

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



**“Tolerancia de *Opuntia* spp. a diferentes tipos
de estreses abióticos relacionados con el
cambio climático.”**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Junio - 2021

Autor: Daniel Licerán Fuentes

Tutor: Inmaculada Simón Vilella

CoTutor: Silvia Simón Grao



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo Fin de Grado es una parte del proyecto de investigación concedido en dicha convocatoria, AGCOOP_A/2019-008, “*Selección de nuevas variedades comerciales y de cultivos alternativos destinados a agricultura ecológica en condiciones de clima cambiante*”.

Para llevar a cabo esta idea, la EPSO-UMH ha creado un “consorcio de investigación” formado por: I) el centro de investigación CEBAS-CSIC (Murcia), bajo la tutela del investigador Dr. Francisco García Sánchez, experto en el manejo integral del riego y la fertilización en cultivos hortícolas y frutales, así como en el estudio fisiológico y metabólico de las plantas cultivadas bajo condiciones medioambientales adversas; y II) la ‘Cooperativa Agrícola Católica de Orihuela’ (Alicante), encabezada por su director general e Ingeniero Agrónomo D. Raúl Girona Hernández, que han aportado su experiencia gracias a que muchos de sus socios practican en sus cultivos agricultura ecológica.

Para finalizar debo agradecer a mis directoras de trabajo su apoyo y confianza en mi para desempeñar esta labor de investigación y en especial a mi codirectora, la Dra. Silvia Simón Grao, gracias a ella se ha logrado hacer posible todo el trabajo aún con las enormes dificultades que nos ha traído esta pandemia COVID-19.





Tolerancia de Opuntia spp. a diferentes tipos de estreses abióticos relacionados con el cambio climático.

Resumen. - En zonas áridas y semiáridas los factores ambientales, como son sequía, alta radiación solar y temperaturas extremas, limitan tanto el establecimiento de plántulas como el desarrollo de estas. Las plantas del género Opuntia (Nopal) han desarrollado diferentes adaptaciones para poder establecerse en estas condiciones de manera idónea. No obstante, el cambio climático está dando lugar a que estas condiciones sean cada vez más extremas, lo que obliga a los agricultores de esas zonas a tener que emplear para el riego aguas procedentes de fuentes no convencionales de baja calidad con alta concentración de sales y/o boro. Es por ello, que se pretenda con este trabajo determinar el grado de tolerancia del cultivo del Nopal a diferentes tipos de estreses abióticos relacionados de manera directa o indirecta con el cambio climático. Para ello, plantas de Opuntia sp. serán crecidas bajo condiciones de sequía, salinidad, toxicidad por boro y altas temperaturas.

Palabras clave: Estrés abiótico Nopal, sequía, altas temperaturas, salinidad, toxicidad por boro.

Abstract. - In arid and semiarid areas the environmental factors like drought, high solar radiation and extreme temperatures, both limit the establishment of seedlings and their development. Plants of the genus Opuntia (Nopal) have developed different adaptations to establish themselves in these conditions in an ideal way. However, climate change is causing these conditions to be increasingly extreme, forcing farmers in these areas to have to use water from low-quality unconventional sources with a high concentration of salt and boron in the water for irrigation. That is why the aim of this work is to determine the degree of tolerance of the Nopal cultivation to different types of abiotic stresses directly or indirectly related to climate change. For this, Opuntia sp. they will be grown under conditions of drought, salinity, boron toxicity, and high temperatures.

Key Words: Abiotic stress Nopal, drought, high temperatures, salinity, boron toxicity.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	Cambio climático y calentamiento global.....	9
1.2	Estreses abióticos relacionados con el cambio climático.....	9
1.2.1	Sequía.....	11
1.2.2	Salinidad.....	12
1.2.3	Toxicidad por boro.....	14
1.2.4	Altas temperaturas.....	15
1.3	El cultivo de Nopal.....	16
1.3.1	Generalidades del Nopal.....	18
1.3.2	El Nopal en los ecosistemas: beneficios y servicios.....	20
1.3.3	El cultivo de Nopal en España: importancia agroecológica y económica.....	21
1.3.4	Respuestas potenciales del Nopal al cambio climático.....	22
2.	OBJETIVO.....	23
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1	Material vegetal y condiciones del cultivo.....	23
3.2	Manejo del cultivo: Simulación del cultivo agroecológico bajo condiciones de invernadero.....	24
3.3	Estreses abióticos estudiados.....	25
3.4	Parámetros analizados.....	25
3.4.1	Parámetros de crecimiento.....	25
3.4.2	Porcentaje de reducción del crecimiento y niveles de tolerancia al estrés.....	25
3.4.3	Parámetros de fotosíntesis, fluorescencia de clorofilas y cuantificación del contenido relativo de clorofilas.....	26
3.4.4	Medidas de humedad del suelo/transpiración del cultivo.....	27
3.4.5	Análisis mineral.....	27
3.4.6	Determinación del daño oxidativo (MDA y H ₂ O ₂) y actividad antioxidante.....	28
3.5	Diseño experimental y análisis estadístico.....	28

4.	RESULTADOS	29
4.1	Porcentaje de reducción de la Parte Aérea (g Ps) y grado de tolerancia	29
4.2	Síntomas de fitotoxicidad en las pencas de Nopal en función del estrés	31
4.3	Parámetros fisiológicos: transpiración del cultivo	31
4.4	Nutrición mineral	32
4.5	Daño oxidativo (MDA y H ₂ O ₂) y actividad antioxidante en pencas	33
5.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	34
6.	BIBLIOGRAFÍA	35
7.	ANEXOS	36
7.1	Informe de suelo	38
7.2	Datos climatológicos	39



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Cambio climático y calentamiento global

De acuerdo con la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC), el cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas.

En los últimos siglos el ser humano como especie ha crecido de forma significativa incrementando de esa manera la demanda de recursos y modificando la estructura del planeta, todo esto tuvo lugar debido al crecimiento tecnológico, creando diversos impactos negativos como el aumento de gases de efecto invernadero lo que produce un calentamiento intensificado de las temperaturas del planeta (Barros, 2004).

Los gases de efecto invernadero (GEI) producen una intensificación de la temperatura del planeta y estos son: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los compuestos halogenados, el ozono troposférico, el vapor de agua, los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos volátiles diferentes al metano (COVDM) (Del Valle Colombia et al., 2005).

El clima de la Tierra está definido por el equilibrio radiactivo proveniente del Sol, es decir, de la cantidad de radiación que llega a nuestro planeta, una parte de esa radiación volverá a salir de nuestra atmosfera, pero una parte será retenida por los GEI, de forma natural en nuestro planeta se acumula esta radiación debido al efecto invernadero, pero de forma antropogénica este efecto invernadero se está viendo intensificado, aumentando los GEI en la atmosfera y a su vez aumentando las temperaturas de nuestro planeta (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007).

Por lo que el calentamiento global es un término utilizado para explicar el aumento de los gases de efecto invernadero en la atmosfera producido por causas antropogénicas que aumentan la capa de GEI disponibles, estos absorben y retienen los rayos infrarrojos provenientes del sol y hacen elevar la temperatura global de una forma gradual. (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007).

1.2 Estréses abióticos relacionados con el cambio climático

Las plantas cuando se encuentran en situaciones naturales se encuentran sometidas continuamente a cambios ambientales lo que provoca en estos individuos una serie de estímulos que influyen en el crecimiento y la productividad.

Cuando estas situaciones naturales se ven modificadas o intensificadas debido a los efectos del cambio climático, ocurren con una velocidad y una frecuencia mayor que en situaciones normales, provocando en algunos organismos vegetales la imposibilidad de poder adaptarse a esos cambios o activar mecanismos de regulación para hacer frente a esos factores de estrés.

Las situaciones de estrés ambiental como son la sequía, la alta salinidad, el exceso de boro o las altas temperaturas influyen en el desarrollo, crecimiento y productividad de las plantas y dañan factores vitales como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas, alteraciones en el balance hormonal y en los procesos de oxidación/reducción que resultan en daños al ADN, a proteínas y a lípidos. (Tambussi, 2004)

Cualquier factor de estrés provoca una respuesta de estrés o estado de estrés que se caracteriza por provocar: modificaciones estructurales, alteraciones fisiológicas y daños y desarrollo de mecanismos de defensa ante el estrés.

Cuando una planta se encuentra en situaciones adversas estas son capaces de activar unos mecanismos de repuestas muy complejos y constituir un problema fundamental para la agricultura, ya que tiene un impacto directo en la supervivencia y la productividad de los cultivos (Rodríguez-Pérez, 2006).

Estas situaciones adoptadas por las plantas se considera la causa principal por la cual hay una pérdida de más del 50% de los principales cultivos de interés agrícola mundial (Méndez Espinoza & Vallejo Reyna, 2019), que afecta a un 95% de la superficie agrícola.

Los factores de estrés en plantas responden actuando sobre un determinado estrés y normalmente realizan cuatro fases:

La primera fase es la denominada fase de alarma, donde se activan mecanismos de defensa de los cuales dispone la planta, amoldando el metabolismo celular hacia uno diferente con las nuevas condiciones, activa procesos de reparación y expresa las adaptaciones morfológicas pertinentes (Lichtenthaler, 1996).

La fase de resistencia es aquella en la que la planta se enfrenta a un nuevo estado fisiológico inducido por los cambios que se han producido en el medio, si esta situación de estrés no disminuye o desaparece en un periodo de tiempo determinado y por el contrario el estrés continua por un tiempo excesivo la capacidad que tiene el individuo para hacer frente a ese factor de estrés disminuirá, lo que dará como resultado que la planta avance hacia la nueva y tercera fase denominada fase de agotamiento, la cual provoca la muerte de la planta si las condiciones de estrés no desaparecen, si por el contrario si esos factores cambian o el estrés desaparece y las condiciones de reparación de la planta son óptimas se podría dar la última de las fases llamada fase de regeneración (Lichtenthaler, 1996).

1.2.1 Sequía

El agua es uno de los elementos más relevantes para la vida y dado que es un bien que no está repartido de una forma proporcional alrededor de todo el globo terráqueo se llega a convertir en un indicador de pobreza, afecta directamente sobre la salud, juega un papel en la desigualdad social e incluso puede llegar a producir conflictos sociales.

Para un organismo vegetal, de todos los recursos que necesita, el agua, es el más importante y el más limitado de todos el cual le permite poder crecer y desarrollarse en óptimas condiciones.

