector			
					1	2	3	4
<b>(a)</b>								
1	0.3	2.2	7.2	14.4	0	1	0	0
2	17.4	2.1	350.7	701.4	1	0	0	0
3	19.0	2.1	395.3	790.6	0	0	0	1
4	16.5	3.5	567.2	1134.5	0	0	1	0
5	18.4	4.3	770.1	1540.2	1	1	0	0
6	20.0	4.2	818.8	1637.6	1	0	0	1
7	20.1	4.3	851.2	1702.4	0	1	0	1
8	17.9	5.7	1003.3	2006.6	0	1	1	0
9	19.3	5.6	1055.4	2110.8	1	0	1	0
10	21.9	5.6	1208.8	2417.5	0	0	1	1
11	21.6	6.4	1350.6	2701.3	1	1	0	1
12	21.3	7.8	1621.0	3242.0	1	1	1	0
13	23.7	7.7	1786.9	3573.8	1	0	1	1
14	23.9	7.8	1832.1	3664.1	0	1	1	1
15	26.2	9.9	2536.8	5073.6	1	1	1	1
<b>(b)</b>								
1	0.7	3.3	22.3	44.5	0	1	0	0
2	17.8	3.1	538.6	1077.2	1	0	0	0
3	20.1	3.2	627.0	1253.9	0	0	0	1
4	17.5	4.7	802.6	1605.1	0	0	1	0
5	20.0	6.4	1252.7	2505.4	1	1	0	0
6	22.2	6.3	1360.5	2721.1	1	0	0	1
7	22.3	6.5	1419.9	2839.9	0	1	0	1
8	20.3	8.0	1587.5	3175.0	0	1	1	0
9	21.3	7.8	1619.8	3239.6	1	0	1	0
10	25.3	7.9	1947.0	3894.0	0	0	1	1
11	25.5	9.6	2394.0	4787.9	1	1	0	1
12	25.2	11.1	2732.6	5465.2	1	1	1	0
13	28.9	10.9	3101.8	6203.5	1	0	1	1
14	29.2	11.2	3196.3	6392.7	0	1	1	1
15	33.9	14.3	4739.0	9477.9	1	1	1	1
<b>(c)</b>								
1	1.9	4.4	82.9	165.8	0	1	0	0
2	18.4	4.1	740.2	1480.3	1	0	0	0
3	21.6	4.2	895.9	1791.8	0	0	0	1
4	18.7	5.9	1074.5	2148.9	0	0	1	0
5	22.1	8.5	1842.6	3685.2	1	1	0	0
6	25.0	8.4	2047.9	4095.8	1	0	0	1
7	25.3	8.6	2146.3	4292.6	0	1	0	1
8	23.7	10.0	2319.4	4638.7	1	0	1	0
9	23.3	10.3	2341.3	4682.7	0	1	1	0
10	29.6	10.1	2927.0	5854.1	0	0	1	1
11	30.8	12.8	3845.8	7691.6	1	1	0	1
12	30.2	14.4	4259.0	8518.0	1	1	1	0
13	35.6	14.2	4962.9	9925.7	1	0	1	1
14	36.1	14.5	5135.5	10271.0	0	1	1	1
15	44.1	18.6	8040.5	16081.0	1	1	1	1

with a sandy loam texture and with high stone content. Due to the semiarid climate of the area, soils are not well developed and the bedrock is relatively close to the surface. An effective rooting depth of 1 m was considered to account for these circumstances. The soil used in this work for all sectors has an average soil moisture ( $\theta$ ) of 0.15 at field capacity and 0.05 at permanent wilting point, which is defined as the minimal soil moisture below which a plant wilts and can no longer recover its turgidity when placed in a saturated atmosphere for 12 h. Taking these data into account, the stored water depths were the following:  $S_{FC} = 150$  mm,  $S_{RAW} = 100$  mm and  $S_{PWP} = 50$  mm. This means an effective depth of water stored in the soil equals 50 mm. We assumed that the soil is at field capacity at the beginning of the year.

**2.5.4. Irrigation system data**

Three different emitters' configurations (H1, H2 and H3), depending on the applied discharge per tree, were analyzed. Alternative H1 features the lowest discharge per tree and the longest irrigation time, whereas H3 displays the highest discharge and the shortest time. The discharge of the emitters in each alternative is provided in Table 3. Said table also provides the flowrate for every irrigation sector, which is dependent on the discharge per tree and the number of trees per sector, which in turn depends on the area of the sector and the tree spacing.

The on-farm water distribution network is composed of four links. The material of the pipeline is PVC with a working pressure of 6 atm. (Relevant data about the network are included in Table 4.) It is a linear network composed of 4 links. The pumping station is located at the head of the network. Water is taken from an open-air reservoir and the elevation of the water table is 597 m above sea level. The local head losses at the head of the irrigation system were calculated considering an equivalent length of pipe of 690 m. Overall efficiency of the system encompassing the pump efficiency, inverter efficiency and PV array efficiency was assumed equal to 0.5. In this research, pumping efficiency was considered constant since pumps are supposed to be driven by variable speed motors.

**3. Results**

**3.1. Climatic conditions and irrigation requirements**

Due to the stochastic nature of solar energy, the model was applied to a series of consecutive years ranging from 2002 to 2016 in order to account for the climatic variability. Fig. 5 shows the evolution of the averaged daily values of the mean temperature, radiation, rainfall and calculated  $ET_0$  in the study area. These averaged series were also used in the proposed case study.

