



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de título

**EFFECTO DE LA SOMBRA DE UN SISTEMA AGROFOTOVOLTAICO SOBRE
UN CULTIVO DE TOMATES (*Solanum lycopersicum* L.)**

DIEGO IGNACIO CAÑAS HERRERA

Santiago, Chile
2022



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EFECTO DE LA SOMBRA DE UN SISTEMA AGROFOTOVOLTAICO SOBRE
UN CULTIVO DE TOMATES (*Solanum lycopersicum* L.)**

**EFFECT OF THE SHADOW OF AN AGROPHOTOVOLTATION SYSTEM OF A
TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.) CROP**

DIEGO IGNACIO CAÑAS HERRERA

Santiago, Chile
2022





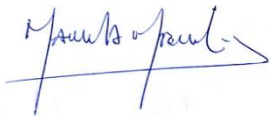
UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EFFECTO DE LA SOMBRA DE UN SISTEMA AGROFOTOVOLTAICO SOBRE
UN CULTIVO DE TOMATES (*Solanum lycopersicum* L.)**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo.

DIEGO IGNACIO CAÑAS HERRERA

		Calificaciones
Profesor Guia Sr. Ian Homer B Ingeniero Agrónomo, Dr.		6,5
Profesores Evaluadores Sr. Ricardo Pertuzé Ingeniero Agrónomo, Dr		5,6
Sra. Marcela Medel M. Ingeniero Agrónomo, Enólogo, M.S. Dr.		5,9

Santiago, Chile
2022

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS.....	4
Objetivos específicos:	4
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Lugar de estudio	5
Implementación experimento	5
Tratamientos	5
Mediciones	6
Variables ambientales	6
Variables del cultivo.....	6
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	7
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
Variables ambientales	8
Radiación incidente:.....	8
Variables del cultivo.....	8
Fotosíntesis potencial.....	8
Potencial hídrico.....	10
Rendimiento	12
RENDIMIENTO ELÉCTRICO	15
CONCLUSIÓN	17
BIBLIOGRAFÍA.....	18

RESUMEN

La agricultura de hortalizas al aire libre en la región de Coquimbo se ve enfrentada constantemente a las altas radiaciones presentes en la zona media y alta de los valles, repercutiendo en un mayor consumo hídrico, pudiendo generar foto inhibición en algunos cultivos, por lo cual se observa un escenario idóneo para la implementación de un sistema productivo agrícola-fotovoltaico, en el cual se plantea el uso de paneles solares ubicados sobre el cultivo, generando distintas zona con regímenes de sombra diarios en los cultivos , entregando la oportunidad de producir bajo condiciones de sombra con menor estrés producido por la foto inhibición, pudiendo reflejarse a la vez un menor consumo de agua. Este trabajo evaluó el efecto de la implementación de un panel fotovoltaico sobre un cultivo de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Trovatore y fueron evaluadas variable morfo-fisiológicas y productivas. Los tratamientos fueron T0: Tratamiento sin sombra, T1: Tratamiento sombra desde 9:30 a 11:30 y T2: Tratamiento sombra desde 11:30 a 16:30. Los tomates recibieron el régimen de sombra desde su trasplante hasta el término del ciclo productivo, generado por la primera helada de otoño. En el modelo utilizado por el agricultor. T1 y T2 presentaron disminución en los potenciales hídricos en contraste al tratamiento testigo. T2 presentó un desfase en los rendimientos de 12 días, mejorando la distribución de los calibres, favoreciendo mayor uniformidad de calibres sobre 200 g, atribuible a la disminución de energía incidente. No se observaron diferencias en el área foliar total por planta, si mayor presencia de flores en el periodo después de la helada atribuible a las mejoras en las condiciones micro-climáticas dentro del cultivo, favoreciendo la presencia de agua y su efecto de regulación térmica. Aunque en términos de producción, T1 presentó la menor producción, en general no existió merma, debido a T2 presentó mayor producción que T0.

Palabras claves: Estrés hídrico, foto inhibición, radiación.

ABSTRACT

Outdoor vegetable agriculture in Coquimbo region is constantly faced with the high radiation present in the middle and upper zone of the valleys, having repercussions in a higher water consumption, being able to generate photo inhibition in some crops, for which an ideal scenario is observed for the implementation of an agricultural-photovoltaic productive system, in which the use of solar panels located on top of the crop are proposed, generating different areas with daily shading regimes in the crops, providing the opportunity to produce under shady conditions with less stress produced by photoinhibition, also being able to reflect a lower water consumption. This work evaluated the effect of the implementation of a photovoltaic panel on cultivated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Trovatore and morpho-physiological and productive variables were evaluated. The treatments were T0: Treatment without shade, T1: Shade treatment from 9:30 to 11:30 and T2: Shade treatment from 11:30 to 16:30. Tomatoes received the shade regime from their planting until the end of the production cycle, generated by the first autumn frost in the model used by the farmer. T1 and T2 decreased their water potentials in contrast to the control treatment. T2 presented a 12-day lag in yields, improving the distribution of the sizes, favoring greater uniformity of sizes over 200 g, attributable to the decrease in incident energy. No differences were observed in the total leaf area per plant, but a greater presence of flowers were observed after the frost period attributable to improvements in the micro-climatic conditions within the crop, favoring the presence of water and its effect of thermal regulation. Although in terms of production, T1 presented the lowest production, in general there was no decrease, because T2 showed higher production than T0.

“Key words”: Water Stress, photoinhibition, radiation.

INTRODUCCIÓN

La región de Coquimbo en el ámbito agrícola se ha visto afectada por años por las sequías y los altos costos energéticos utilizados en la presurización del agua de riego, ya que las aguas superficiales no alcanzan a satisfacer la demanda zonal y se requiere utilizar las aguas subterráneas (Santibáñez, 2018).

La presencia de alta radiación en la zona afecta a que las plantas transpiren de forma más acelerada consumiendo más agua, pudiendo incluso generar estrés térmico en algunos tipos de planta, para lo cual existen distintos métodos para la manipulación del balance energético en el cultivo y la protección de la radiación solar, siendo el uso de sombra que cubran el cultivo uno de los más eficaces (Chávez y Gutiérrez, 2017).

En los años recientes el uso de energías renovables se ha masificado en todo el mundo, específicamente el uso de la energía solar para generar energía eléctrica, siendo los paneles fotovoltaicos lo más utilizado, además en el norte de Chile, al encontrarse los niveles de radiación más altos a nivel mundial, se está invirtiendo cada vez más en estos nuevos sistemas (Bustos *et al.*, 2017).