La sequía se da cuando existe una deficiencia en el caudal o volumen de aguas tanto superficiales como subterráneas, cuando hay escasez de precipitaciones o de nieves y cuando los cauces o el nivel de los ríos, lagos y embalses se vean reducidos o a su vez el período en el cual las precipitaciones no compensan el agua aportada con la pérdida por evapotranspiración de las plantas.

Con el aumento de las temperaturas de nuestro planeta debido a los GEI, se han dado una serie de factores como el retroceso de Glaciares y derretimiento del hielo que a su vez ha hecho que el ciclo hidrológico de la tierra se vea modificado y exista una disminución tanto de su cantidad como de su calidad.

Los efectos que causa la sequía en las plantas es un tanto complejo y difícil de categorizar, pero a continuación se describirán aquellas respuestas más relevantes:

-El cierre de los estomas, debido a al déficit hídrico las plantas adoptan este mecanismo para disminuir lo máximo posible la cantidad de agua que se pierde por evapotranspiración, debido a este mecanismo de adaptación la planta disminuye su conductancia, es decir, se disminuye su tasa de transpiración y a su vez disminuye el agua que es consumida por la planta, aparece en mayor medida la fotoinhibición y la fotooxidación. (Tambussi, 2004)

-Inhibición del crecimiento, una de las respuestas más observadas cuando el déficit hídrico afecta a una determinada planta es la inhibición de la elongación celular y a su vez la disminución del crecimiento de la planta en cuestión, apareciendo de una forma más acusada en la parte aérea de la planta siendo la raíz menos sensible al crecimiento en condiciones de sequía (Tambussi, 2004).

-Ajuste osmótico u osmorregulación, se caracteriza por un aumento de la concentración de solutos totales en las células vegetales y la pérdida de turgencia de la zona aérea del individuo, la deshidratación de las células da lugar a la biosíntesis, la descompartimentación y el transporte de la fitohormona ácido abscísico (ABA) que induce el cierre de los estomas (Rodríguez-Pérez, 2006), el ajuste osmótico es un mecanismo natural de las plantas para mantener un contenido correcto de agua en la célula y debido a este aumento de acumulación de sales puede provocar fallos en las moléculas capaces de regular el metabolismo. (Tambussi, 2004)

Los mecanismos que utilizan las plantas cuando sufren situaciones de sequía son los siguientes:

-Escape es la capacidad de la planta de completar su ciclo de vida antes que las condiciones de suelo presenten un déficit de agua, lo que implica un rápido desarrollo fenológico de la planta, plasticidad durante el período de desarrollo y removilización de asimilados, pero trae como consecuencia una reducción en los rendimientos, con respecto a las plantas de ciclo normal (Agbicodo et al. 2009).

-Evitación, corresponde a la capacidad de las plantas de mantener las hojas turgentes, a pesar de la escasez de agua en el suelo, lo cual, se explica por una mayor profundidad de las raíces o un sistema de raíces eficiente en la absorción del agua, cierre de estomas, disminución de la absorción de la radiación o evapotranspiración por cierre de las hojas y reducida área foliar; ello repercute en una disminución en la asimilación de carbono, debido a la reducción de la transferencia física de moléculas de dióxido de carbono y el aumento de la temperatura foliar que favorece la reducción de los procesos bioquímicos y, por consiguiente, los rendimientos (Mitra, 2001).

El mecanismo de tolerancia implica que las plantas pueden resistir el déficit de agua en el suelo y se explica por el mantenimiento de la turgencia, a través de un ajuste osmótico, que implica acumulación de solutos en la célula, aumento de la elasticidad de las células, reducción del tamaño de las células y resistencia protoplasmática; sin embargo, se puede presentar una gran acumulación de iones por la pérdida de agua que, en altas concentraciones, se denomina estado vítreo, pudiendo causar desnaturalización de las proteínas y las membranas, ya que se incrementa la interacción entre moléculas (Agbicodo et al. 2009).

1.2.2 Salinidad

La salinización es el proceso por el cual se acumulan sales en el suelo con predominio de calcio y magnesio, puede proceder de origen natural si se da en zonas de aridez y en estas zonas encontramos materiales ricos en sales, pero también puede producirse de forma antropogénica produciéndose principalmente por el abandono de zonas de cultivo, las aguas regeneradas y por los desechos de los animales de granja, esta cantidad de sales en el suelo o en las plantas se puede calcular mediante conductividad eléctrica (mmhos/cm).

Se estima que sobre 800 millones de hectáreas en el planeta están afectadas por sales, de estos 397 millones lo son por problemas de salinidad y 434 millones por condiciones asociadas a sodicidad (Munns, 2005).

Varias son las causas vinculadas a estos procesos de salinización, entre las cuales es posible citar un excesivo empleo de fertilizantes, uso de agua de mala calidad por el exceso de sales, mal drenaje y tala de vegetación arbórea (Chaudhari, 2003).

Podemos clasificar a las plantas en base a la capacidad de crecer en ambientes salinos en glicófitas y halófitas, las primeras se caracterizan por ser altamente sensibles a las variaciones de salinidad; mientras

que, por el contrario, las halófitas se caracterizan por ser tolerantes y desarrollarse en ambientes con elevadas concentraciones de sales, es decir son tolerantes a la salinidad.

Por lo que se puede definir el fenómeno de tolerancia a la salinidad en los organismos vegetales como el proceso evolutivo que confiere a distintas especies de plantas la capacidad de crecer y desarrollarse en ambientes con presencia excesiva de electrolitos (González, González, & Ramirez, 2002).

El exceso de la salinidad puede afectar en gran medida de una forma negativa a la germinación de las semillas de las plantas, provocando un elevado porcentaje de fallar si hay un exceso de sales en el ambiente y provoca un aumento del periodo que tarda este individuo en realizar la germinación, encontramos que cuanto mayor sea la cantidad de sales en el ambiente y cuando estas son mayores a los valores habituales hará que el tiempo de germinación y de crecimiento se vuelvan más largos en un gran número de especies cultivables y salvajes (González, González, & Ramirez, 2002).

Debido al aumento de tiempo que necesitan para su germinación y para su crecimiento en aquellas situaciones donde los niveles de salinidad son más altos que los niveles medios normales, provoca que los cultivos afectados por este factor de estrés tengan una velocidad de producción y de su finalmente recolección u obtención del producto más lenta haciendo perder dinero a aquellos agricultores que se encuentran por encima de los valores normales de salinidad en el ambiente.

Uno de los efectos que causan las sales en las plantas se da debido a que estas hacen que el potencial osmótico de las plantas se vea mermado, debido a que la salinidad hace que la longitud de las raíces sea menor que en condiciones normales haciendo que la planta disminuya la capacidad que tienen las raíces para absorber el agua ya que engloban menos terreno de absorción, además de la acumulación de iones tóxicos en las células vegetales.

La zona aérea de las plantas también se ve afectada limitando el crecimiento en altura de la planta, afectando a el número de hojas totales y produciendo una reducción en el área foliar, disminuyendo el número de estomas disponibles en la cara abaxial de la hoja, apareciendo diferentes factores que nos indican daño foliar como puede ser clorosis o amarillamiento de las hojas.

Los frutos pueden ser afectados en relación con su tamaño, en suelo donde hay un exceso de sales los frutos tenderán a ser más pequeños debido a que el área de raíces disponibles para la planta se ha visto reducido por lo que también se reduce la absorción de agua y debido a eso la fotosíntesis se ve mermada, por otro lado se ha podido observar que a nivel agroindustrial un fruto que ha estado expuesto a niveles considerables de sales pueden contener mayor contenido de compuestos solubles, sólidos totales, acidez titulable y carotenoides. (De et al., 2007a).

También debemos mencionar que el exceso de sales en los suelos forma una especie de costra superficial en especial en zonas áridas y semiáridas donde la precipitación es escasa y suele tener unas precipitaciones de una manera más torrencial cuando esta ocurre, esta costra superficial que se ha creado en el suelo hace que se vuelva más duro y compacto, haciendo que el agua no pueda infiltrarse en el suelo

y por ende continúe como agua de escorrentía, aumentando cada vez más la cantidad de sales en ese medio y dificultando de esta manera el aporte de agua a las plantas y como consecuencia se ve mermada la germinación y el desarrollo de plantas en suelos con exceso de sales.

1.2.3 Toxicidad por boro

El boro es un micronutriente que a niveles normales es imprescindible para las plantas, presenta dos isótopos estables en la naturaleza, tiene una masa atómica de 10.81 g/mol, es un elemento trivalente, metaloide y semiconductor, en la naturaleza y sobre todo en condiciones acuáticas, encontramos el boro como ácido bórico (H_3BO_3), borato $[B(OH)_4]$ o como mineral borosilicato.

El boro es un elemento esencial en el desarrollo de las plantas, participa en el mantenimiento de la estructura y la funcionalidad de la pared celular, lo absorben a través de las raíces como ácido bórico neutro y como borato, la absorción se puede dar por difusión pasiva, transporte facilitado y por transporte activo.

El boro puede incorporarse al ambiente de forma natural, siendo esta la más significativa, y de forma antropogénica, por la acción del ser humano.

De forma natural el boro entra en contacto con el medio ambiente en forma de partículas, mediante la meteorización de las rocas, se encuentra en el vapor de agua, por la volatilización del agua del mar y mediante la actividad volcánica.

A su vez el ser humano participa en la introducción del boro en el medio ambiente mediante acciones que repercuten a nivel atmosférico como son la minería, la fabricación de materiales como el vidrio, la quema de productos agrícolas, en los residuos y en centrales eléctricas de carbón o petróleo.

Además cabe mencionar que a nivel acuático el boro se introduce de una forma antropogénica mediante la utilización de productos de limpieza que tengan en su composición boratos/perboratos, a través de aguas residuales generadas por la industria y en lixiviados procedentes del tratamiento de papel y maderas, sumándose el hecho de que este micronutriente es de muy difícil eliminación en estaciones depuradoras, de las que más tarde se extrae agua regenerada que puede utilizarse como agua de riego en muchos cultivos, pudiendo así aumentar los valores de dicho contaminante en el ambiente.