Net irrigation water requirements were calculated according to the methodology previously described. Fig. 6 shows the annual distribution of the water requirements per sector.

**Table 6**  
Feasible designs (figures indicate final depth of water stored in the soil in mm) and infeasible solutions (indicating the decade when the restrictions were violated).

PV modules	Peak Power (kWp)	Individual operation			Simultaneous operation		
		H1	H2	H3	H1	H2	H3
10	2.75	Fail. (P. 19)	Fail. (P. 21)	Fail. (P. 18)	100	Fail. (P. 21)	Fail. (P. 18)
11	3.03	Fail. (P. 19)	Fail. (P. 21)	Fail. (P. 20)	128	100	Fail. (P. 20)
12	3.30	Fail. (P. 19)	Fail. (P. 24)	100	137	138	100
13	3.58	Fail. (P. 20)	Fail. (P. 24)	100	144	142	100
14	3.85	Fail. (P. 20)	100	100	150	150	104
15	4.13	Fail. (P. 20)	100	100	150	150	114
20	5.50	Fail. (P. 20)	100	150	150	150	150

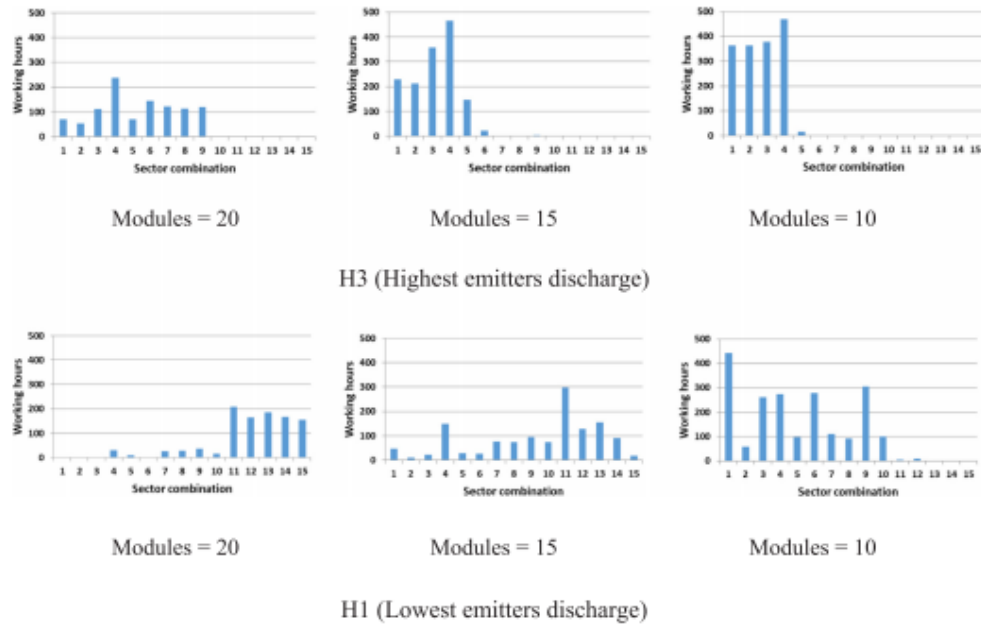


Fig. 7. Distribution of pumping hours per combination for different alternatives and number of modules during the entire irrigation season.

**Table 7**  
Annual values of energy supply to the irrigation sectors and to the whole farm.

Sector	Energy (kWh)
S1	259.79
S2	0.00
S3	403.86
S4	283.56
Total	947.21

3.2. Irrigation combinations and required power.

Table 5 shows the pumping head and discharge, the net power and the PV power required to irrigate every possible sector combination of the network for the three alternatives analyzed (H1, H2 and H3). The last four columns in this table show the elements of valve-opening array A, which indicate the sectors that are open in each combination.

**Table 8**  
EUE and energy loss values for every scenario and number of modules.

N° Modules	EUE (%)			Energy losses (kWh)								
	Individual sectors			Simultaneous sectors			Individual sectors			Simultaneous sectors		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3	H1	H2	H3
10				18.40%						419.1		
11				16.80%		16.80%				427.3		427.3
12			15.40%	15.40%	15.40%	15.40%			434.5	434.5	434.5	434.5
13			14.20%	14.20%	14.20%	14.20%			440.7	440.7	440.7	440.7
14		13.20%	13.20%	13.20%	13.20%	13.20%		445.8	445.8	445.8	445.8	445.8
15		12.30%	12.30%	12.30%	12.30%	12.30%		450.4	450.4	450.4	450.4	450.4
20		9.20%	9.20%	9.20%	9.20%	9.20%		466.3	466.3	466.3	466.3	466.3

3.3. Results of the model.

The model was applied to analyze the optimal management of the case study. The model was executed for two contrasting hypotheses. The first hypothesis intended to test the system when irrigation sectors operate successively. For this purpose, the maximum number of simultaneous operations was limited to 1. The second hypothesis was conducted to evaluate and compare the performance of the PV system under simultaneous sectors operation. In this case, the maximum number of simultaneous sectors in operation was set to the maximum (4 sectors). The results of the application of the model are summarized in Table 6, which shows the feasible solutions for every calculation hypothesis and number of PV modules (Peak power) of the PV plant. The feasible solutions are highlighted with a dark background. The number of each feasible solution indicates the depth of water stored in the soil at the end of the irrigation season (December, 31th). Infeasible solutions are those with a white background. The text in these cells indicates the number of the time period in which the solution became unfeasible because restrictions were violated.