Pese a que los altos costos de instalación de estos equipos, junto a los costos asociados al terreno donde implementarlos, en un inicio no mostraban un panorama agradable para los pequeños agricultores, por lo cual se plantea la posibilidad de aplicar una asociación de paneles fotovoltaicos en conjunto a los cultivos. Nace el concepto de agro PV que propone el desarrollo de sistemas de energía en base a la tecnología solar fotovoltaica, en combinación armónica y optimizada con la producción agrícola, considerando el montaje de paneles fotovoltaicos mediante una disposición que permita el desarrollo de actividad agrícola, distribuyendo espacialmente los paneles de manera que genere una sombra uniforme sobre el cultivo (Fraunhofer, 2015).

Aún no se cuenta con información estadística decisiva respecto al impacto directo de la menor cantidad de radiación solar en los cultivos, en estudios realizados por Franhoufer (2015) a nivel internacional, obtuvieron resultados favorables para distintas hortalizas, por lo cual se plantea el cultivo de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) para estudiar los impactos que produce la sombra sobre esta hortaliza en la zona de Ovalle, bajo condiciones semi áridas.

Según indica Nangare *et al.* (2016), el cultivo de tomates es susceptible al déficit hídrico en gran parte del desarrollo de la planta, afectando en gran medida el ámbito productivo cuando el estrés hídrico se produce en floración, por lo cual se plantea el uso de sombra para disminuir las excesivas demandas hídricas producidas por el exceso de radiación presente en la zona.

Otros autores como Khapte *et al.* (2019). Demostraron que utilizar un riego controlado en las etapas menos susceptibles del cultivo, será beneficioso para obtener mejores valores

nutricionales dentro de la fruta, debido a la mejor concentración de foto asimilados dentro de ellas, y que se puede complementar con otros sistemas para lograr un manejo sostenible, obteniendo niveles de rendimiento satisfactorios economizando en gran medida el uso del agua.

En estudios realizados en México, en cultivos de tomate presentes en una región con alta incidencia de radiación, se observan bajos rendimientos, producto de que las plantas se foto inhiben, disminuyendo la fotosíntesis potencial que pueden llegar a realizar (Velázquez, 2013).

OBJETIVOS

Determinar el efecto de distintos niveles de sombra ejercidos por el panel fotovoltaico sobre las variables fisiológicas, de crecimiento y rendimiento en cultivo de tomates.

Por lo cual, se presentan dos hipótesis en el estudio las cuales corresponden a que la sombra producida por los paneles fotovoltaicos no presenta disminuciones productivas en el cultivo de tomate y producirá una disminución del consumo hídrico de parte del cultivo.

Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto de la sombra sobre variables fisiológicas a lo largo de la temporada de crecimiento del cultivo tomate.
- Evaluar el efecto de la sombra sobre condiciones hídricas de cultivo.
- Cuantificar el desarrollo vegetativo para distintos momentos de sombra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

El estudio se realizó en la localidad de Rumay, a 25 km al poniente de la ciudad de Ovalle, Región de Coquimbo, a 120 m.s.n.m. En un cultivo de tomates cultivar Trovatore, el cual se enmarca en una rotación hortícola tomate-maíz dulce, regado por un sistema de cintas de goteo de una línea, cubierto con mulch plástico, con un marco de plantación de entre hilera de 1,6 m y 0,5 m sobre hilera, sin sistema de conducción. El régimen de riego y manejos de cultivo fueron realizados y determinados por el productor, aplicando igual medida para todos los tratamientos. El suelo presente en Rumay corresponde a terrazas fluviales con topografía plana, con una clase textural franco arcillo arenosa hasta los 40 cm de profundidad (CORFO, 1964).

Implementación experimento

El ciclo del cultivo fue desarrollado desde el 10 de enero, al 21 de junio de 2019, poniendo término al ciclo productivo del cultivo las heladas ocurridas durante el mes de junio, posteriormente, no se registraron nuevas floraciones, llegando a término solo los frutos desarrollados anteriormente. La estructura de soporte fotovoltaico está diseñada para poder montar 12 paneles poli cristalinos de 270 W (3 kWh en total) conectado a un inversor on grid de 6kWh trifásico. La estructura tiene 12 m de largo y se encuentra a 3,5 m de altura en su punto más bajo permitiendo el paso de los tractores, los paneles se encuentran con una variación de 24° respecto al norte, que generara un régimen de sombra sobre los cultivos.

Tratamientos

El ensayo evaluó la forma en la cual el cultivo se adapta a los cambios inducidos por la presencia de la estructura, la cual genera una sombra homogénea en cada tratamiento que se encuentra bajo el panel, generando un ensayo en el cual se evaluaron 3 regímenes de sombra (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamiento según horario de régimen de sombra

Tratamientos	Hora sombra
T0	Sin sombra
T1	9:30-11:30
T2	11:45-16:30

Los tratamientos fueron seleccionados sin un sistema aleatorizado, se evaluaron 4 unidades experimentales correspondientes a una planta por tratamiento, generando 4 repeticiones, a las cuales se le evaluarán variables fisiológicas. Además para evaluar los parámetros de crecimiento fueron extraídas dos plantas de cada tratamiento, generando dos repeticiones por tratamiento, durante 3 fechas posterior a la cuaja de frutos.

Mediciones

Las evaluaciones se agrupan en radiación incidente; cambios en intercambio gaseoso; desempeño hídrico y crecimiento.

Variables ambientales

Para determinar los cambios en la energía que incide sobre la zona de cultivo se evaluó la radiación incidente en las diferentes ubicaciones de las parcelas seleccionadas.

Radiación incidente ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$): Las condiciones de radiación fotosintéticamente activa (*PAR*), se determinó en cada parcela con un Ceptómetro (Modelo Sun Scan SS-1, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Inglaterra). Se determinaron puntos de cambios de energía en la zona bajo sombra para cada condición (*PARi*), además se determinó la radiación sin interferencia. (*PAR0*), realizando mediciones en horario Am, al medio día solar y Pm.