Se ha podido observar que en las aguas desaladas que proceden de la osmosis inversa hay unos valores elevados problemáticos de boro en forma de boratos, debido a que en el agua del mar la concentración de boro es de 4.5 mg/L y que cuando aplicamos el proceso de desalación disminuye hacia un valor medio de 0.8-1.5 mg/L dependiendo de los sistemas empleados para su eliminación pudiendo llegar a mejorarse esa concentración aplicándose procesos de membrana como la ultrafiltración o la electrodiálisis. (Fernanda & Arias, 2009)

En la mayoría de los cultivos los síntomas de toxicidad se presentan cuando la concentración de boro en las hojas supera de 250 a 300 mg/kg en peso seco (Ayers y Westcot, 1989), la cantidad de boro máximo que puede haber en el agua de riego de cualquier cultivo ha de ser menor a 1mg/L para que este no perjudique a los cultivos.

Por ello el exceso de boro en cualquier planta va a producir un retraso del desarrollo y una reducción del crecimiento de la planta, así como el número, tamaño y peso de los frutos. Esto es consecuencia de las alteraciones que el boro causa a nivel fisiológico o metabólico en las células vegetales.

Podemos observar ese exceso en una planta cuando se empieza a visor que las hojas se van volviendo de un tono amarillento por las puntas de las hojas, produciendo parches cloróticos y/o necróticos en los márgenes y en las puntas de las hojas maduras.

Para combatir el exceso de boro, éste se puede lixiviar desde el suelo o ser eliminado desde la fuente de agua. Para lixiviar el boro desde el suelo se requiere una cantidad tres veces mayor de agua que la necesaria para lixiviar la misma cantidad de sodio o cloruro, ya que el boro se mueve lentamente con la solución suelo, al encontrarse altamente adsorbido a los minerales de arcilla, por ello, además se requiere mayor tiempo de lavado (Havlin et al., 1999; Ayers y Westcot, 1989).

1.2.4 Altas temperaturas

Se ha observado que el aumento de GEI en nuestra atmosfera puede provocar un efecto invernadero intensificado lo que podría llegar a provocar un sobrecalentamiento de la temperatura global.

Las altas temperaturas es un factor de riesgo cuando esta supera el límite de tolerancia que tienen las plantas a este estrés abiótico, un aumento continuado en la temperatura puede producir efectos negativos en la reproducción, crecimiento y producción de las especies vegetales que habitan en la tierra, pudiendo provocar que algunas especies de plantas se vean desplazadas buscando nuevos lugares con las condiciones idóneas para su supervivencia o pudiendo producir la extinción de aquellas menos adaptadas a estos cambios.

Este factor limitante hace que aquellas especies de plantas que poseen un rango de temperatura muy definido o limitado son las que van a experimentar dificultades a la hora de reproducirse y desarrollarse, por lo que como consecuencia de las altas temperaturas y a la velocidad a la que está actuando este aumento se está produciendo una reducción de la biodiversidad de especies vegetales a nivel mundial quedando aquellas que son más resistentes.

Se ha podido observar que el aumento de la temperatura a nivel global está produciendo serios problemas en los cultivos, aumentando la cantidad de agua de riego que hay que aportar cuando esta temperatura es mayor a los niveles normales, aumentando el mecanismo de evapotranspiración que tienen las plantas

haciendo que estas pierdan más cantidad de agua a una mayor velocidad y de esta manera aumentando el coste en agua que tienen que aportar los agricultores haciendo que el producto final sea más caro.

El estrés por calor afecta el crecimiento de las plantas desde el principio de su ontogenia, aunque los efectos varían según la etapa de desarrollo. Las altas temperaturas pueden disminuir o inhibir totalmente la germinación de las semillas, dependiendo de las especies y de la intensidad del estrés; en etapas de desarrollo posteriores, las altas temperaturas pueden afectar adversamente la fotosíntesis, la respiración, las relaciones hídricas y la estabilidad de las membranas, así como los niveles de hormonas y de metabolitos secundarios (Wahid, Gelani, Ashraf, & Foolad, 2007).

1.3 El cultivo de Nopal

El nopal *Opuntia ficus-indica* es un vegetal arborescente de 3 a 5 metros de altura con un tronco leñoso que mide entre 20 y 50 centímetros de diámetro es fácil de cultivar ya que es bastante resistente a los cambios, tarda aproximadamente un mes en germinar y es muy sencilla la obtención de las semillas en tiendas especializadas, también admite la plantación por esquejes, plantando los cladodios a una altura de 1 a 3 cm bajo el suelo, la tierra ha de tener un buen drenaje y germinará con una mayor calidad si aplicamos abonos.

Se suele plantar en los meses de verano ya que es una planta de sol y calor, pero, aunque sea bastante resistente al calor sus condiciones óptimas de temperaturas medias anuales son de 16-28° C.

En invierno en cambio adopta una estrategia de reposo o estancamiento del crecimiento por lo que en esta época del año no es necesario su regadío, respecto a su altitud optima tiene un margen de 800-1800 msnm, sin embargo, el nopal suele proliferar fuera de sus condiciones óptimas.

Es importante la realización de podas progresivas tanto para que la planta sea más accesible a la hora de recolectar el fruto eliminando de esta manera las pencas más altas, las que se encuentren juntas, las mal orientadas y las que estén mirando hacia el suelo, a su vez también hay que realizarle podas para el mantenimiento y la salud de la planta eliminando aquellas pencas que son más viejas, las que están en mal estado o aquellas que estén dañadas por plagas o enfermedades.

Antes de empezar a cultivar el nopal hay que tener en cuenta una serie de anotaciones que son:

- Conocer las condiciones climáticas y el microclima del sitio donde vamos a realizar la plantación.
- Realizar un análisis físico y químico del suelo para conocer su composición.
- Seleccionar la variedad más adecuada la cual vamos a introducir.
- Preparar correctamente el suelo.
- Diseñar barreras cortavientos.

- Determinar el marco de plantación y la orientación de las hileras.
- La instalación del sistema de riego.

Una vez tenido en cuenta estas anotaciones pasamos a realizar la selección del lugar donde queremos introducir nuestra plantación de nopal, teniendo en cuenta que es una especie que resiste bien las altas temperaturas sin consecuencias negativas, pero por otro lado debemos de saber que en localizaciones donde las temperaturas disminuyan o alcance temperaturas iguales a -5 grados debemos de evitarlas ya que se relacionan con abortos de flores y problemas de desarrollo. (Inglese, 2018)

Debemos elegir un suelo para cultivar este tipo de plantas que predominen aquellos con texturas arenosas a arena limosas, ya que son bastantes susceptibles a la falta de oxígeno en suelos, estos son los suelos ideales para estas plantas aunque a veces pueda causar un aumento de litros de agua empleado para su riego (Mexicana De La Ciencia Del Suelo et al., 2003), este además debe de contar con una profundidad de 300mm y debemos tener en cuenta que los nopales son muy susceptibles a las concentraciones de sales en la zona radicular de los suelos por ello debemos elegir un terreno que no disponga de una gran concentración de sales.

El terreno ha de prepararse para su plantación, realizando nivelaciones del terreno para que sea más homogéneo, realizando la marcación de las hileras de plantación y la colocación de las líneas para el riego, realizar una labranza profunda del suelo (500 mm mínimo) además de realizar cercados en las plantas jóvenes en aquellos lugares donde se puedan encontrar fauna silvestre o animales domésticos que puedan dañar las plantas.

Antes de comenzar el proceso de plantación hay que corregir desbalances de nutrientes y del pH del suelo para que el cultivo se desarrolle de una manera óptima, teniendo en cuenta que el pH de 6.5-7.5 es considerado como el nivel óptimo de su desarrollo y en función de los resultados de los análisis del suelo anteriormente realizados nos indicaran los niveles en el suelo de los nutrientes y de esta manera conocer si alguno de ellos está en exceso o en defecto (Inglese, 2018).

Para asegurarnos de que el viento no va a ser un factor destructor de nuestros cultivos hay que tener en cuenta que aplicando barreras de viento alrededor de los cultivos de nopales, ya que estos son muy susceptibles de sufrir daños y roturas en los cladodios por efecto del viento, una de las mejoras formas de protegerlos ante estos efectos meteorológicos es colocar barreras vivas alrededor de ellos, estas barreras se elegirán según la zona geográfica donde nos encontremos.

También según la zona geográfica donde nos encontremos, el clima del sitio y la demanda de nopal es interesante tener en cuenta que variedad de nopal vamos a introducir en nuestros cultivos ya que las distintas variedades nos hacen diferenciar significativamente en su rendimiento, calidad y adaptación a zonas específicas.

Cuando ya hemos tenido en cuenta todas las anotaciones anteriores, nos adentramos en cómo ha de ser el diseño de las plantaciones, empezando por la orientación que tienen que tener las hileras, ya que son muy importantes ya que esta orientación permanecerá toda la vida del cultivo y no podrá ser cambiada posteriormente, *Opuntia ficus-indica*, se suele cultivar con una orientación este-oeste de acuerdo con Nobel (1982) excepto en bajas latitudes o donde el crecimiento vegetativo ocurre en invierno.

Existen muchas formas distintas de plantación del nopal, y depende del tamaño del terreno, el manejo del sitio, la pendiente, el clima, la fertilidad del sitio, etc. Pero la forma más usada actualmente para este tipo de plantas es la que denominamos plantación en seto sobre diseños rectangulares comúnmente usadas en las extensas huertas de nopales de Sudáfrica, el espaciamiento entre planta y planta es distinto según en la localización en la que nos encontremos, tomando como modelo las plantaciones sudafricanas tenemos que las plantas están establecidas con una distancia de 2x5m a 2x4m pudiendo incorporar de esa manera unas 1000 a 1250 plantas por hectárea de terreno (Inglese, 2018).

En este tipo de plantaciones de nopal no se suelen usar semillas para su plantación si no que se usan partes vegetativas, en este caso los cladodios. La raíz de estos cladodios alcanza su máxima tasa de crecimiento a finales de primavera y en el principio del verano para que de esta manera la planta sea capaz también de establecerse en el terreno y sea capaz de sobrevivir al invierno.

Se ha podido observar que debido a su sistema radicular el nopal puede ser bastante sensible a la competencia con las malezas por lo que en un cultivo convendría realizar sucesivos controles de maleza tanto químicos como mecánicos para asegurar una buena producción y desarrollo de los individuos.

Conociendo que el nopal es una planta que puede soportar precipitaciones medias que rondan los 200mm/año, y sabiendo que su rango óptimo va de 400-600 mm/año, debemos de realizar riegos en aquellas zonas donde las precipitaciones sean menores a esos valores óptimos en aquellas zonas que tiene veranos con temperaturas muy altas y con escasas precipitaciones estivales, por ello en zonas mediterráneas es aconsejable realizar el riego en estos cultivos en épocas estivales.