In this study, PV modules with a unitary power of 275 Wp (Watts Peak) were considered. Simultaneous operation performed better than individual operation since the former only required ten PV modules (2.75 kWp) to satisfy the irrigation needs (hypothesis H1), whereas this number increased to 12 (3.3 kWp) in the case of individual operation (20% higher), but for hypothesis H3. It is interesting to note that for individual operation and 12 PV modules (3.3 kWp), hypothesis H3 was the only feasible whereas for simultaneous operation and the same number of PV modules, all the three hypothesis were successful.

For those solutions in which both hypotheses were feasible, simultaneous operation also performed better because it succeeded in providing the highest depths of water in the soil at the end of the season. This means that simultaneous operation strategy was able to pump a larger amount of water and keep a higher storage of water in the soil. This performance shows that the system is more reliable as it can withstand greater demands for water due to climatic variability or failure events in the system.

It is important to point out that the performance of these two strategies varied as a function of the discharge of the emitters per tree. Simultaneous operation provided the best results when working with reduced discharge values and higher irrigation time per sector. On the contrary, in the case of individual operation, higher discharges per tree were preferable. In fact, the former strategy failed for any number of PV modules (Peak power) in the scenario with the lowest emitters' discharge. These failures were due to a required irrigation time to irrigate all the sectors which was longer than the number of sunlight hours for the period.

Simultaneous operation reduced the cost of the PV plant since the number of required modules is lower than that of individual operation. However, it is necessary to take into account the expected increase in the pumping cost. The design of the on-farm distribution network could also be affected by these strategies. An extension of the proposed model that integrates the optimization of the irrigation network and pumping station would be adequate to obtain an overall optimal design of the system. However, this issue will be left for future research.

In the case of simultaneous operation, the distribution of the pumping hours per combination varies as a function of the available PV power. When enough power is generated, the proposed algorithm prioritizes those combinations that require more power because these combinations irrigate more sectors simultaneously, and, thus, energy is used more efficiently. However, when the available power is lower, the distribution of pumping hours is shifted to the least demanding combinations. This trend is clearly observed in the graphs depicted in Fig. 7. Said figure shows the resulting distribution of pumping hours per sector combination for the three discharge alternatives and number of PV modules (Peak power).

### 3.4. Energy Use Efficiency (EUE)

It is interesting to evaluate the performance of the system not only from a technical or economic standpoint but also from an environmental perspective. Energy losses in the system include the difference between the maximum power that the PV plant could instantaneously deliver, and the actual power delivered. Electronic inverters usually try to match the power taken from PV modules with the system's electric demand. Consequently, a low delivery of PV power corresponds to a low electric power demand, which, in fact, entails a lack of efficiency since the PV modules could have delivered a higher power. Energy losses in the system also include losses in the motor, inverter, pump and in the distribution network. To assess the use of the PV energy, an Energy Use Efficiency (EUE) index was proposed. EUE is an overall performance index that considers the total energy losses in the PV irrigation system and is defined as the ratio of the maximum potential energy that the PV plant could provide depending on the incoming radiation to the energy actually supplied to the irrigation sectors. A high value of EUE indicates an efficient use of the energy, whereas an

EUE value close to zero indicates that the potential PV energy is mostly wasted.

$$EUE = \frac{E_i}{E_{PV}} \quad (18)$$

where:  $E_i$  (kWh) is the energy effectively supplied to the irrigation sectors,  $E_{PV}$  (kWh) is the potential energy generated by the PV system.  $E_i$  can be calculated by applying Eq. (19).

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=m} \gamma \cdot H_{ij} \cdot V_j}{3600000} \quad (19)$$

where:  $V_j$  ( $m^3$ ) is the volume of annual irrigation water supplied to sector  $j$ ,  $H_{ij}$  (m) is the required energy head and  $\gamma$  ( $N/m^3$ ) is the specific weight of the water. This energy is constant for all the analyzed scenarios. Calculated values are given in Table 7.

The gross energy generated by the PV plant is linearly related to the number of modules. The annual amount of energy generated by one single module is 513.6 kWh. Calculated EUE values for the feasible solutions are given in Table 8.

As shown in the table, the maximum EUE value achieved by the individual strategy was 15.4% (434.5 kWh of energy lost), while the simultaneous system operation increased this value to 18.4% (419.1 kWh of energy lost). The latter strategy provided a 3% higher EUE than individual operation, which represents an energy saving of 15.4 kWh. These EUE values cannot be considered low since maximum potential EUE values are expected to be considerably lower than 50%, based on the fact that the global efficiency of the pump-motor-inverter was assumed equal to 0.5 and the unavoidable head losses in the system head and distribution network must also be taken into account. However, EUE values for a PV irrigation system that pump water to a storage tank are expected to be slightly higher than those obtained by a direct pumping PV system, because if enough storage volume is available, the system can operate and store water (and consequently energy) even when plants do not require irrigation. One way to increase these EUE values is to combine the strategies presented in this work with the use of non-compensating emitters in those systems where uniformity is not compromised.

## 4. Conclusions

Extensive use of direct PV irrigation requires new models and tools that consider the stochastic temporal fluctuation of available solar energy. There is a lack of analytical models in the literature devoted to the optimal design and management of a multisector irrigation farm which features different combinations of sectors operating simultaneously according to incoming solar energy. An innovative model based on a robust Linear Programming approach was implemented in order to optimize the scheduling and operation of Standalone Direct Pumping PV Irrigation systems. The proposed model makes it possible to simultaneously operate several irrigation sectors to take advantage of the power produced by the PV plant.