Variables del cultivo

Fotosíntesis potencial: A las plantas seleccionadas de cada tratamiento se le determinó la fotosíntesis potencial ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), utilizando el equipo de medición infrarroja (Modelo Li 6400, LI-COR Biosciences, Lincoln, USA), que entrega información sobre la respuesta de la planta a la asimilación de CO_2 (López *et al.*, 2016). Para las mediciones, se realizó en tres momentos durante el día: AM, medio día solar (MDS) y PM, realizando la primera el día 26 de marzo del 2019, repitiendo una vez al mes, en días después de riego. La medición se realizó en un brote con carga frutal de cada planta, utilizando una hoja sana expuesta al sol.

Potencial hídrico: Se realizaron mediciones de potencial hídrico xilemático de tallo y hoja (MPa), utilizando una bomba de presión tipo Scholander (Modelo PMS2, PMS Instrument Company, Oregon, Estados Unidos), las mediciones se realizaron en conjunto a las mediciones de fotosíntesis potencial, se seleccionaron 2 hojas sanas expuestas al sol, en la cual, a una de ellas se envolvió con una bolsa de aluminio una hora antes de la medición, para que la planta se encuentre equilibrada y así conocer el estado hídrico en que se encuentra (Zarate, 2015).

Rendimiento: Para determinar la cantidad de materia y la forma en la cual se distribuye la energía a las distintas estructuras que desarrolla la planta, se realizaron muestreos destructivos con la metodología de Grandica y Peña (2015), en tres ocasiones durante la temporada: partiendo el 28 de marzo de 2019 junto a la primera cosecha, luego el 29 de mayo y finalizando el 26 de junio en el periodo post helada. Se seleccionaron 2 plantas completas en cada tratamiento, las cuales fueron divididas en cada uno de sus componentes, para obtener el peso individual (g) de la raíz, tallo, hojas, flores y frutos, además se realizó un conteo del número de frutos y flores, en conjunto a las mediciones, se extrajo una muestra de hojas, que mediante una extrapolación con el programa Photoshop se determinó un estimado de la cobertura total de las hojas (m²). Por último, se determinó la producción de frutos, la cual se realizó en forma escalonada, esperando el 50% de la pinta.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron analizados con un análisis de la varianza (ANDEVA) para las variables fisiológicas y morfológicas, se consideró la fecha de toma de muestra como partición y se comparó entre cada tratamiento y el testigo, como se realizaron gran cantidad de pares de análisis, se realizó una prueba de comparaciones múltiples Bonferroni con un nivel de significancia de 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables ambientales

Radiación incidente: En la Figura 1 se muestra los datos obtenidos de radiación incidente en cada uno de los tratamientos, disminuyendo en gran medida en los horarios donde se encuentra sombreado cada tratamiento, presentando disminuciones de 40 % para T2 y de 10 a 15 % para T1, considerando una menor cantidad de radiación antes del mediodía solar.

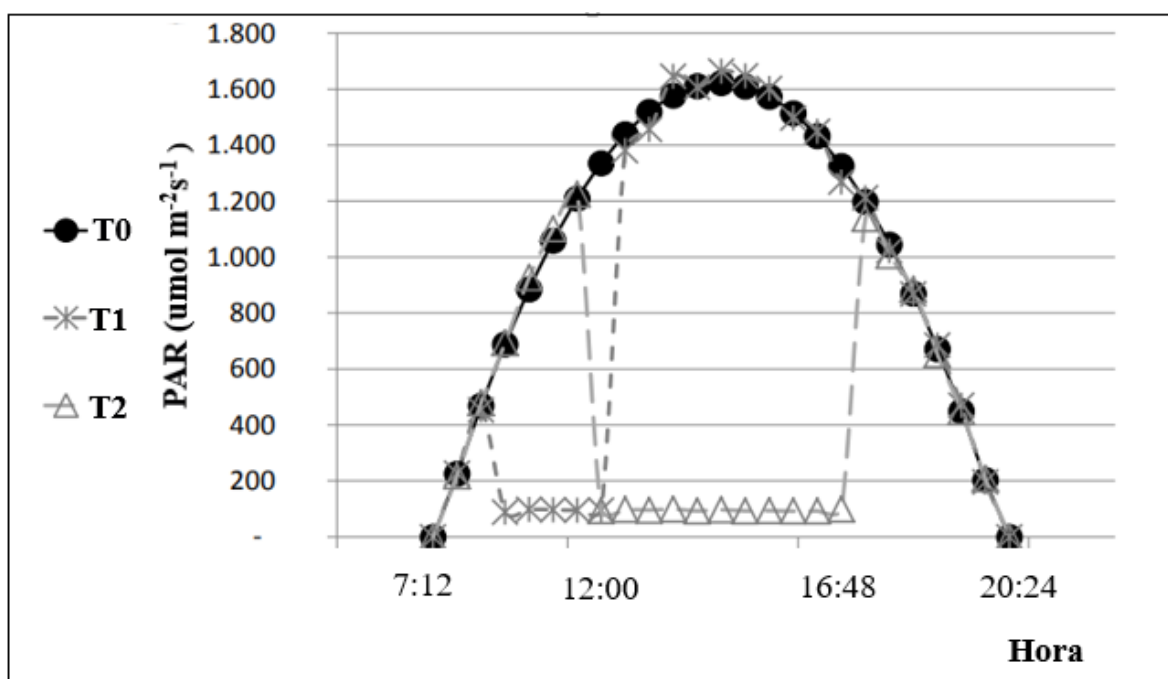


Figura 1. Diferentes niveles de radiación PAR para cada condición.

La disminución de radiación incidente en el cultivo de tomates produce un efecto sobre las plantas a lo largo de la temporada, afectando todas las demás variables que se midieron dentro del ensayo, como indica (Ayala *et al.*, 2011) demuestra que puede ser beneficioso la utilización de sombra, además se conoce que la fotosíntesis neta a nivel foliar se satura con una intensidad de radiación sobre los 1.200 $\text{umol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Zarate, 2015), las cuales se observan en la zona durante los muestreos en el horario PM, momento en que el T2 se encuentra sombreado.

Variables del cultivo

Fotosíntesis potencial: Se evaluó la manifestación de los cambios producidos por la sombra,

en la capacidad fotosintética durante la temporada, midiendo en 3 ocasiones después de floración. Se observa en la Figura 2 que T0 presentó una menor tasa fotosintética en la primera fecha de toma de muestras mientras que T1 y T2 no presentaron diferencias significativas. En la segunda fecha, T0 superó la fotosíntesis potencial de T1 y T2, las cuales siguen sin presentar diferencias entre sí. Para la tercera fecha, T1 presenta los valores más elevados de tasa fotosintética presentando similitud con T0, mientras que T2 presentó los menores valores de tasa fotosintética.