1.3.1 Generalidades del Nopal

El Nopal pertenece al género llamado *Opuntia* autóctono de América el cual los Aztecas en las épocas prehispánicas los cuales fueron los que más usos le dieron a esta planta, utilizaban el nopal como sustrato para cultivar una especie de insecto del género *Dactylopius spp* conocido como “Cochinilla de nopal” o “Grana” del cual extraían un valioso tinte para teñir los textiles, en aquella época le dieron el nombre de “Tenochtitlán” que significa fruta (Nochtli) de piedra (Tetl), dándole a su vez el nombre de “Nopalli” al fruto denominado tuna (Sáenz, 2006).

Pertenece a la familia de las cactáceas, hay catalogadas 258 especies de las cuales 100 de ellas se encuentran en México, donde se encuentran 10,000 Ha de terreno cultivado para el consumo humano.

Dado que el Nopal es un cultivo que es muy resistente se está usando en diferentes lugares del mundo como cultivo alternativo cuando la calidad del suelo es deficiente o en lugares donde hay escasez hídrica ya que se adaptan bien a las zonas áridas y semiáridas.

El nopal al igual que las demás cactáceas es una planta que no está compuesta por hojas, solo pueden desarrollar algunas hojas en su etapa de juventud, por lo que esta planta está compuesta por tallos con forma de raqueta que se le da el nombre de cladodios o pencas las cuales se encargan de almacenar y retener agua en ellas gracias a un entramado de carbohidratos llamados mucílagos que vulgarmente se le conoce como baba del nopal.

Una de las características reseñables de esta planta es que dispone de espinas en sus cladodios, su cantidad depende de las condiciones del medio en el que se encuentre, además forman a partir de esas pencas o cladodios unas flores llamadas areolas características de la familia de las cactáceas.

Estas espinas reducen la transpiración de las cactáceas debido a que estas necesitan menos agua que una hoja convencional y carecen de estomas, actúan tanto como una barrera física para sus depredadores, protegiendo de esa manera a la planta y sus frutos, participan en la regulación de la temperatura de la planta debido a que el aire forma un gradiente entre ellas y son capaces de recoger agua de rocío que más tarde caen dirigidas hacia la zona radicular disminuyendo el déficit hídrico. (Ferriol Molina, 2016)

Estas especies de plantas tienen pocos estomas por unidad de superficie y estos permanecen cerrados durante el día y se abren durante la noche para disminuir al máximo la pérdida de transpiración de agua durante el día, este tipo de plantas reciben el nombre de plantas CAM que corresponde al metabolismo del ácido crasuláceo. La apertura de los estomas en horas nocturnas permite la toma de CO₂. Si se dan condiciones de déficit hídrico extremo los estomas permanecerán cerrados tanto de día como de noche evitando la entrada de CO₂ al organismo, lo que da lugar a la utilización del agua y el CO₂ producido por la respiración para realizar la fotosíntesis (Sáenz, 2006).

TAXONOMIA	
Reino	Vegetal
SubReino	Embryophita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Genero	Opuntia

1.3.2 El Nopal en los ecosistemas: beneficios y servicios

Tiene una gran variedad de beneficios y servicios que puede brindar al ecosistema, uno de ellos es que absorbe una gran cantidad de CO₂ del ambiente, es decir, puede ayudar a apaciguar los estragos del cambio climático, siendo una planta tan resistente que puede incluso abordar zonas con un gran nivel de degradación.

Debido a su resistencia a las sequías extremas puede servir de alimento tanto para aquellos animales salvajes como domésticos, ya que en sus pencas y en su fruto concentran gran cantidad de agua en su interior, por lo que puede llegar a convertirse en un bien imprescindible para que estos animales puedan subsistir en ambientes con extremadas sequías o en zonas áridas y semiáridas.

Es una planta que llega a ocupar mucha extensión, por lo que en ambientes áridos el viento, causante de que aumente la erosión en zonas degradadas, transporta normalmente aquellos materiales con menos densidad que son la materia orgánica, los limos y arcillas, elementos muy importantes en la composición del suelo, por lo que los nopales al tener dicha extensión considerable atrapan las partículas con sus cladodios y las van depositando en el suelo, por lo que ayudan a contrarrestar los efectos de la degradación y consiguen aumentar la calidad del suelo donde se encuentran y mejorar también las condiciones de los suelos adyacentes.

Sirve de alimento para los seres humanos, como ya lo están usando en países como México y podría llegar a convertirse en un producto que redujese la desnutrición y mejorase la calidad de vida de los habitantes de aquellas zonas que por su distribución geográfica o potencial hídrico tengan una mayor disposición a la aparición de sequías de larga duración.

Se ha usado y se usa también como medio de cultivo para un tipo de cochinilla de la cual se extrae el colorante rojo que recibe el nombre de carmín o con el código de identificación dado por la Unión Europea como E-120 en la industria, es un colorante natural ampliamente utilizado que puede sustituir a los colorantes de origen sintético, esta cochinilla *Dactylopius spp* parásita al nopal, entre otros, y se alimenta de él por lo que ésta práctica pasa a ser de tipo agrícola-biológico y se ha de tener en cuenta que el manejo de la planta para conseguir este producto ha de ser diferente a cuando queremos obtener sus frutos.

Tiene grandes aplicaciones en la industria cosmética sobre todo en países como México donde esta práctica está más extendida y donde se producen productos como cremas hidratantes y otros productos para el cabello.

En el sector de la artesanía también está bastante extendido el uso del nopal para construir a partir de sus pencas lignificadas canastos y otros utensilios de uso diario.

1.3.3 El cultivo de Nopal en España: importancia agroecológica y económica

Esta característica planta de la familia de las cactáceas fue introducida en España desde México, hay indicios de que los primeros nopales cultivados en España se dieron alrededor de Sevilla y Cádiz en el siglo XVI dado que fueron puntos terminales de los viajes de las indias y se fueron extendiendo por toda la cuenca mediterránea.

En España podemos encontrar plantaciones de nopal en diferentes lugares de la península, pero hemos de saber que son cultivos a baja escala o de huertos familiares, ahora mismo una de las zonas que más cantidad de plantaciones hay es en la isla de Lanzarote en las Islas Canarias.

En nuestro país, no hay plantaciones de nopal tanto para el uso de sus cladodios, como una verdura o para consumir sus nutritivos frutos, las tunas, si no que en España se usan los nopales como sustrato para producir la preciada cochinilla *Dactylopius spp* de la que se extraen unos valiosos colorantes naturales usados en multitud de productos tanto de la industria alimentaria como la cosmética, textil, etc.

En las Islas Canarias se empezó a cultivar el nopal en el siglo XIX con fines de extraer de él la cochinilla algodonosa la cual fue una importante solución al declive económico que tenían las islas en esa época.

Esta cochinilla *Dactylopius spp* es un grupo americano de insectos hemípteros, de este insecto se puede extraer importantes cantidades de ácido carmínico el cual es un pigmento extraído primordialmente de *Dactylopius coccus* que es usado como colorante en alimentos, textil, cosméticos y en textiles. (Palacios-Mendoza, Nieto-Hernández, (Llenderal-Cázares, & González-Hernández, 2004).

Es un animal parásito del género *Opuntia*, y para que en un cultivo se dé la suficiente densidad de cochinilla para poder ser extraída posteriormente y sacar un beneficio de ella, hay que infestar las plantas artificialmente con este parásito.

Para el uso de plantaciones comerciales de nopal dedicadas a la extracción de cochinilla algodonosa se suelen hacer con variedades de nopal sin espinas, ya sea a cielo abierto o bajo cubierta, las plantaciones suelen tener unas 20.000 plantas/hectárea, las plantas suelen ser abonadas con 30 t/año de estiércol tanto de vaca, pollo o cabra (Inglese, 2018).

En Lanzarote, lugar donde más cosechas de cochinilla hay en España, se utiliza el método de cosecha de cielo abierto, se cosechan en noviembre después de tres meses de infestación con una herramienta especial denominada “cuchara”, que consiste en un recipiente de hojalata con un mango compuesto de “pírgano” que es aquella hoja de palmera que se encuentra en la zona central, con esta herramienta se extraen los insectos maduros que están listos para su recolección cayendo a un recipiente denominado “milana” para evitar que caigan al suelo y quedan aquellos que aún no lo están maduros en las tuneras para recolectarlos cuando estén listos (Pallarés Padilla, 2004).

Una vez cosechadas las cochinillas se procede a realizar la muerte o sacrificio de estos animales parásitos que pueden realizarse de formas muy variadas como la inversión de ellos en agua hirviendo, la sofocación

con vapor de agua, o la congelación a temperaturas bajo 0 son una de las técnicas más utilizadas, después de la fase de sacrificio debemos transportarlos hacia la zona de secado que ha de estar totalmente libre de humedad y se procede a secar el producto mediante secadores solares, pudiendo realizarlo con insolación directo o en sombra, cuando el producto está completamente seco pasamos a realizar el proceso de selección el cual implica separar del producto final todos los machos que no producen ácido carmínico, las cochinillas inmaduras, las mudas, la cera y otros elementos que no sean cochinillas algodonosas hembras y maduras ya que aquellos ejemplares más grandes contienen más pigmento (Inglese, 2018).

1.3.4 Respuestas potenciales del Nopal al cambio climático

Al producirse un aumento en las temperaturas globales, debido al efecto invernadero intensificado que es producido por un aumento de los GEI, puede producir cambios en la distribución de las plantas, en especial podría hacer que estas elevadas temperaturas beneficiasen al nopal de una manera tal que aumentase su distribución en zonas que actualmente no puede desarrollarse adecuadamente debido a la falta de calor o de sol que imposibilita su crecimiento y su producción, pudiendo llegara a ser un cultivo accesible en aquellos lugares que actualmente tienen unas temperaturas medias más suaves.

Este cambio climático puede producir en distintos cultivos que las plantas se vean amenazadas por el exceso calor o por los cambios antropogénicos que producen situaciones de estrés, pero en el caso de plantas que utilizan el mecanismo CAM dado que los intercambios de gases se dan en horas nocturnas y durante el día los estomas permanecen cerrados para evitar la pérdida de agua por evapotranspiración, por más que aumentasen las temperaturas diurnas no afectaría en gran medida a este tipo de plantas, pero un aumento de la temperatura nocturna que actualmente la media esta entre 10-20 grados centígrados, sí que podría llegar a producir problemas en el intercambio gaseoso y por ende disminuir el crecimiento y la producción de estas especies.