The operation strategies proposed in this work affected both the hydraulic and agronomic design of the irrigation system. Variables such as the number and size of the irrigation sectors, the discharge of the emitters and the irrigation application time, must be considered as they vary the demand of energy for pumping water and, consequently, the overall performance of the system.

Simultaneous operation reduced the cost of the PV plant since the number of required PV modules (Peak power) is lower than that for individual operation. In the case of individual operation, the best results were found for higher emitter discharge values and lower irrigation time per sector (Case H1), whereas for simultaneous operation, it is preferable to use lower emitter discharge and higher irrigation time per sector.

The simultaneous operation also overcame the individual operation

scenario in terms of Energy Use Efficiency (EUE) since 18.4% of the PV energy was effectively delivered to the irrigation sectors (15.4% for individual operation).

It has been demonstrated that the optimization of a direct pumping standalone irrigation system implies considering both PV and irrigation systems simultaneously. These findings open new promising research lines. Future research should be focused on coupling both the optimization model developed in this work with a hydraulic model of the irrigation water distribution network, able to select the optimal combination of pumps and pipe diameters in order to perform the optimal design of the whole system.

#### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Acknowledgements

We acknowledge the support of the Spanish Ministry for Science, Innovation and Universities program "RETOS INVESTIGACIÓN" under the project RIDESOST AGL2017-85857-C2-1-R.

#### References

- [1] Hamidat A, Benyoucef B, Hartani T. Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions. *Renew Energy* 2003;28:1081–96.
- [2] Qossier I, Steinbrecht D. Photovoltaic systems: A cost competitive option to supply energy to off-grid agricultural communities in arid regions. *Appl Energy* 2010;87:427–35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.012>.
- [3] Yahyaoui I, Salem S, Kamoun MBA, Tadeo F. A proposal for off-grid photovoltaic systems with non-controllable loads using fuzzy logic. *Energy Convers Manage* 2014;78:835–42. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.091>.
- [4] Yahyaoui I, Chaabene M, Tadeo F. Energy management for photovoltaic irrigation with a battery bank. *Int J Energy Optimiz Eng (IJEDE)* 2015;4(3):18–32. <https://doi.org/10.4018/IJEDE.2015070102>.
- [5] Yu Y, Liu J, Wang G, Liu M. Assess the potential of solar irrigation systems for sustaining pasture lands in arid regions – A case study in Northwestern China. *Appl Energy* 2011;88:3176–82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.028>.
- [6] Yahyaoui I, Chaabene M, Tadeo F. An algorithm for sizing photovoltaic pumping systems for tomatoes irrigation. In: 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Presented at the 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2013. p. 1089–95. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749015>.
- [7] Carroquino J, Duflo-López R, Bernal-Aguasín JL. Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops. *Renew Energy* 2015;76:566–74. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.069>.
- [8] Hamidat A, Benyoucef B. Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage. *Energy Policy* 2009;37:1489–501. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.014>.
- [9] Reza J, García-Manzano A, Martínez J. Optimal pumping scheduling model considering reservoir evaporation. *Agric Water Manage* 2015;148:250–7.
- [10] López-Laque R, Martínez J, Reza J, Ruiz R. Análisis de viabilidad y gestión del riego en invernaderos mediterráneos con energía solar fotovoltaica. *Ribagua* 2017;1–10. <https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1332806>.
- [11] Campaña PE, Li H, Yan J. Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. *Appl Energy* 2013;112:635–45. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.073>.
- [12] Gao X, Liu J, Zhang J, Yan J, Bao S, Xu H, et al. Feasibility evaluation of solar photovoltaic pumping irrigation system based on analysis of dynamic variation of groundwater table. *Appl Energy* 2013;105:182–93. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.074>.
- [13] Posadillo R, López Laque R. A sizing method for stand-alone PV installations with variable demand. *Renew Energy* 2008;33:1049–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.06.003>.
- [14] Yahyaoui I, Yahyaoui A, Chaabene M, Tadeo F. Energy management for a stand-alone photovoltaic-wind system suitable for rural electrification. *Sustain Cities Soc* 2016;25:90–101. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.12.002>.
- [15] Zhang J, Liu J, Campaña PE, Zhang R, Yan J, Gao X. Model of evapotranspiration and groundwater level based on photovoltaic water pumping system. *Appl Energy* 2014;136:1132–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.045>.
- [16] Campaña PE, Li H, Zhang J, Zhang R, Liu J, Yan J. Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation. *Energy Convers Manage* 2015;95:32–41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.066>.
- [17] Benlarbi K, Mokrani I, Nait-Said MS. A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system. *Sol Energy* 2004;77:203–16. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.025>.
- [18] Mérida A, Fernández I, Camacho E, Montesinos P, Rodríguez JA. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *J Cleaner Prod* 2018;175:870–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.093>.
- [19] López-Laque R, Reza J, Martínez J. Optimal design of a standalone direct pumping photovoltaic system for deficit irrigation of olive orchards. *Appl Energy* 2015;149:13–23.
- [20] Reza J, Torrente C, López-Laque R, Martínez J. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. *Renew Energy* 2016;85:1143–54.
- [21] Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal process*. third ed. Wiley, John Wiley & Sons; 2006.
- [22] Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation—correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Sol Energy* 1979;22(2):155–64.
- [23] Reza J, López R. Chapter 9 - Design Principles of Photovoltaic Irrigation Systems. In: Yahyaoui I, editor. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. Elsevier; 2018. p. 295–333. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812959-3.00009-5>.
- [24] Juana I, Losada A, Rodríguez I, Sánchez R. Analytical relationships for designing rectangular drip irrigation units. *J Irrigat Drain Eng*. ASCE 2004;130(1):47–59.
- [25] Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO. Roma; 1998.
- [26] Dastane, N.G. 1976. Effective rainfall in irrigated agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 25. Rome.
- [27] Lamaddalena, N., Sagaduy, J.A., 2000. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. Irrigation and Drainage Paper N° 59. FAO. Roma.
- [28] Glasnovic Z, Margeta J. A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Sol Energy* 2007;81:904–16. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.11.003>.
- [29] Martínez J, Reza J. Water use efficiency of surface drip irrigation versus an alternative subsurface drip irrigation method. *J Irrig Drain Eng* 2014;140(10):04014030.
- [30] Steduto, P., Hsiao, T.C., Ferreres, E., Raes, D. 2012. Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage paper 66. FAO. Rome.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES







## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

- ✓ Con relación a la estimación de la irradiancia a partir de los datos de heliofanía de la estación de La Teodomira de la provincia de Manabí en la Costa de Ecuador, mediante la ecuación de Angstrom-Page, podemos concluir que:

Los valores  $a$  y  $b$  de la ecuación están en los rangos aceptables. Dichos valores y los valores de los coeficientes de determinación de las ecuaciones de regresión ( $R^2$ ) fueron similares en ambas estaciones (seca y húmeda). Por lo tanto, se puede aplicar la ecuación propuesta en este trabajo puede usarse satisfactoriamente para la estimación de la radiación global en la región costera de Ecuador durante todo el año.

- ✓ En relación con el potencial empleo de plásticos fríos en unidades experimentales, como base para su uso en cubiertas de invernadero en la región costera de Ecuador, podemos concluir que:

El análisis óptico nos muestra una disminución de la transmitancia y la absorbancia de la película fría en comparación con la película estándar, que redundaría en una disminución de la temperatura respecto al empleo del plástico estándar y por lo tanto consideramos que el uso de películas frías puede ser una alternativa interesante en regiones tropicales para enfriar las unidades experimentales sin costosos sistemas de enfriamiento.

- ✓ En relación a la optimización del uso extensivo del riego fotovoltaico directo podemos concluir que:

Requiere nuevos modelos y herramientas que consideren la fluctuación temporal estocástica de la energía solar disponible. Hay una falta de modelos analíticos en la literatura dedicada a la diseño y gestión óptimos de una finca de riego multisectorial que presente diferentes combinaciones de sectores que operan simultáneamente según la energía solar entrante. En este trabajo, se implementó un enfoque robusto de programación lineal con el fin de optimizar la programación y el funcionamiento del bombeo directo autónomo en sistemas de riego fotovoltaicos.

El modelo propuesto permite operar simultáneamente varios sectores de riego para aprovechar la energía producida por la planta fotovoltaica. Las estrategias de operación propuestas en este trabajo afectaron tanto al diseño hidráulico como agronómico del sistema de riego. Variables como el número y el tamaño de los sectores de riego, la descarga de emisores y el tiempo de aplicación del riego, deben ser considerados para adecuar la demanda de energía para bombear agua y, en consecuencia, el rendimiento general del sistema. La operación simultánea redujo el costo de la planta fotovoltaica ya que el número de módulos fotovoltaicos necesarios (potencia máxima) es menor que en el de cada operación individual. En el caso de una operación individual, los mejores resultados se encontraron para valores de descarga de emisor más altos y menor tiempo de riego por sector (Caso H1), mientras que, para una operación simultánea, es preferible

utilizar una descarga de emisor más baja y un tiempo de riego más alto por sector. La operación simultánea también superó a la operación individual en términos de Eficiencia en el Uso de Energía (EUE) ya que el 18,4% de la energía se utilizó en los sectores de riego en relación con el 15,4% empleados para la operación individual.

Se ha demostrado que la optimización de un bombeo directo del sistema de riego autónomo implica considerar tanto la energía fotovoltaica como el riego. Estos hallazgos abren una nueva línea de investigación prometedora. Las investigaciones futuras deberían centrarse en acoplar tanto el modelo de optimización desarrollado en este trabajo con un modelo hidráulico de la red de distribución de agua de riego, capaz de seleccionar la combinación óptima de bombas y diámetros de tubería para realizar el óptimo diseño de todo el sistema.

Como conclusión general hay que decir que hemos puesto a punto una herramienta robusta y útil para la estimación de la irradiancia que juntamente con los datos climáticos y los plásticos utilizados constituyen un buen precedente para seguir trabajando en el desarrollo tecnológico de la horticultura intensiva bajo plástico en la región Costa de Ecuador. El uso eficiente de la energía solar fotovoltaica mediante los modelos propuestos, puede ser la clave del éxito del sector.