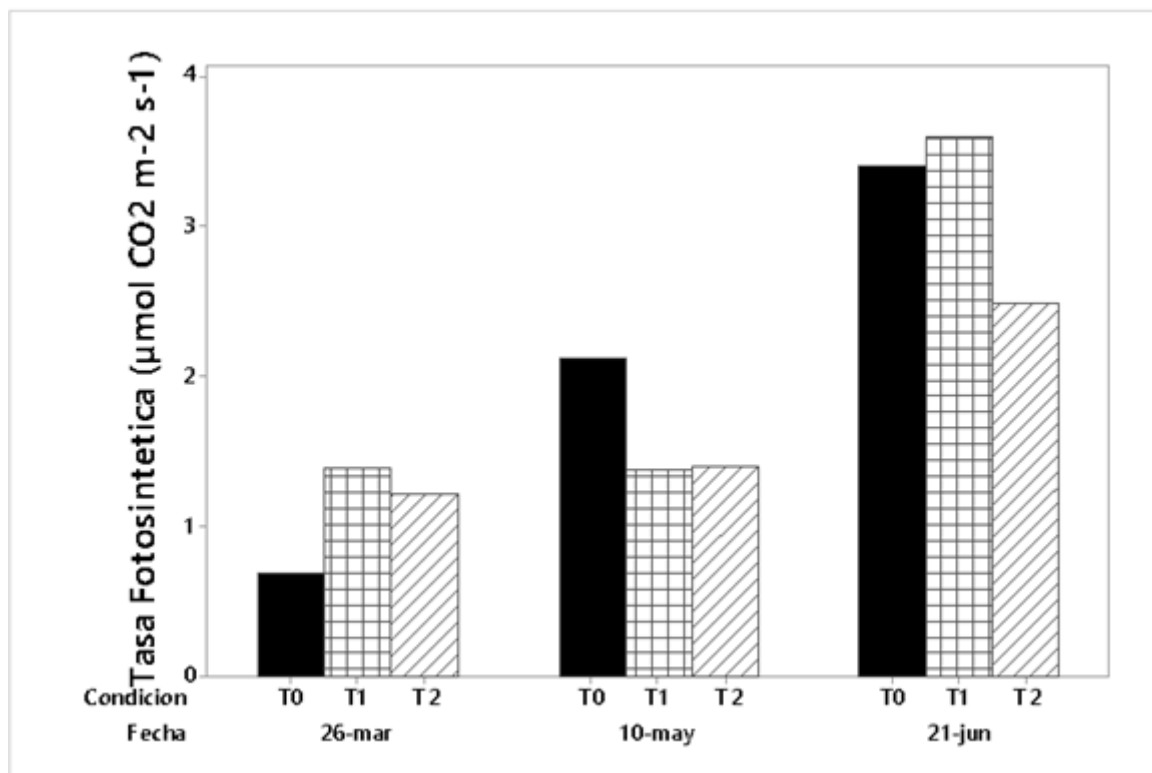


Figura 2. Tasa fotosintética a saturación lumínica de tomate durante el periodo de recolección de fruta.

Para el tratamiento sin sombra se observó el aumento de la tasa fotosintética a lo largo del desarrollo de las plantas, debido a la mayor radiación incidente a la que se exponen las plantas durante el día, los dos tratamientos bajo sombra presentan similitudes, siendo finalmente T1, el tratamiento con sombra en la mañana el que obtuvo los mayores niveles de tasa fotosintética, debido a que se encuentra expuesta a la mayor radiación presente en la tarde como indica la Figura 1, mientras que T2 presentó menor tasa al encontrarse bajo sombra en los momentos del día de mayor radiación, lo cual concuerda con lo que indica López *et al.* (2016), la tasa fotosintética es afectada por los distintos factores ambientales, siendo la disminución de radiación una de las principales afectando directamente al rendimiento final. En la última fecha se observa para T1 una mayor tasa que T0, esta disminución de la tasa fotosintética para T0 se explica al observar el Cuadro 3 donde se ve que T0 presenta mayor

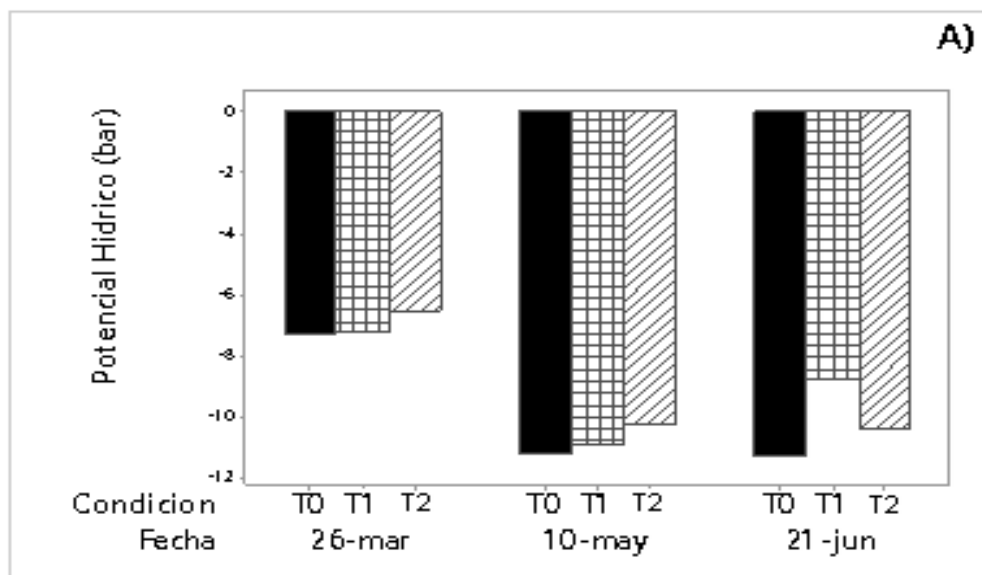
área total, lo cual puede generar que la planta se esté sombreando y parte del área foliar no quedara expuesta a la PAR (Rojas, 2015).

Cuadro 2: Potencial xilemático y potencial de hoja para las 3 fechas según horario.