Si que es cierto que los organismos vegetales que pertenecen a la familia de las cactáceas llevan millones de años adaptándose a ambientes difíciles de colonizar por otras especies vegetales, por ello en zonas desérticas o lugares muy áridos predominan este tipo de plantas, han evolucionado de una manera que en el caso del nopal, es capaz de acumular agua y otros compuestos en sus cladodios que pueden utilizar en aquellos momentos de estrés hídrico, también cabe destacar la pérdida de funcionalidad de las hojas, habiendo desaparecido completamente en sus estadios mas adultos y han sido sustituidas por espinas, las cuales les sirven para que pierdan menos agua por evapotranspiración además de tener una función secundaria que consiste en que gracias a estas espinas dirigen el agua de las precipitaciones o del rocío del ambiente hacia sus raíces.

Por lo que este tipo de plantas que han ido evolucionando y adaptándose a ambientes con extremadas temperaturas diurnas, serán menos susceptibles a los cambios producidos por los efectos del cambio

climático y por el calentamiento global intensificado por acción de los, pero a su vez se produciría una disminución de la biodiversidad de especies a lo largo de todo el globo terráqueo producidos por los efectos climáticos modificados antropogénicos.

2. OBJETIVO

El objetivo general de esta propuesta es la de introducir un cultivo alternativo que sea capaz de adaptarse a condiciones medioambientales adversas como sequía extrema, altas temperaturas, salinidad y/o toxicidad por boro. Todo ello, con la premisa fundamental de que tenga un buen comportamiento en condiciones de agricultura ecológica bajo condiciones de clima cambiante.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Material vegetal y condiciones del cultivo

Para la realización de este ensayo se emplearon plantas de Nopal (*Opuntia ficus-indica*), obtenidas en Viveros Torresplant S.L. (Murcia). Dichas plantas fueron trasplantadas a macetas de 18 L con suelo procedente de una de las parcelas pertenecientes a la Cooperativa Agrícola Católica de Orihuela (*características del suelo en el Anexo I*) para que se fueran aclimatando a sus nuevas condiciones ambientales (Imagen 2). Una vez trasplantadas, las plantas de Nopal se regaban una vez al día con agua procedente del trasvase Tajo-Segura durante aproximadamente 8 semanas que duró la fase de aclimatación (marzo-mayo 2020). El riego se aplicaba mediante un sistema de goteros autocompensantes de 4 L h⁻¹ con un volumen de riego suficiente para que se produjera drenaje en cada evento de riego y a demanda del cultivo.

Las plantas se cultivaron de la forma indicada anteriormente en dos invernaderos simultáneamente (Imagen 1): un invernadero de tipo multitúnel situado en la finca experimental del CEBAS “La Matanza” situada en el término municipal de Santomera (a 18 km de Murcia); y otro invernadero también tipo multitúnel situado en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández (Desamparados, Alicante). Para el control de la temperatura, se disponía, en ambos invernaderos, un sistema de refrigeración del tipo “Cooling-System” y de una malla de sombreado de Aluminio (30%). Los invernaderos incluían también un sistema de sensores de irradiación, temperatura y humedad relativa colocados a una altura de 1,5 m. El experimento se llevó a cabo durante los meses comprendidos entre marzo y julio de 2020 y todos los datos climatológicos se recogían y eran almacenados periódicamente en una base de datos para su posterior análisis (*datos climatológicos en el Anexo II*).



Imagen 1. Vista aérea de los invernaderos donde se llevaron a cabo los ensayos del experimento.

3.2 Manejo del cultivo: Simulación del cultivo agroecológico bajo condiciones de invernadero.

La agroecología busca, en términos generales, una gestión eficaz de los sistemas agrarios que vayan en armonía con el medio ambiente. Para ello, adopta 'Modelos de Gestión Agrosistémica' basados, entre otros factores, en la optimización de los recursos, en este caso fertilizantes, agua y electricidad. A este respecto, los técnicos de la Cooperativa Agrícola Católica de Orihuela, gracias a su experiencia, marcaron las pautas para gestionar los invernaderos lo más eficiente posible dentro de la agricultura ecológica durante la parte experimental de este proyecto. Dicho manejo consistió en: i) una fertilización llevada a cabo mediante el empleo de fertilizantes orgánicos y/o minerales expresamente autorizados para agricultura ecológica; ii) para control de plagas y enfermedades, se colocaron trampas cromáticas a lo largo del invernadero y se aplicaron periódicamente fitosanitarios autorizados para agricultura ecológica para el control de la mosca blanca (*Trialeuro desvaporariorum* y *Bemisa tabaci*), pulgones (*Myzus persicae* y *Aphis gossypii*), trips (*Frankliniella occidentalis*), araña roja (*Tetranychus urticae*) y minador (*Phyllocnistis citrella*); y iii) el riego se hizo bajo demanda, cuya dosis y frecuencia de aplicación se estableció a partir del drenaje del riego y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva de drenaje.



Imagen 2 Plantas de Nopal (*Opuntia ficus-indica*) empleadas para este proyecto.

3.3 Estréses abióticos estudiados

Tras 8 semanas de aclimatación a las condiciones de invernadero, se estudió el comportamiento de las plantas de nopal a diferentes tipos de estrés ambientales: sequía, salinidad, toxicidad por Boro y altas temperaturas. Para ello, se comparó el comportamiento de las plantas crecidas bajo esas condiciones al de las crecidas bajo condiciones control. Estas plantas estuvieron sometidas a este tipo de estrés durante 5 meses. Por tanto, los tratamientos fueron los siguientes:

Tratamiento	Riego (% ETc)	T ^a media diaria (°C)	NaCl (mM)	Boro (mg L ⁻¹)	Invernadero
1. Control	100	30	0	0.25	
2. Sequía	60		0	0.25	
3. Salinidad	100		50	0.25	
4. Toxicidad por Boro	100		0	5	
5. Altas Temperaturas	100	35	0	0.25	

3.4 Parámetros analizados

3.4.1 Parámetros de crecimiento

Al final del ensayo, se midieron la altura (cm) y la anchura de la penca principal (mm) en las plantas de Nopal. Tras esto, se muestreó la parte aérea por completo (gramos de peso fresco; g Pf) y se tomaron muestras de 4 x 4 cm de las pencas por planta; las cuales se lavaron con abundante agua desionizada, se pesaron y se procedió al secado en estufa a 60 °C durante al menos 48 h (Imagen 3). Tras esto, se volvieron a pesar para obtener el peso seco del trozo y poder correlacionarlo con la parte aérea de la planta (gramos de peso seco; g Ps).



Imagen 3 Muestreo de trozos de Nopal para su posterior análisis en laboratorio.

3.4.2 Porcentaje de reducción del crecimiento y niveles de tolerancia al estrés.

Para la determinación del nivel de tolerancia a los distintos estréses abióticos estudiados se calculó el porcentaje de reducción de la parte aérea de las plantas crecidas bajo esas condiciones con respecto al de las crecidas bajo condiciones control (datos tomados en g Ps). En la Tabla 1 se muestra los criterios seguidos en este proyecto para determinar el grado de tolerancia en función del % de reducción de la parte aérea:

Tabla 1. Nivel de tolerancia establecido en función del porcentaje de reducción de la parte área de los cultivos (g Ps) con respecto al tratamiento control

<i>Nivel de tolerancia</i>	<i>% Reducción</i>
<i>Muy tolerante</i>	< -20
<i>Tolerante</i>	-20 a 10
<i>Semitolerante</i>	11 a 30
<i>Sensible</i>	31 a 50
<i>Muy sensible</i>	51 a 100

3.4.3 Parámetros de fotosíntesis, fluorescencia de clorofilas y cuantificación del contenido relativo de clorofilas.

Al final del ensayo, se midieron parámetros de intercambio gaseoso, tales como: asimilación neta de CO₂ (ACO₂; μmol m⁻² s⁻¹), conductancia estomática (gs; mmol m⁻² s⁻¹), transpiración foliar (Eleaf; mmol m⁻² s⁻¹), uso eficiente del agua (UEA = ACO₂/Eleaf; μmol CO₂ mmol⁻¹ H₂O) y CO₂ subestomático (Ci; μmol mmol). Estos parámetros se midieron entre las 8:00 y las 10:00 de la mañana utilizando un analizador portátil de gases (PP System Ciras2, UK). Durante las medidas, el equipo se configuró para mantener la luz y la concentración de CO₂ constante en la cámara de medida (1.000 μmol m⁻² s⁻¹ de PAR y 400 ppm de CO₂). En las mismas hojas donde se llevaron a cabo las medias de intercambio gaseosos, se midió la fluorescencia de clorofilas utilizando un fluorímetro de pulso modulado FMS-2 portátil (Hansatech Instruments Ltd., UK). El equipo de fluorescencia de clorofilas mide los siguientes parámetros relacionados con la fase luminosa de la fotosíntesis, entre ellos (Imagen 4): i) Fv'/Fm' – eficiencia de las antenas en los centros de reacción del fotosistema II (PSII), ii) ΦPSII – eficiencia fotoquímica del PSII, iii) qP – “quenching fotoquímico” o centros del PSII que se encuentran en estado ‘abierto’, vi) NPQ – “quenching NO fotoquímico” o energía disipada en forma de calor y v) ETR – índice de tasa de transporte de electrones.

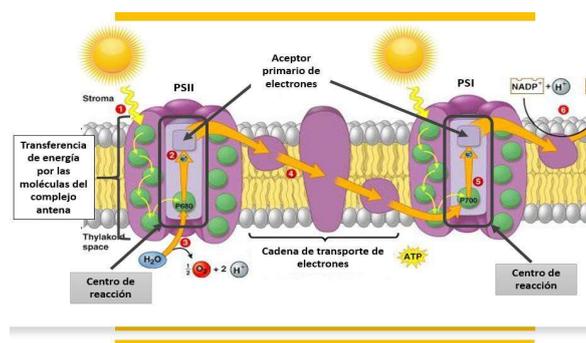


Imagen 4 Diagrama de la transferencia del fotón durante la fase luminosa de la fotosíntesis desde que entra en contacto con la hoja hasta que llega al centro de reacción del PSII y pasa así a la cadena de transporte de electrones.