## CAPÍTULO 7

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS





## CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Ghany, A. M., Al-Helal, I. M., Alzahrani, S. M., Alsadon, A. A., Ali, I. M. y Elleithy, R. M. 2012. Covering materials incorporating radiation-preventing techniques to meet greenhouse cooling challenges in arid regions: a review. *The Scientific World Journal*, 1-11.
- Almorox, J., Benito, M. y Hontoria, C. 2008. Estimation of global solar radiation in Venezuela. *Interciencia*, 33:280-283.
- Alpi, A. y Tognoni, F. 1999. Cultivo en invernadero. Ed. Mundi-Prensa. Madrid
- Angström, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc*, 50:121-125.
- Arredondo, E. 2018. Estudio de las condiciones agroclimáticas para evaluar la viabilidad de la producción de hortalizas bajo condiciones c en una zona tropical del Ecuador. Trabajo de Fin de Grado.
- Bailey, B.J.R., Montero, J.I., Biel, C., Wilkinson, D., Anton, A. y Jolliet, O. 1993. Transpiration of ficus benjamina: comparison of measurements with predictions of the Penman-Monteith model and a simplified version. *Agric. and Forest Meteorology*, 65:229-243.
- Baille, A. 1999. Greenhouse structure and equipment for improving crop production in mild winter climates. *Acta Horticulturae*, 491: 31-47.
- Bouzo, C. A., Pilati, R., Favaro, J. C. y Gariglio, N. F. 2003. Cultivo de tomate en invernadero: alternativas para el control de temperaturas extremas. *Revista IDIA*, 21:137-141.
- Callejón-Ferre, A.J., Manzano-Agugliaro, F., Díaz-Pérez, M., Carreño-Ortega, A. y Pérez-Alonso, J. 2009. Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouses conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7: 41-49.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Castilla, N. 2007. Invernaderos de plástico: Tecnología y manejo (2nd ed.). MundiPrensa Libros, Madrid.
- Cermeño, Z. S. 2011. Guía Práctica del Empleo de Materiales de Plásticos en Agricultura y Ganadería. España: Zoilo Serrano Cermeño.
- Ckrarup, C. 2008. El Destino de la Horticultura. Facultad de agronomía e Ingeniería Forestal.
- Cockshull, K.E., Graves, C.J. y Cave, C.R.J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomato. *Journal Horticultural Science*, 67:11-24.

- Collares-Pereira M. y Rabl A. 1979. The average distribution of solar radiation - Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, 22:155-164.
- CONELEC. 2008. Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica. Quito. Ecuador.
- Da Silva, M. B. P., Escobedo, J. F., Rossi, T. J., dos Santos, C. M., y da Silva, S. H. M. G. 2017. Performance of the Angstrom-Prescott Model (AP) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 160:11-23.
- De Pedro, L. 2015. Invernaderos en regiones tropicales y sub-tropicales. Balance energético, diseño y manejo del ambiente físico. Retrieved from Facultad de la Producción y el Medioambiente (Universidad Nacional de Formosa en convenio con el Gobierno de la Provincia – Instituto Universitario de Formosa, Laguna Blanca): <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/bitstream/handle/11185/769/TFL.pdf?sequence=1>
- Díaz T., Espí G., Fontecha A., Jiménez J.C., López J. y Salmerón A. 2001. Los filmes plásticos en la producción agrícola. Ed. Mundi Prensa.
- Donoso, J. C. 2010. Atlas Publiometrico del Ecuador. Montevideo Uruguay: UNESCO.
- Espí, E. 2012. Materiales de cubierta para invernaderos. En: Cuaderno De Estudios Agroalimentarios, Ed. Cajamar. pp. 71-88.
- N. Steiner y Chapuis, D. 2013. Angular position sensor for space mechanisms. In Proc. ESMATS, pp. 1–8.
- FAO. 2000. Control del medio ambiente. El Cultivo Protegido En Clima Mediterráneo. FAO Dirección de Producción y Protección Vegetal 90. 313 pp.
- FAO. 2009. La Agricultura mundial en perspectiva del año 2050. Secretaría del Foro de Alto Nivel de Expertos - Cómo alimentar al mundo en 2050, 4. Retrieved from [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\\_papers/Issues\\_papers\\_SP/La\\_agricultura\\_mundial.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf).
- FAO. 2013. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops; Principles for Mediterranean climate areas. Rome: FAO.
- FAO. 2015. Horticultura y otros cultivos. Obtenido de Desarrollo Institucional Para la Inversion: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/rlc/utf017arg/neuquen/DT\\_12\\_Horticultura\\_y\\_otros\\_cultivos.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rlc/utf017arg/neuquen/DT_12_Horticultura_y_otros_cultivos.pdf)
- FAO. 2018. Organizaciòn de las Naciones Unidas para la Alimentaciòn y la Agricultura. Obtenido de La Horticultura y la Fruticultura en el Ecuador: <http://www.fao.org/search/es/?cx=018170620143701104933%3Aqq82jsfba7w&q=horticultura+en+Ecuador&cof=FORID%3A9&siteurl=www.fao.org%2Fcountryprofiles%2Findex%2Fes%2F%3Fiso3%3DECU&ref=www.fao.org%2Fcountryprofiles%2Fgeographic-and-economic-groups%2Fes%2F&ss=7>