Horario	TRT	Potencial Xilemático MPa			Potencial hoja MPa		
		26-mar	10-may	21-jun	26-mar	10-may	21-jun
MDS	T1	-0,75 A	-1,15 A	-0,86 B	-0,85 B	-1,16 A	-1,03 A
	T2	-0,66 A	-1,16 A	-0,86 B	-0,75 C	-0,89 A	-1,12 A
	T0	-0,79 A	-1,20 A	-1,14 A	-0,99 A	-1,36 A	-1,21 A
PM	T1	-0,70 A	-1,04 A	-0,89 B	-0,82 AB	-1,02 AB	-1,15 A
	T2	-0,63 A	-0,89 B	-1,22 A	-0,75 B	-1,00 B	-1,26 A
	T0	-0,73 A	-1,03 A	-1,11 A	-0,90 A	-1,18 A	-1,24 A

*MDS: Medio día solar. *PM: Horario sobre 16:00 Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamiento ($p \leq 0,5$) según horario para cada fecha.

Potencial hídrico: Se presenta un aumento en los valores de tensión para el tratamiento T2 y T1 con respecto T0, que presenta los valores más negativos en todas las evaluaciones, manteniendo menores diferencias en la primera toma de muestras, demostrando las mayores diferencias a medida que termina el ciclo como se observa en la Figura 3. Además en la Cuadro 2 se evidencia que en la primera fecha no hay diferencias significativas a nivel de planta, no obstante, en las hojas se ven diferencias entre tratamiento, siendo el tratamiento testigo el que presenta los valores más negativos en los distintos horarios. Para el 10 de mayo se observa las diferencias en el horario de la tarde, donde se demuestra que las plantas correspondientes al T2, se ven menos estresadas que los otros tratamientos, que a esa hora se encuentran recibiendo la misma radiación. Para la última fecha se encontraron diferencias solo a nivel de planta en ambos horarios, siendo T0 el que presentó los valores más negativos.



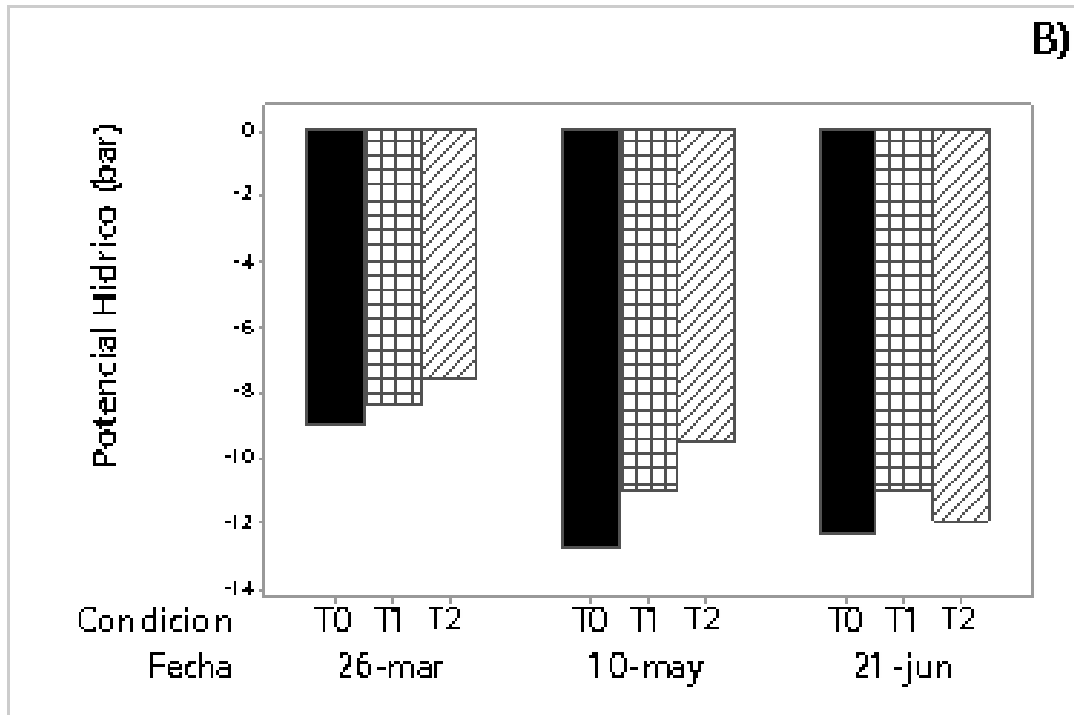


Figura 3. Evaluaciones de potencial hídrico durante medio día solar A) tallo B) hoja

Como se demostró en trabajos realizados por García *et al* (2010) el potencial hídrico es un indicador del estado hídrico de la planta, por lo cual es posible utilizar este valor para calcular el riego necesario en las plantas, con los datos obtenidos se puede determinar que bajar los niveles de riego para las plantas bajo sombra es posible manteniendo el mismo contenido hídrico que el tratamiento testigo, sin tener una pérdida significativa en el rendimiento.

Las diferencias de potencial hídrico encontradas en el cultivo están dadas debido a que las plantas bajo sombra, presentara una disminución de la radiación incidente, siendo una de las variables principales que afecta la evapotranspiración de superficie (Allen, *et al.* 2006), por lo cual la demanda hídrica que presentan es menor, mostrando los valores de potencial más negativos en T0, con la utilización de sombra puede llegar a disminuir la cantidad de agua que requieren las plantas sin afectar el rendimiento (García, 2017), además como se observa en la figura 4, las temperaturas medias del aire son mayores para T0 en los 2 horarios de medición, mientras que los tratamientos más cercanos a la estructura al tener una disminución del factor de radiación verán disminuida su temperatura en 4 a 5 grados Celsius, lo cual disminuye la evaporación y la transpiración que generan las plantas durante el día y genera una protección para la pérdida de energía durante la noche, obteniendo un efecto similar a mallas utilizadas en invernaderos (Varela *et al.*, 2001).