3.4.4 Medidas de humedad del suelo/transpiración del cultivo

Se realizaron medidas de humedad del suelo/transpiración al inicio (TI – julio), a mitad (TM – agosto) y al final (TF – septiembre) del ensayo con un sensor de humedad relativa portátil para suelo modelo TDR 100 (Time Domain Reflectometry; Fieldscout; (Imagen 5). Este aparato mide la humedad volumétrica a distintas profundidades. Lo que se pretendía era obtener medidas indirectas de la transpiración del cultivo midiendo la pérdida de humedad del suelo entre dos momentos concretos del día. Se contaba con un maceta control ‘sin planta’ para contabilizar la pérdida de humedad del propio suelo entre esos dos puntos. Los resultados se dan en ml de agua transpirada por hora.



Imagen 5 Sensor de humedad relativa portátil para suelo modelo TDR 100 (Time Domain Reflectometry; Fieldscout).

3.4.5 Análisis mineral.

En el tejido vegetal muestreado una vez seco y molido, se determinó la concentración de nutrientes minerales (K, Mg, Ca, P, Mn, Zn, Fe, Na y B) para cada tratamiento por espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP, Iris Intrepid II, Thermo Electron Corporation, Franklin, USA), previa la digestión con $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2$ (5:3 en volumen) utilizando un microondas (CERM Mars Xpress, North Carolina, USA) con rampa de temperatura alcanzado los 200 °C. La concentración de Cl^- en el tejido foliar se determinó con un colorímetro Corning 926 (Sherwood, UK) previa extracción con agua destilada.

3.4.6 Determinación del daño oxidativo (MDA y H₂O₂) y actividad antioxidante.

Se determinó el daño oxidativo producido por los diferentes estreses estudiados mediante la cuantificación de malondialdehído (MDA) usando el método Hodges y col. (1999). Por su parte, la cuantificación de peróxido de hidrógeno se llevó a cabo siguiendo el método descrito por Yang y col. (2007). Para la determinación de la actividad antioxidante se usó el método de decoloración del radical DPPH propuesto por Brand-Williams y col. (1995). La actividad antioxidante se expresa como porcentaje de inhibición (Imagen 6), lo cual corresponde a la cantidad de radical DPPH neutralizado por el extracto a una determinada concentración. También se calculó la velocidad de inhibición (% min⁻¹) tras la inhibición instantánea.

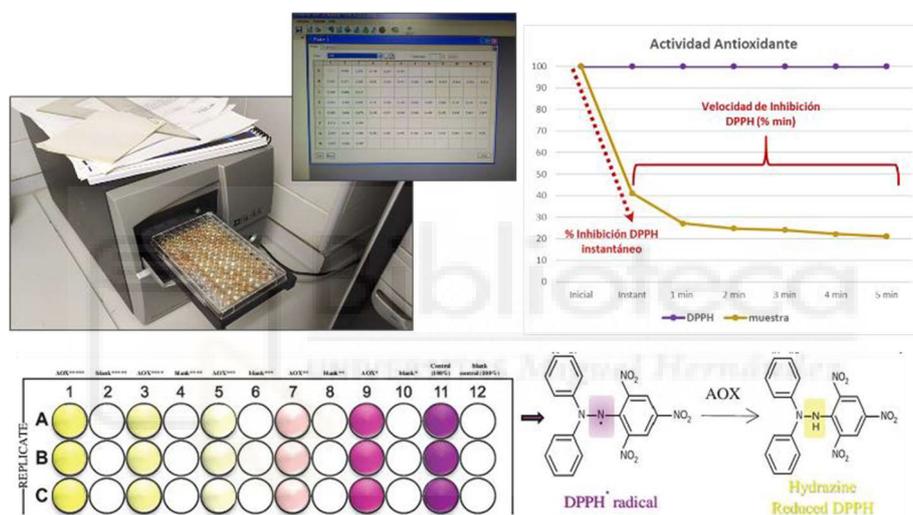


Imagen 6 Cuantificación de la actividad antioxidante por el método de decoloración del radical DPPH.

3.5 Diseño experimental y análisis estadístico.

Por tanto, se presentó un diseño UNIFACTORIAL (Imagen 7), ensayándose cuatro tipos de estreses abiótico (sequía, salinidad, toxicidad por B y altas temperaturas) sobre plantas de Nopal y comparándolas con las plantas control. En consecuencia, el análisis estadístico incluyó un análisis de la varianza (ANOVA) mediante el paquete estadístico SPSS versión 24. Los valores que se presentan para cada tratamiento son las medias de 6 repeticiones por tratamiento ($n=6$). Cuando en el ANOVA, el factor resultaba significativo ($P<0.05$) se aplicaba el test de rangos múltiples de Duncan para la separación de las medias.

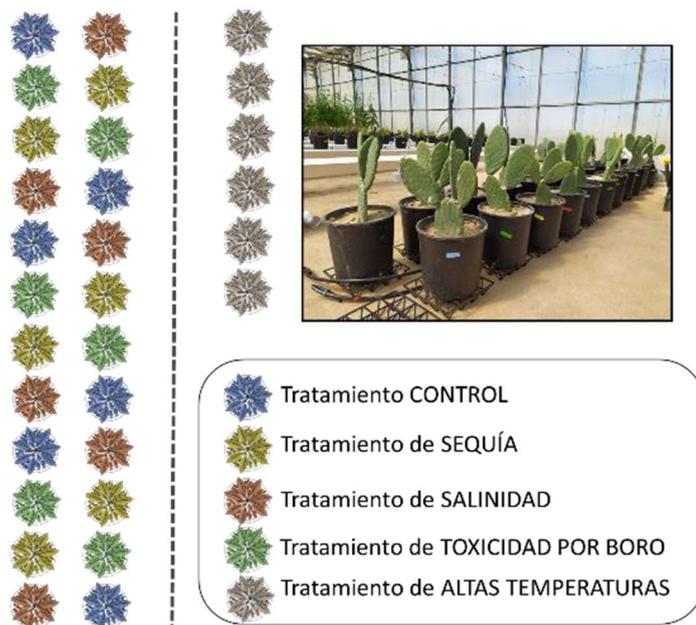


Imagen 7 Diseño experimental ensayo Nopal.

4. RESULTADOS

4.1 Porcentaje de reducción de la Parte Aérea (g Ps) y grado de tolerancia

Las plantas de Nopal disminuyeron significativamente el crecimiento de su PA a consecuencia de los cuatro estreses aplicados (Fig. 4.9.A). Las plantas presentaron los siguientes porcentajes de reducción a consecuencia de dichos estreses, presentados en orden decreciente (Fig. 4.9.B y tabla 2): 'Sequía' (32%) > 'Altas temperaturas' (16%) > 'Toxicidad por boro' (4%) ≈ 'Salinidad' (2%); lo que convierte a las plantas de Nopal, según nuestra clasificación, en un cultivo sensible a la 'sequía', semitolerante a las 'altas temperaturas' y tolerante tanto a la 'salinidad' como a la 'toxicidad por boro'. En la tabla 3 se muestra el resto de los parámetros de crecimiento estudiados para este cultivo. Por tanto, enfocando a un sistema agroecológico en condiciones de clima cambiante en zonas donde se sufran problemas de escasez de recursos hídricos el cultivo de Nopal no es el más idóneas para cultivar como alternativa en este tipo de condiciones, a no ser que se acompañe con estrategias adecuadas que incrementen su tolerancia a dicha condición. No obstante, si dicho déficit hídrico se suple con el empleo de aguas de baja calidad que contengan altas concentración de boro (de hasta 15 ppm) o sales (hasta 100 mM) el Nopal podría ser una buena alternativa ya que es un cultivo que tolera adecuadamente dichas toxicidades.

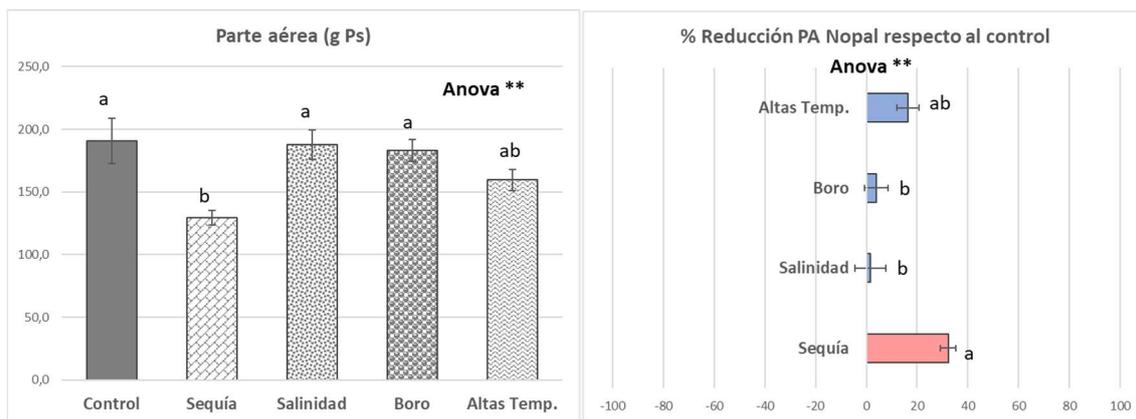


Figura 1 A. Gramos Peso seco (Ps) de la Parte Aérea (PA) de plantas de Nopal crecidas en condiciones de estrés abiótico: 1. Sequía (60% ETc), 2. Salinidad (100 mM), 3. Boro (15 ppm) y 4. Altas temperaturas (+5°C del control), y comparadas con un Control. B. Porcentaje de reducción de la parte aérea en los diferentes estreses abióticos con respecto al tratamiento control en el cultivo de Nopal. En el ANOVA: ** indica diferencias significativas para $P < 0.01$. Las *letras minúsculas* diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos establecidas por el test de rangos múltiples de Duncan. La barra vertical indica el error estándar de la media ($n=6$).

Tabla 2. Nivel de tolerancia del cultivo de Nopal a los distintos estreses abióticos estudiados según la

tabla 1

Estrés Abiótico	% Reducción PA	Nivel de Tolerancia
Sequía	32	Sensible
Salinidad	2	Tolerante
Boro	4	Tolerante
Altas temperaturas	16	Semitolerante

Tabla 3 Parámetros de crecimiento de plantas de Nopal crecidas en condiciones de estrés abiótico: 1. Sequía (60% ETc), 2. Salinidad (100 mM), 3. Boro (15 ppm) y 4. Altas temperaturas (+5°C del control), y comparadas con un Control.