- Francescangeli, N., Ferratto, J., Rosania, A. y Levit, H. 1992. Efecto del blanqueado, sombreado y aspersión de agua sobre techo, en la temperatura y otros parámetros climáticos en invernaderos, durante el período estival. In: III International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates. 269-294 pp.
- Frederik, J. 1993. Ultraviolet sunlight reaching the Earth's surface: a review of recent research. *Photochemistry and Photobiology*, 57(1):175-178.
- García-Alonso, Y., Espi, E., Salmeron, A., Fontecha, A., Gonzalez, A. y Lopez, J. 2006. New cool plastic films for greenhouse covering in tropical and subtropical areas. In: International Symposium on Greenhouse Cooling. 131-138 pp.
- Garzoli, K.V. y Blackwell, J. 1981. An analysis of the nocturnal skin plastic heat loss from a single greenhouse. *Agricultural Engineering*, 203–214.
- Guzmán, O., Baldión, J. V., Simbaqueva, O., Zapata, H. J., y Chacon, C. 2013. Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 64(1): 60-76.
- Hemming, S. F., Kempkes, N., Braak, V. D., Dueck, T. y Marissen, N. 2006. Greenhouse cooling by NIR - reflection.
- Henao, F. 2000. Plasticultura en el Agro. Obtenido de <http://hoy.tawsa.com/noticias-ecuador/plasticultura-en-el-agro-47071.html>. Consultado el: 3/06/2017.
- Hoffmann, S. y Waaijenber, D. 2002. Tropical and subtropical greenhouses –A challenge for new plastic films. *Acta Hort*, 578:163-171.
- INAMHI. 2013. Atlas Hidrológico y Meteorológico Estudiantil. Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/12/ATLAS-ESTUDIANTIL2.pdf>
- Info, H. 2018. China Produce Mas de la Mitad de Las hortalizas en el Mundo. Horto Info Diario Digital.
- INFOAGRO. (s.f). Los plásticos en la agricultura. materiales de cubierta para invernaderos. Madrid, España.
- Ingeborg Zenner de Polanía, F. P. 2013. Plásticos en la agricultura: beneficio y costo. 150 pp. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/261063517\\_Plasticos\\_en\\_la\\_agricultura\\_beneficio\\_y\\_costo\\_ambiental\\_una\\_revisión](https://www.researchgate.net/publication/261063517_Plasticos_en_la_agricultura_beneficio_y_costo_ambiental_una_revisión).
- INFOAGRO. 2020. Los plásticos en la agricultura. Materiales de cubierta para invernaderos. (2ª parte). [http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/plasticos3.htm](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/plasticos3.htm).
- INOCAR. 2012. CAPÍTULO I: Información General de la República del Ecuador.
- INOCAR. 2018. Informes de Datos Meteorológicos Compilados. Obtenido de <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/boletines/informe-de-datos-meteorologicos>.



- Llenderal, A. 2017. Estudio de métodos de diagnóstico y evaluación de los parámetros nutricionales en sistemas de cultivo hortícola intensivo como base para un manejo más sostenible de la fertirrigación. Tesis doctoral. Universidad de Almería, España.
- Leòn, J. B. 2010. Geografía del Ecuador. Medio natural, población y organización del espacio (Vol. 4). (C. E. Ministerio de Educación, Ed.) Quito: Universidad Andina Simón Bolívar. Obtenido de <https://internationalliving.com/countries/ecuador/ecuador-climate/>
- Lizarzaburu, G. 2016. La península diversifica su producción. Economía local e internacional. Diario El expreso. Recovered on January 15th, 2018. <http://www.expreso.ec/economia/la-peninsula-diversifica-su-produccion-GA389459>.
- López, J.C., Baille, A., Bonachela, S. y Pérez-Parra, J., 2008. Analysis and prediction of greenhouse green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production in a Mediterranean climate. *Biosyst Eng*, 100: 86-95.
- López-Marín, J., González, A., García-Alonso, Y., Espí, E., Salmerón, A., Fontecha, A. y Real, A. I. 2007. Use of cool plastic films for greenhouse covering in Southern Spain. In: International Symposium on High Technology for Greenhouse System Management: Greensys. Acta Horticulturae, 801:181-186.
- López-Marín, J., Gálvez, A., Galindo, A. y González, A. 2009. Materiales plásticos fotoselectivos empleados en la cubierta. *Invernaderos*, 806-808.
- Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Alonso, F.J. y García, M. 2010. Sombreado. In: Manejo del clima en invernadero mediterráneo, Eds Sánchez-Guerrero, M.C., Alonso, F.J., Lorenzo, P. y Medrano, E. IFAPA: Almería. 39-54 pp.
- Luo, W., Stanghellini, C., Dai, J., Wang, X., Feije de Zwart, H. y Bu, C. 2005. Simulation of Greenhouse Management in the Subtropics, Part II: Scenario Study for the Summer Season. *Biosys Eng*, 90:433-441.
- M. G. A. 2002. Plásticos y Medio Ambiente. Ibereoamericana Polimeros, 13.
- Manobanda, D. 2014. Litoral Ecuatoriano Situación Climatológica y Perspectiva. INAMIH.
- Martínez, F. X., Tapia, L., Eito, Sagales, M. y Simoneau, R. 1985. Análisis comparativo del efecto del sombrero fijo y variable sobre el rendimiento de cuatro especies ornamentales cultivadas en umbráculo. In: III Reunión del grupo del Ornamentales de la SECH. 117-125 pp.
- Martínez, F. F. 2011. Hortalizas y Frutas Análisis de la Cadena de Valor en el Departamento de Concepción. Asunción, Paraguay: ACDIVOCA.
- Meca-Abad, D. E. 2013. Evaluación de un plástico fotoselectivo NIR como materia de cubierta de invernadero. Master diss., Universidad de Almería.
- Ministerio de Salud Pública de Ecuador. (2009). Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria. Registro Oficial N° 583.