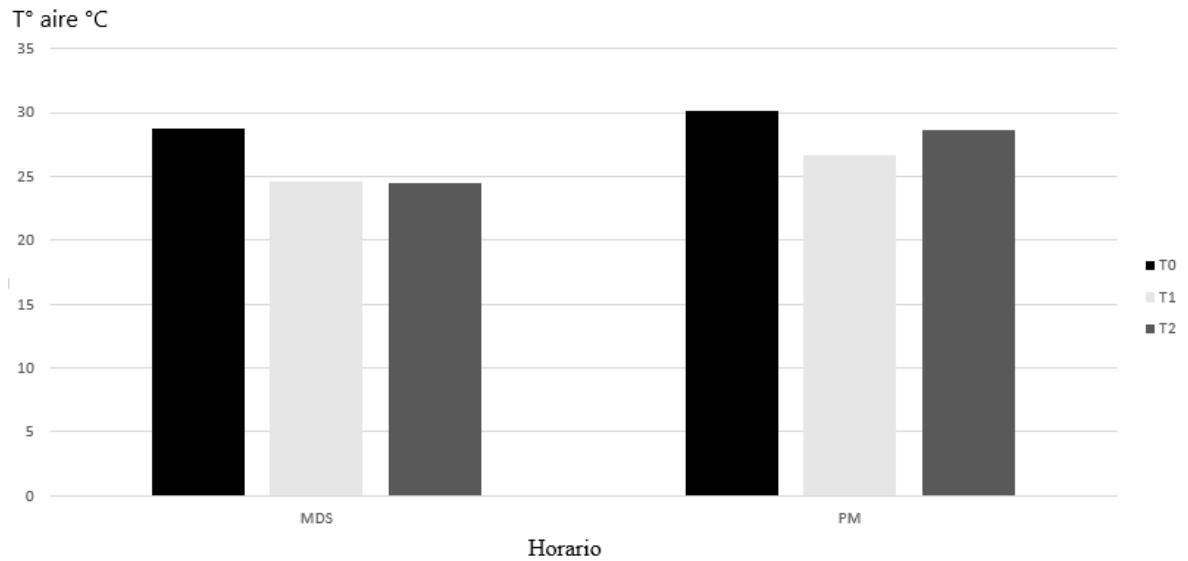


Figura 4. Promedios de temperatura del aire según horario de evaluación para cada condición.

Rendimiento: Se realizaron 3 cosechas a lo largo de la temporada, seleccionando los frutos que presentan el 50 % de la pinta. Para poder comparar los tratamientos, se utilizó una proyección de la producción de T1 y T2 para toda la hectárea (solo como valor ilustrativo, ya que los tratamientos T1 y T2 cubren solo dos hileras cada uno junto a los paneles y no toda la superficie). No se observaron diferencias significativas para los 3 tratamientos. Hay una disminución de producción para los tratamientos bajos sombra en la primera cosecha, obteniendo resultados similares en la segunda cosecha y finalmente los tratamientos bajo sombra alcanzaron mayores rendimientos, demostrando un mayor valor para T1 como se observa en la Figura 5. Además, se puede ver que los pesos promedios por fruto son mayores en T2 y T0 para la primera fecha, siendo T2 quien mantuvo los mayores valores de peso promedio de fruto durante toda la temporada. De la medición de las plantas extraídas se confeccionó el Cuadro 3, donde se puede apreciar que no hay diferencias entre tratamientos para la primera fecha en el área total de hojas, el peso de fruto individual, los kg de fruta por metro cuadrado de hoja y para el número de frutos por metro cuadrado de hoja, si se observan diferencias en el número de flores por metro cuadrado de hoja que se obtuvieron, viéndose la mayor cantidad para los tratamientos bajo el panel, siendo en T2 el más elevado, para la siguiente fecha se observa solo diferencias en los kilogramos de fruta por metro cuadrado de hoja, presentándose el valor más elevado para los tratamientos bajo sombra, finalmente se ve en la última fecha que T2 posee los valores más altos de kilogramo de fruta además de las frutas más grandes.

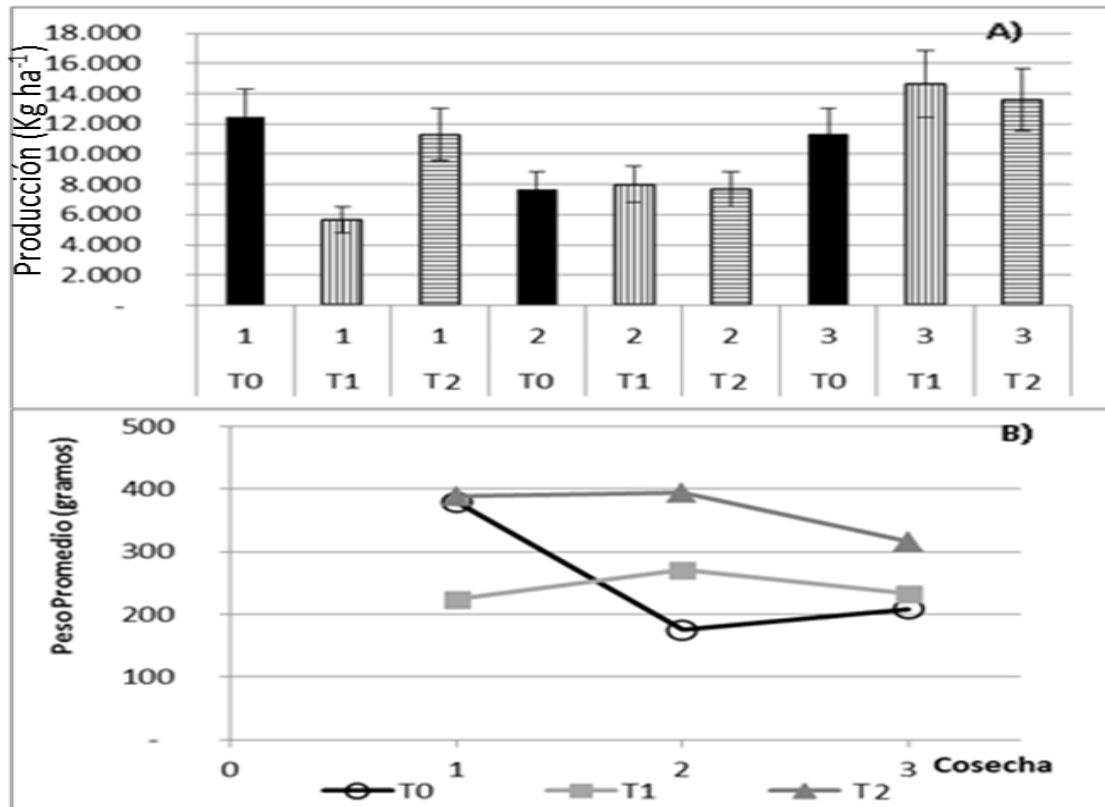


Figura 5. Producción de tomates A) Proyección por ha de fruta cosechada según fecha de cosecha. B) Peso fruto según cosecha.