Tratamiento	Nº Pincas	Altura (cm)	Grosor (mm)	Biomasa Total (g Pf)	CRA (%)	Chl ($\mu\text{g g}^{-1}$ Pf)
Control	11	60 ab	25.50 ab	1910.0 b	90 b	28.4
Sequía	9	58 b	23.93 b	1387.2 c	91 b	18.0
Salinidad	12	62 ab	27.76 ab	2393.2 a	92 a	20.0
Boro	11	69 a	30.89 a	2418.3 a	92 a	19.5
Altas temperaturas	11	64 ab	23.06 b	2022.3 b	92 a	18.0
ANOVA	ns	*	*	***	***	ns

En el ANOVA: 'ns' indica diferencias no significativas para un intervalo de confianza del 95%; por su parte: * y *** indican diferencias significativas para $P < 0.05$ y 0.001 , respectivamente. Las *letras minúsculas* diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos establecidas por el test de rangos múltiples de Duncan. La barra vertical indica el error estándar de la media ($n=6$).

4.2 Síntomas de fitotoxicidad en las pencas de Nopal en función del estrés

En las pencas de Nopal no se observaron a simple vista síntomas graves relacionados con los cuatro tipos de estreses a las que fueron sometidas (Imagen 8). No obstante, la cuantificación de clorofilas en dichas pencas, a pesar de que el análisis estadístico no reveló diferencias significativas entre los distintos tratamientos, sí que pone de manifiesto una ligera disminución en la concentración de estos pigmentos a consecuencia de los distintos estreses (Tabla 3). A este respecto, tenemos que los tratamientos de 'sequía', 'altas temperaturas' y 'toxicidad por boro' fueron los que más redujeron la concentración de clorofilas con respecto al control (reducción del 35%).



Imagen 8 Fotografía de las pencas sin síntomas de fitotoxicidad visibles de plantas de Nopal crecidas en condiciones de estrés abiótico: 1. Sequía (60% ETC), 2. Salinidad (100 mM), 3. Boro (15 ppm) y 4. Altas temperaturas (+5°C del control), y comparadas con un Control.

4.3 Parámetros fisiológicos: transpiración del cultivo

En cuanto a la transpiración del cultivo, y en términos generales para el cultivo de Nopal, encontramos que la 'salinidad' fue el único estrés, de los estudiados, que afectaron a esta variable significativamente al final del ensayo (Tabla 4). Las plantas control presentaron valores de (ml h⁻¹): 0.27 (mayo) < 0.34 (julio) > 0.18 (agosto), a lo largo del ensayo. Al final del ensayo, es cuando encontramos las diferencias a nivel de tratamientos, donde las plantas crecidas con 'Salinidad' fueron las únicas que incrementaron su transpiración en un 1.8 veces más con respecto a las plantas control.

Tabla 4. Medidas generales de transpiración del cultivo de nopal tomadas en tres momentos diferentes del ensayo (TI, TM y TF) en plantas crecidas bajo condiciones de estrés abiótico: 1. Sequía (60% ETC), 2. Salinidad (100 mM), 3. Boro (15 ppm) y 4. Altas temperaturas (+5°C del control), y comparadas con un Control.

<i>Tratamientos</i>	<i>TI (ml h⁻¹)</i>	<i>TM (ml h⁻¹)</i>	<i>TF (ml h⁻¹)</i>
	<i>Mayo</i>	<i>Julio</i>	<i>Agosto</i>
<i>Control</i>	0,27	0,34	0,18 b
<i>Sequía</i>	0,27	0,37	0,18 b
<i>Salinidad</i>	0,32	0,60	0,32 a
<i>Boro</i>	0,34	0,40	0,15 b
<i>Alta Temp.</i>	0,27	0,39	0,18 b
<i>ANOVA</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	***

En el ANOVA: 'ns' indica diferencias no significativas para un intervalo de confianza del 95%; por su parte, * indica diferencias significativas para P<0.05 (n=4).

4.4 Nutrición mineral

En la tabla 5/figura 2 se muestra la concentración de Cl, Na y B cuantificados en el tejido foliar promediado para el cultivo de Nopal. Para las plantas crecidas bajo condiciones normales, la concentración de estos tres elementos en las pencas fue de 2.40 g 100 g⁻¹ Ps, 0.0045 g 100 g⁻¹ Ps y 30.2 mg Kg⁻¹ Ps, respectivamente. Las plantas de nopal crecidas bajo condiciones de 'salinidad' no presentaron diferencias significativas con las plantas control en lo que respecta a la concentración de Cl y Na detectada en sus pencas; por el contrario, las plantas de nopal crecidas bajo condiciones de 'toxicidad por boro' sí que incrementaron la concentración de este elemento en 8.1 veces más con respecto a dichas plantas control (Tabla 5).

Tabla 5 Nutrición Mineral. Concentración de Cl, Na y B y relación Na/K cuantificados en plantas de Nopal crecidas en condiciones de estrés abiótico: 1. Control, 2. Salinidad (100 mM) y 3. Boro (15 ppm).

<i>Tratamiento</i>	<i>Muestreo Final (05-ago-2020)</i>			
	<i>Cl (g 100 g⁻¹ Ps)</i>	<i>Na (g 100 g⁻¹ Ps)</i>	<i>Relación Na/K</i>	<i>B (mg Kg⁻¹ Ps)</i>
<i>Control</i>	2.40	0.0045	0.002	30.2
<i>Salinidad</i>	2.26	0.0041	0.002	<i>n.c.</i>
<i>Boro</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	245.5
<i>ANOVA</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	***

En el ANOVA: 'ns' indica diferencias no significativas para un intervalo de confianza del 95%; por su parte: *** indica diferencias significativas para P<0.001. Las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos establecidas por el test de rangos múltiples de Duncan. La barra vertical indica el error estándar de la media (n=6). 'n.c.' indica que no ha sido cuantificado.



Figura 2. Representación de la distribución de la concentración de los iones: Cl, Na y B, en los tres tejidos analizados para la Nopal. 'n.c.' indica que no ha sido cuantificado.

4.5 Daño oxidativo (MDA y H₂O₂) y actividad antioxidante en pencas

Cuando las plantas sufren algún tipo de estrés se puede producir un desequilibrio entre los sistemas de captación de luz y la síntesis de hidratos de carbono, que implicaría que la energía absorbida no fuera utilizada para la asimilación de CO₂. La consecuencia de dicho desequilibrio sería que los electrones generados fueran utilizados en otros procesos (fotorrespiración y, en menor medida, la reacción de Mehler). En ambos casos, esto conduce a la producción acelerada de especies reactivas de oxígeno (ROS). Las ROS son formas parcialmente reducidas del oxígeno, de las que destacan: el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), el anión superóxido (O_2^-) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2); y cuya formación es un proceso normal, inevitable y constante, imprescindible para la vida celular. No obstante, son especies altamente reactivas que según en qué circunstancias pueden provocar daños en las células, daños que se pueden cuantificar mediante la producción de MDA (malondialdehído). Pero este exceso de ROS puede ser eliminado por diversos sistemas antioxidantes. Según lo anteriormente expuesto, se cuantificó para este experimento la concentración de MDA, de H₂O₂ y la actividad antioxidante, a partir del consumo de DPPH (porcentaje de inhibición: PI), en pencas de nopal crecidas en condiciones de estrés abiótico (sequía, salinidad, toxicidad por boro y altas temperaturas) siempre comparadas con un Control. En análisis estadístico reveló para el cultivo de nopal diferencias significativas para los estreses y el control en el H₂O₂ y la actividad antioxidante (porcentaje de inhibición del DPPH). En condiciones normales, las plantas de aloe vera de esta variedad presentaron los siguientes valores de MDA, H₂O₂ y PI: 6.69 nmol g⁻¹ Ps, 2.61 mol g⁻¹ Ps y 26%, respectivamente. Los estreses que redujeron la concentración de H₂O₂ con respecto al control fueron la 'sequía' y la 'salinidad' (0.30 y 0.35 mol g⁻¹ Ps, respectivamente). Para la actividad antioxidante, los estreses de 'toxicidad por boro', 'salinidad' y 'altas temperaturas' redujeron el PI a valores de 15, 13 y 2%, respectivamente, mientras que las plantas crecidas en sequía lo aumentaron (35%) con respecto al cuantificado en las plantas control de nopal (Tabla 6). En cuanto al MDA, a pesar de que el análisis estadístico no reveló diferencias significativas entre tratamientos, podemos observar una acumulación de este producto en las plantas sometidas a 'altas temperaturas', 'salinidad' y 'toxicidad por boro' con valores de 11.52, 9.59 y 9.52 nmol g⁻¹ Ps, respectivamente (Tabla 6).

Tabla 6. Daño oxidativo (MDA y H₂O₂) y Actividad antioxidante cuantificadas en pencas de nopal crecidas en condiciones de estrés abiótico: 1. Sequía (60% ETC), 2. Salinidad (50 mM), 3. Boro (5 ppm) y 4. Altas temperaturas (+5°C del control), y comparadas con un Control.

<i>Tratamiento</i>	<i>MDA</i> (nmol g ⁻¹ Ps)	<i>H₂O₂</i> (μmol g ⁻¹ Ps)	<i>Actividad Antioxidante</i>
			% Inhibición DPPH
<i>Control</i>	6,69	2,61 a	26 b
<i>Sequía</i>	5,41	0,30 b	35 a
<i>Salinidad</i>	9,59	0,35 b	13 c
<i>Boro</i>	9,52	2,04 a	15 c
<i>Altas Temp.</i>	11,52	2,14 a	2 d
<i>ANOVA</i>	<i>ns</i>	<i>**</i>	<i>***</i>

En el ANOVA: '*ns*' indica diferencias no significativas para un intervalo de confianza del 95%; por su parte, **** y ***** indican diferencias significativas para P<0.01 y 0.001, respectivamente (n=3).
Concentración de muestra para la reacción: 1.25 mg mL⁻¹.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio reveló que el cultivo de nopal, según nuestra clasificación, es un cultivo sensible a la 'sequía', semitolerante a las 'altas temperaturas' y tolerante tanto a la 'salinidad' como a la 'toxicidad por boro'. Por tanto, enfocando a un sistema agroecológico en condiciones de clima cambiante en zonas donde se sufran problemas de escasez de recursos hídricos el cultivo de nopal no es el más idóneo para cultivarlo como alternativa en este tipo de condiciones, a no ser que se acompañe con estrategias adecuadas que incrementen su tolerancia a dicha condición. No obstante, si dicho déficit hídrico se suple con el empleo de aguas, aunque estas sean de baja calidad que contengan altas concentración de boro (de hasta 15 ppm) o sales (hasta 100 mM), el nopal podría ser una buena alternativa ya que es un cultivo que tolera adecuadamente dichas toxicidades.