- Montero J. I., Antón A. y Muñoz, P. (1998). Refrigeración de invernaderos. In: Tecnología de invernaderos II. Curso de Especialización, Ed. Pérez-Parra and Cuadrado. FIAPA, Almería, España. 313-398 pp.
- Montero, J., Antón, A. y Muñoz, P. 2014. Refrigeración De Invernaderos II. Retrieved from ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/36730999\\_Refrigeracion\\_de\\_invernaderos\\_II](https://www.researchgate.net/publication/36730999_Refrigeracion_de_invernaderos_II)
- Moreno, M. 2005. La Platicultura. Una alternativa para mejorar la productividad en el tomate riñón en la década de los noventa en Ecuador. Obtenido de [http://www.puce.edu.ec/economia/docs/disertaciones/2005/2005\\_moreno\\_peralta\\_maria\\_nelly.pdf](http://www.puce.edu.ec/economia/docs/disertaciones/2005/2005_moreno_peralta_maria_nelly.pdf). Consultado el: 10/01/2018.
- MSC, G. 2017. Invernadero. Obtenido de <https://grupomsc.com/blog/invernadero/6-ventajas-del-cultivo-invernadero>.
- Nelson, P.V. 1985. Greenhouse operation and management. Prentice Hall, New Brunswick, NJ.
- Pacheco, A. y Bastida, A. 2011. Agricultura protegida (ventajas y desventajas del uso de invernaderos). Retrieved from <https://tecnoagro.com.mx/revista/2011/no-69/agricultura-protegida-ventajas-y-desventajas-en-el-uso-de-invernaderos>.
- Palma-Pérez, A. 2009. Evaluación de las propiedades ópticas y mecánicas de diferentes cubiertas plásticas para invernadero. Tesis de Grado, Universidad Autónoma Agraria, México.
- Peralta, O. 2014. Invernaderos Tropicales (Vol. 1). Republica Dominicana: CONIAF.
- Pérez-Alonso, J., Pérez-García, M., Pasamontes-Romera, M. y Callejón-Ferre, A.J., 2012. Performance analysis and neural modelling of a greenhouse integrated photovoltaic system. *Renew Sustain Energy*, 16:4675-4685.
- Pérez, M., Teixeira da Silva, J. A. and Lao, M. T. 2006. Light management in ornamental crops. *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology*, 4:683-695.
- Pérez, M. y J.A. Sánchez. 2012. Energías renovables en los invernaderos. Cuadernos de Estudios Agroalimentarios.
- Real, G. S. 2013. Introducción a la producción de hortalizas. Obtenido de Producción de hortalizas para la Republica de Guinea Ecuatorial: <http://www.fao.org/3/a-az120s.pdf>.
- Reca, J., Torrente, C., López-Luque, R. y Martínez, J., 2016. Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. *Renew. Energy*, 85:1143-1154.
- Reho, A. I. 2018. Panorama Mundial del Comercio de Hortalizas en 2018. Obtenido de <https://www.hortalizas.com/home/panorama-mundial-del-comercio-de-hortalizas-en-2018/>

- Risjwick, C. V. 2018. World Vegetable Map 2018: More than Just a Local Affair. Obtenido de Rabobank: [https://research.rabobank.com/far/en/sectors/regional-food-agri/world\\_vegetable\\_map\\_2018.html](https://research.rabobank.com/far/en/sectors/regional-food-agri/world_vegetable_map_2018.html).
- Robinson, J. 2011. Encalado: Productividad en el cultivo de tomate. Retrieved from <https://www.hortalizas.com/cultivos/tomates/encalado-productividad-en-el-cultivo-de-tomate/>
- Ruiz-García, A., López-Cruz, I. L., Arteaga-Ramírez, R. y Ramírez-Arias, J. A. 2015. Tasas de ventilación natural de un invernadero del centro de México estimadas mediante balance de energía. *Agrociencia*, 49:87-100.
- Saavedra Del Real, G. 2013. Producción de hortalizas para la Republica de Guinea Ecuatorial. FAO, Oficina Subregional para África Central. Roma: Food And Agriculture Organization Of The United Nations.
- Salazar, R. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222014000200012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222014000200012&script=sci_arttext)
- Salcedo Rosales, G. A. 2015. Sistemas de protección en la región intertropical cálida de Ecuador. Evaluación mediante el cultivo de *Cucumis sativus*. Universidad de Almería, Almería, España.
- Sandri, M.A., Andriolo, J.L., Witter, M. y Ross, T.D. 2003. Effect of shading on tomato plants grown under greenhouse. *Horticultura Brasileira*, 21:642–645.
- Spark, W. 2018. El clima promedio en Santa Elena. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/18289/Clima-promedio-en-Santa-Elena-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o>.
- USAID. 2005. Global Horticulture Assesment. California, Estados Unidos: University of California, Davis.
- UTN. 2017. La Importancia de la Agricultura en el Ecuador. Obtenido de Ingeniería en Agropecuaria: <http://www.utn.edu.ec/ficaya/carreras/agropecuaria/?p=1091>.
- Valera, D., Molina, F. y Álvarez, A. 2008. Ahorro y eficiencia energética en invernaderos. Instituto para la diversificación y ahorro de energía. Madrid. 59 pp.
- Van Konijnenburg, O. L. 2010. La Horticultura Que No Vemos. Horticultura. Obtenido de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-fyd63\\_horticultura.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-fyd63_horticultura.pdf).
- Vélez-Pereira, A. M., Vásquez, E. V., Barraza Coronell, W. y Agudelo Yepes, D. 2013. Determinación de un modelo paramétrico para estimar la radiación solar.
- Wang, S. y Boulard, L. 2000. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a mediterranean climate. *Agricultural Engineering*, 75:27-38.