La disminución en la primera cosecha de los tratamientos sombreados se debe a que el efecto de la sombra produce un retraso al madurar los frutos, debido a la menor temperatura que se presenta como indican Castro *et al.* (2014) la maduración de los frutos ira acelerándose a medida que sube la temperatura del aire. En la siguiente cosecha se obtuvo una producción similar en los 3 tratamientos, en la última cosecha la producción de los tratamientos bajo sombra fue mayor, debido a que la fruta que no se cosechó en las primeras instancias, se encontraba madura para la última cosechas, en conjunto se le asocia el factor de protección que genero la estructura de panel a la primera helada de la temporada por la disminución de la perdida de energía indicada anteriormente. Además como se observa en la Cuadro 3, el T2 posee un mayor número de flores por metro cuadrado de hoja que los demás tratamientos, pero un menor peso de fruto, esto debido a que la presencia de la sombra retrasó la cuaja de los frutos. El peso promedio de la fruta cosechada para las plantas de tratamiento bajo sombra se ve que tienden a ser uniformes a lo largo del cultivo, en las tres cosechas, mientras que el tratamiento sin sombra se ve más afectado, esto es debido a que la estructura de panel está dando un ambiente más homogéneo para las plantas, permitiendo sacar cosechas más homogéneas lo cual coincide con trabajos realizados por García (2017) donde demuestra que el uso de sombra continua aporta a obtener mayor calidad de fruta y por lo tanto mayores rendimientos en el cultivo de tomate.

Cuadro 3. Datos de extracciones de plantas completas de tomates en 3 fechas.

Tratamiento	Fecha		
	28-03-2019	29-05-2019	26-06-2019
Área total m ²			
T1	1,85 A	1,51 A	0,94 A
T2	1,43 A	1,89 A	0,84 A
T0	2,09 A	1,60 A	1,32 A
Peso fruto individual g			
T1	32,29 A	125,4 A	17,02 B
T2	16,14 A	102,5 A	115,3 A
T0	33,30 A	109,4 A	34,21 B
kg fruta m ² hoja			
T1	0,93 A	3,52 A	0,69 B
T2	0,49 A	3,55 A	2,38 A
T0	0,70 A	2,16 B	0,59 B
N° flores m ² hoja			
T1	14,9 AB	10,9 A	4,76 AB
T2	18,5 A	8,00 A	6,87 A
T0	9,04 B	8,62 A	2,53 B
N° frutos m ² hoja			
T1	29,1 A	28,0 A	40,7 A
T2	30,3 A	36,0 A	20,6 B
T0	20,9 A	20,6 A	19,2 B

Letras diferentes representan diferencias significativas $p < 0,05$ para la variable medida según fecha.

RENDIMIENTO ELÉCTRICO

Como se comentó anteriormente, los datos de la Figura 5 son la proyección del tratamiento a la producción teórica de una hectárea, pero en una situación de campo, se daría que los tratamientos 1 y 2, serían solo una hilera cada uno, asociado a la parte sur de las estructuras de paneles, por dicha razón, para términos de terreno, al no poder utilizar las hileras para extrapolar los datos a peso total, se realizó una corrección teórica considerando la instalación de estructuras en toda una hectárea, en las cuales se instalarían separadas a 12 metros unas de otras para permitir el paso de maquinaria de aplicación de agroquímicos, como se observa en la Figura 5. Para el cálculo de los datos económicos se generaron 2 situaciones, la situación 1 considera el cultivo cubierto por estructuras de paneles cada 12 metros, generando los tratamientos bajo sombra, pero se consideran todas las hileras con plantas productivas, mientras que la situación 2 descarta un porcentaje de pérdida producida por las plantas de las hileras que se encuentran directamente bajo las estructuras de los paneles cada 12 metros.

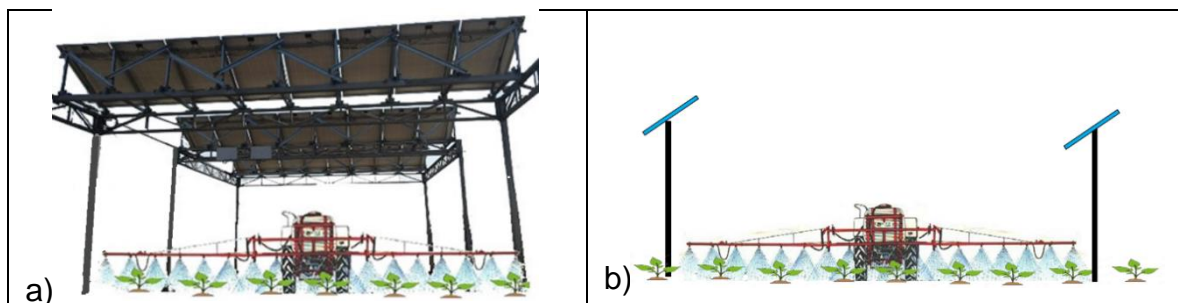


Figura 5. Montaje de paneles a) con cultivo perpendicular b) con cultivo paralelo

Al considerar la separación de 1,6 m de las hileras del cultivo, se obtendrá un total de 62,6 hileras por hectárea, debido a que las estructuras de soporte de paneles miden 12 m, cubrirá 8 hileras en la hectárea que corresponderá al 13 % de las hileras del cultivo, cada estructura estará generando la condición de sombra de T1 para una hilera y la condición de T2 en otra, obteniendo un 13% del total de hileras con plantas de T1 y 13 % plantas de T2 (8,3 hileras cada una dentro de las 62,5 hileras) y el resto serán las plantas sin sombra, generando una producción total de 31.249 kg ha⁻¹ (Cuadro 4), se observa que no existe una pérdida significativa en la producción de tomates bajo sombra producida por los paneles, por lo cual la generación de energía sería directamente una ganancia para el productor. En caso de que la hilera directa donde se instaló las estructuras no pueda generar plantas productivas, se asumiría una pérdida del 13 % más debido a la pérdida de las hileras presentes bajo el panel, la producción disminuiría a 26.849 kg ha⁻¹ lo cual se puede asumir por el agricultor debido a que la generación de electricidad estará ayudando a pagar los gastos de producción.

Cuadro 4. Proyecciones de producción con implementación de paneles.

Tratamientos	T0	T1	T2	Total kg ha⁻¹
kg ha⁻¹ teóricos	31.250	28.250	32.500	31.250
Venta 225 \$ kg tomate				14.062.500
S1. % producción en 1 ha con paneles 12 m	73,33	13,33	13,33	
kg ha⁻¹ con paneles 12 m	22.917	3.767	4.333	31.017
Venta 225 \$ kg tomate				13.957.406
S2. % producción con pérdida 13% hilera paneles	60	13,33	13,33	
Producción real kg ha⁻¹	18.750	3.767	4.333	26.850
Venta 225 \$ kg tomate año				12.082.490

*S1: Situación 1. S2: Situación 2.