6. BIBLIOGRAFÍA:

AGBICODO, E.M.; FATOKUN, C.A.; MURANAKA, S.; VISSER, R.G.F.; LINDEN VAN DER, C.G. 2009. Breeding drought tolerant cowpea: constraints, accomplishments, and future prospects. Retrieved from website:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-009-9893-8>

Ayers, R. S. (1989). Water quality for agriculture. Retrieved April 28, 2021, from www.fao.org website:

<http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E01.htm#ch1>

Barros, V. (2004). Cambio climático global. In Google Books. Retrieved from

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=hxIjOfHB11oC&oi=fnd&pg=PA7&dq=cambio+climatico&ots=L5GujoliWU&sig=IxeOv6Gle4qghqmy8dswTyGzUDY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true

Benavides Ballesteros, H. O., & León Aristizabal, G. E. (2007). INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. Retrieved from

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50544101/Gases_de_Efecto_Invernadero_y_el_Cambio_Climatic_o.pdf?1480106107=&responsecontentdisposition=inline%3B+filename%3DINFORMACION_TECNICA_SOBRE_GASES_DE_EFECTO.pdf&Expires=1623259595&Signature=dAkknQbjuAkVmm~jco8aLaTGyP42tVO3B-lhAPpVJD64iTKDLtKzuNWUbehALLsGQRVmqX6a4tCwaVRwRIN9IRicSz~lvZVI4NhK7pWO1MvyTN9iayFSw sPLQF5fJN2mdbjBrqQGKsUHxtK9JmeKXa1dsY6OQ9nlutSg~QUbj4I7PYG9VmWo3eZm4Ssj2bdtSJvjRczK~s xEA-BuPKwvZgr2~bwY2aJOTFNaZN-KIFxVilNsoSQGBsT3jO-WevxRKHNGLELxKi~xcjrIHVT7HFeLb1Ch-p4ukqom5rtEhOHXulUZGZb1MgXjz61NZwPR8Qh1MFjyw8XviUA8A &KeyPairId=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Chaudhari, S. (2003). Effects of Lorentz force on water using electro powered lattice magnets and applications of small clustered water. Retrieved from website: <https://vixra.org/pdf/1901.0243v1.pdf>

De, A., Salinidad En, L., Cultivo, E., Tomate, D., Prácticas, Y., De, A., ... Saavedra Del Real. (2007a). SOME EFFECTS OF SALINITY ON THE TOMATO CULTIVARS AND AGRONOMIC PRACTICES IN ITS MANAGING.

Retrieved from website: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v25n3/art06.pdf>

Fernanda, M., & Arias, C. (2009). REDUCCION DE BORO EN AGUA PROCEDENTES DE DESALACIÓN.

Retrieved from website: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13838/1/Tesis_Chillon.pdf

Ferriol Molina, M. (2016). Adaptación de las plantas al clima mediterráneo: la esclerofilia. Retrieved

from website: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68329/Ferriol%20-%20Adaptaci%3b%20de%20las%20plantas%20al%20clima%20mediterr%3a%20la%20esclerofilia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

González, L. M., González, M. C., & Ramirez, R. (2002). Cultivos Tropicales. Retrieved from website:

<https://www.redalyc.org/pdf/1932/193218114005.pdf>

- HAVLIN, J.; BEATON, J.; TISDALE, S.; NELSON, W. 1999. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. Retrieved from website: <http://testbank360.eu/sample/solution-manual-soil-fertility-and-fertilizers-7th-edition-havlin.pdf>
- Inglese, P. (2018). ECOLOGIA DEL CULTIVO, MANEJO Y USOS DEL NOPAL (C. Mondragon Jacobo, A. Nefzaoui, & C. Sáenz, Eds.). Retrieved from <http://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>
- Lichtenthaler, H. K. (1996). Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants. *Journal of Plant Physiology*, 148(1-2), 4–14. [https://doi.org/10.1016/s0176-1617\(96\)80287-2](https://doi.org/10.1016/s0176-1617(96)80287-2)
- Méndez Espinoza, C., & Vallejo Reyna, M. Á. (2019b). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56). Retrieved from website: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>
- Mexicana De La Ciencia Del Suelo, S., México, A., Castillo, O., Flores Hernández, I., Rivera González, A., Guillermo Martínez, M., ... De Jesús, J. (2003). PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DE NOPAL CON RIEGO POR GOTEO EN LA COMARCA LAGUNERA. *Terra Latinoamericana*, 21(2), 195–201. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315595006.pdf>
- Mitra, J. (2001). Genetics and genetic improvement of drought resistance in crop plants. *Curr. Sci*, 80(6). Retrieved from: https://www.academia.edu/1911518/Genetics_and_genetic_improvement_of_drought_resistance_in_crop_plants
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist*, 167(3), 645–663. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>
- Palacios-Mendoza, C., Nieto-Hernández, R., Llanderal-Cázares, C., & González-Hernández, H. (2004). EFECTIVIDAD BIOLÓGICA DE PRODUCTOS BIODEGRADABLES PARA EL CONTROL DE LA COCHINILLA SILVESTRE DACTYLOPIUS OPUNTIAE (COCKERELL) (HOMOPTERA: DACTYLOPIIDAE). *Acta Zoológica Mexicana* (N.s.), 20(3), 99–106. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/azm/v20n3/v20n3a7.pdf>
- Pallarés Padilla, A. (2004). Cultivo de la cochinilla en Mala y Guatiza (Lanzarote). Retrieved May 3, 2021, from www.tinamala.com website: <http://www.tinamala.com/cultivo.htm>
- Rodríguez-Pérez, L. (2006). Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en plantas. *Physiological implications of osmoregulation in plants*. Retrieved from website: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v24n1/v24n1a04.pdf>
- Sáenz, C. (2006). Utilización agroindustrial del nopal. Retrieved from website: <http://www.fao.org/3/a0534s/a0534s00.pdf>

Tambussi, E. (2004). FOTOSÍNTESIS, FOTOPROTECCIÓN, PRODUCTIVIDAD Y ESTRÉS ABIÓTICO: ALGUNOS CASOS DE ESTUDIO U B. Retrieved from website:

http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/36093/1/01.EAT_Part_1_2_Introduccion_Objetivos.pdf

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. (2007). Heat tolerance in plants: An overview.

Environmental and Experimental Botany, 61(3), 199–223. Retrieved from

https://www.academia.edu/4952754/Heat_tolerance_in_plants_An_overview

Yamaguchi-Shinozaki, K. (Eds.). Molecular Responses to Cold, Drought, Heat and Salt Stress in Higher Plants. R.G. Landes Co., Austin, Texas, p.81.98.



7. ANEXOS

7.1 Informe de suelo

1. Textura, Conductividad Eléctrica, y pH.

N° muestra	Tipo de suelo	Tipo de suelo	pH	CE (mS cm ⁻¹)
1	Exp. Cambio Climát	Franco-arcilloso	7.4	0.824

Textura:

Conductividad eléctrica (1 g suelo:5 ml agua)

pH (10 g suelo:25 ml agua)

2. Aniones solubles

mg/Kg de suelo				
Suelo	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
1	265.6	1029.7	<1,0	368.2

Extracción con agua

3. Macro y micronutrientes totales

g/100 g de suelo					
Suelo	Ca	K	Mg	Na	P
1	17.50	0.78	1.34	0.06	0.08

Digestión HNO₃:H₂O

mg/Kg de suelo								
Suelo	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S	Si	Mo
1	42.86	21.04	11436.39	233.25	45.70	0.14	4288.47	0.95

Digestión HNO₃:H₂O

7.2. Datos climatológicos

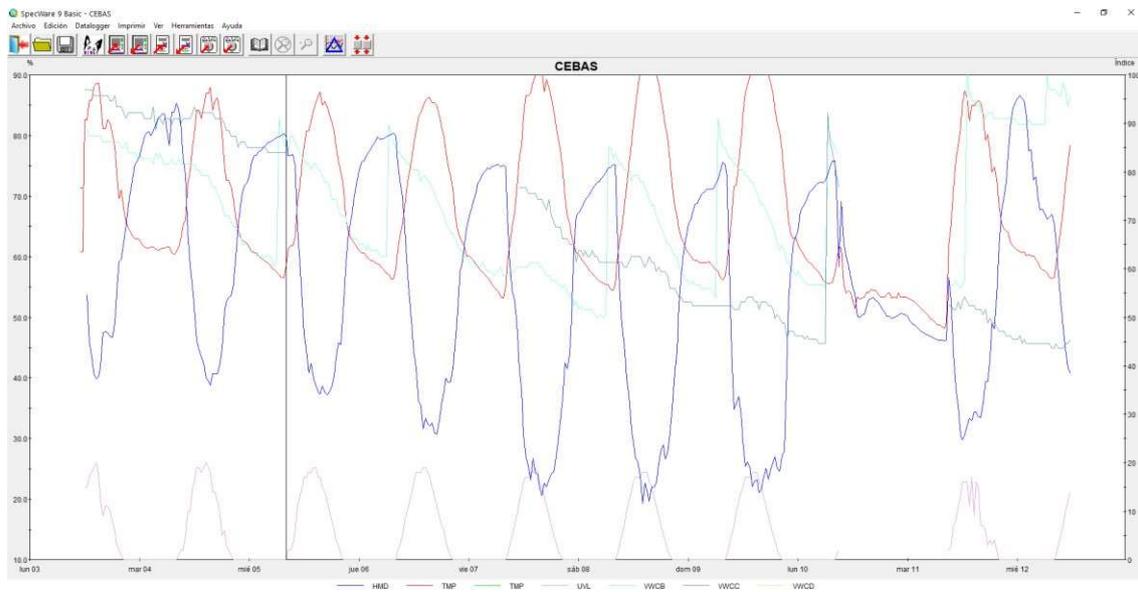


Figura 3. Imagen de los datos climáticos recopilados por la estación metereológica situado en el interior del invernadero del CEBAS.