Al suponer que los paneles se encuentran a 12 m, la producción anual eléctrica será de 375 MWh ha⁻¹, a un precio de venta de 46,8 \$ kWh, la venta de electricidad anual será de 17,5 MMCLP, junto a los datos del Cuadro 4, se estiman ganancias de 31 MMCLP para el S1 y 29 MMCLP para el S2, la estructura al tener un costo de implementación de 220 MMCLP, se estima que la recuperación de la inversión será en al menos 10 años, lo cual es una condición normal de fotovoltaismo, pero se debe considerar estar al margen de la ley 20.571 que promueve el auto consumo, además el agricultor puede entregar el manejo a una empresa de energía, la cual podrá vender la electricidad más barata al dueño, finalmente para plantas de 1 MW se deberá realizar una carta de estudio ambiental, y sobre 3 MW se requerirá un estudio de impacto ambiental (Homer, 2021).

CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos de potencial hídrico se concluye que la presencia de sombra sobre el cultivo produce una menor demanda hídrica de las plantas, por lo tanto se plantea una posible reducción del plan de riego en cultivos de tomates que se encuentren bajo la sombra, ya que poseen una menor tasa fotosintética al tener reducción de radiación, además de una disminución de temperatura que retrasara la disminución del potencial hídrico.

La reducción de radiación afecta las variables fisiológica del cultivo de tomate, no obstante no presenta una disminución significativa en la tasa fotosintética para el cultivo de tomate, permitiendo el uso de sombra intermitente sobre las plantas.

En términos de producción se ve que la pérdida de tomates a causa de la sombra generada no es significativa, y al estar disminuyendo costos en la producción al tener plantas menos estresadas y que requieran menor cantidad de agua, las pérdidas y ganancias se verán equilibradas, inclusive pudiendo generar una mayor ganancia al momento de estar produciendo energía fotovoltaica, por lo cual la implementación de un sistema agro-fotovoltaico en un cultivo de tomates es factible.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. (Estudio FAO Riego y Drenaje N°56). Recuperado de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>

Ayala, F., Zatarain, M., Valenzuela, M., Partida, L., Velázquez, M., Valdés, T. *et al.* (2011) Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra. *Terra latinoamericana*, 29, 403-410. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n4/2395-8030-tl-29-04-00403.pdf>

Bustos, C., Watts, D y Ayala, M. (2017). Financial risk reduction in photovoltaic projects through ocean atmospheric oscillations modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 548-568. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116307511?via%3Dihub>

Castro, J., Gómez, G y Maestre, J. (2014) Diseño de la automatización de un invernadero de plántulas de tomate rojo. *Ciencia e Ingeniería. Revista Interdisciplinaria de Estudios en Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería*, 1(2), 1-30. <http://revistas.uniguajira.edu.co/rev/.co/rev/index.php/cei/article/view/21/17>

Chavez, N y Gutiérrez, M. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. II. Tolerancia y tratamiento agronómico. *Agronomía Mesoamericana*, 28, 255-271. http://www.mag.go.cr/rev_meso/v28n01_255.pdf

CORFO. (1964). Descripciones proyecto aerofotogrametrico Chile. Instituto de Investigación de Recursos Naturales. CORFO.

Fraunhofer Chile, (2015). Concepto agro PV y su aplicación en el sector hortalizas en la Región Metropolitana de Santiago. Fundación Fraunhofer Chile Research. 1-44.

García, A., Cun, R y Montero, L. (2010). Efecto de la hora del día en el potencial hídrico foliar del sorgo y su relación con la humedad en el suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 19(3). 7-11. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93218514002>

García, S. (2017). Efecto de las mallas sombra de diferentes colores y una cubierta plástica sobre el rendimiento y calidad del cultivo de tomate. [En línea]. Maestro en Ciencias en Agroplasticultura. Saltillo, Coahuila: Centro de Investigación en Química Aplicada. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/325/1/Tesis%20MAP%20Silvia%20Giromi%20Garcia%20Mendoza%20.pdf>

Grandica, H. y Peña, H. (2015). Acumulación de materia seca y balance de nutrientes en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en ambiente protegido. *Bioagro*. 27(2), 111-120. <http://ve.scielo.org/pdf/ba/v27n2/art07.pdf>

Homer, I. (2021). Manual teórico práctico de agrivoltismo: paneles solares. Universidad de Chile, Gobierno Regional de Coquimbo. 63.

Khapte, P., Kumar, P. y Burman, U. (2019). Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio-biochemical implications. *Scientia Horticulturae*. 248, 256-264

López, G., Lira, R. y Méndez, B. (2016). Medición de Intercambio Gaseoso, Área Foliar e Índice de Clorofila en Plantas Elicitadas con Nanopartículas. En: Méndez, B. *Agronano Tecnología: nueva frontera de la revolución verde*. Coahuila, Mexico: CIQA. 273.

Nangare, D., Singh, Y., Suresh, P and Minhas, P. (2016). Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. *Agricultural Water Management*, 171, 73-79. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416301007>

Rojas, E. (2015). La radiación Par y su efecto en los índices de crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo de tomate. [Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada]. CIQA Repositorio. <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/49>

Santibáñez, F. (2018). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. *Agricultura chilena reflexiones y desafíos al 2030*. ODEPA. Santiago, Chile. 147-177. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf

Varela, D., Molina, F. y Gill, J. (2001). Las mallas como técnicas de control climático en invernadero. *Vida rural*, 139, 50-52. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_vrural%2FVrural_2001_139_50_52.pdf

Velázquez, L. 2013. Estudio del efecto de diferentes cubiertas de invernadero, sobre los índices de crecimiento y rendimiento en el cultivo de tomate tipo uva. (*Solanum lycopersicum* L. cv. Sweet Hearts). [Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada]. CIQA Repositorio. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/41/1/Tesis%20MAP%20Lehovvy%20E.%20Velazquez%20Diaz%20Dic%2004%202013.pdf>

Zarate, W. 2015. Determinación de la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes en el cultivo de tomate *Lycopersicum esculentum* Mill. L. bajo diferentes niveles de radiación PAR. [Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada]. CIQA Repositorio. <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/279>

