



**Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería Agronómica**



**Grado en Ingeniería Agronómica y de Sistemas Biológicos**

**Análisis de Opuntia ficus-indica como cultivo para  
biorrefinería**

Autor: D. Alberto José Ojados Artés

Dirección: D. Marcos Egea Gutiérrez-Cortines

Dr. Julia Weiss

Cartagena, Julio 2023

## ÍNDICE

<b>Abstract</b> .....	5
<b>1. Resumen</b> .....	6
<b>2. Introducción</b> .....	7
<b>2.1 Opuntia ficus-indica</b> .....	8
2.1.1 Descripción de la planta.....	9
2.1.2 Metabolismo tipo CAM.....	13
2.1.3 Mucilago .....	14
2.1.4. Sustrato.....	16
2.1.5 Necesidades hídricas.....	16
2.1.6 Necesidades térmicas.....	17
2.1.7 Productividad de biomasa.....	18
<b>2.2 Usos relacionados con la alimentación y medicina</b> .....	20
2.2.1 Consumo humano .....	20
2.2.2 Uso medicinal .....	21
2.2.3 Uso como forraje.....	22
<b>2.3 Sustrato para cochinilla del carmín</b> .....	22
<b>2.4 Opuntia ficus-indica considerada como una especie alóctona</b> .....	23
<b>2.5 Biorrefinería</b> .....	24
2.5.1 Producción de bioetanol a partir celulosa y hemicelulosa. ....	28
2.5.2 Producción de biogás como fuente de energía .....	31
<b>2.6 Interés desde el punto de vista ecológico</b> .....	32
<b>3. Objetivo</b> .....	35
<b>4. Material y métodos</b> .....	36
<b>5. Resultados y discusión</b> .....	43
<b>6. Conclusión</b> .....	51
<b>7. Bibliografía</b> .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ejemplar adulto de <i>Opuntia ficus-indica</i> . (A. Ojados, 2023).....	8
<b>Figura 2:</b> Sistema radicular ( <a href="https://www.denopal.com">https://www.denopal.com</a> , 2023).....	10
<b>Figura 3:</b> Hojas presentes en cladodios jóvenes. (A. Ojados, 2023). ....	11
<b>Figura 4:</b> Flores abiertas de <i>Opuntia ficus-indica</i> . (A. Ojados, 2023).....	12
<b>Figura 5:</b> Frutos maduros ( <a href="https://uchile.cl">https://uchile.cl</a> , 2023). ....	13
<b>Figura 6:</b> Esquema del Metabolismo del ácido crasuláceo (CAM). (FAO, 2018). ....	14
<b>Figura 7:</b> Beneficios medicinales de <i>O. ficus-indica</i> (FAO, 2018). ....	21
<b>Figura 8:</b> Cultivo tradicional de cochinilla en Las Islas Canarias (Gobiernodecanarias.org, 2023). ....	23
<b>Figura 9:</b> Esquema de biorrefinería (Manual sobre las Biorrefinerías en España, 2017).....	25
<b>Figura 10:</b> Esquema del proceso global de una biorrefinería (Manual sobre las biorrefinerías en España, 2017). ....	26
<b>Figura 11:</b> Manejo de <i>Opuntia</i> en Túnez para la protección de la cuenca hidrográfica (FAO, 2018). ....	33
<b>Figura 12:</b> Vista aérea de la Finca Tomás Ferro (Google Maps, 2023). ....	36
<b>Figura 13:</b> Parcela en la que se realizó el estudio en la finca Tomás Ferro. (A. Ojados, 2023). ....	37
<b>Figura 14:</b> Cladodio infectado por <i>Dactylopius opuntiae</i> . (A. Ojados, 2023).....	40
<b>Figura 15:</b> Cladodio partido a causa del daño de <i>Dactylopius opuntiae</i> . (A. Ojados, 2023)..	41
<b>Figura 16:</b> Kg de poda por planta. ....	46
<b>Figura 17:</b> Kg de pectina por planta. ....	46
<b>Figura 18:</b> Kg de hemicelulosa por planta.....	47
<b>Figura 19:</b> Kg de celulosa por planta.....	47
<b>Figura 20:</b> Kg de lignina por planta.....	48
<b>Figura 21:</b> Comparativa del peso de poda/ha al año en función al marco de plantación utilizado. ....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Composición mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> según Abraján (2008).....	15
<b>Tabla 2:</b> Composición de mucílago de <i>Opuntia ficus-indica</i> según Sepúlveda et al (2007). Valores corregidos al 0% de humedad.....	15
<b>Tabla 3:</b> Necesidades hídricas mm/año principales frutales leñosos en comparación con <i>Opuntia</i> .....	17
<b>Tabla 4:</b> Producción de t/ha de biomasa cultivos leñosos (Junta de Andalucía, 2008). .....	19
<b>Tabla 5:</b> Producción de t/ha de biomasa cultivos COP (Junta de Andalucía, 2008). .....	19
<b>Tabla 6:</b> Precipitación mensual (mm) durante el periodo de estudio en La Palma (Cartagena). Datos de la estación meteorológica de AEMET. ....	38
<b>Tabla 7:</b> Litros anuales que ha recibido la planta a causa de las precipitaciones. ....	38
<b>Tabla 8:</b> Litros anuales que ha recibido la planta por riego.....	39
<b>Tabla 9:</b> Peso en Kg de poda de cada ejemplar de la plantación, año 2020. ....	43
<b>Tabla 10:</b> Peso en Kg de poda de cada ejemplar de la plantación, año 2021. ....	44
<b>Tabla 11:</b> Composición de los cladodios (Informe Genetics-UPCT, 2013).....	45

## **Abstract**

The present study focuses on the investigation of *Opuntia ficus-indica* as a source of plant-based biomass production for its use as a primary element in a biorefinery. A three-year study and monitoring of 39 *Opuntia* specimens located at the Tomás Ferro estate of the Polytechnical University of Cartagena were conducted. The research resulted in a yield of 36.068,83 kg/hectare using a planting spacing of 1.5x3. The cultivation management was studied to determine the most suitable approach from both agronomic and productive perspectives. The agronomic and technical management of the crop was also studied to optimize biomass production to the maximum extent possible. Additionally, the different market outlets for products derived from the crop were examined, along with their versatility in areas such as climate change, global warming, circular economy, and their role in the restoration of eroded and degraded ecosystems.

## 1. Resumen

El presente trabajo trata sobre el estudio de la *Opuntia ficus-indica* como fuente de producción de biomasa de origen vegetal para su uso como elemento principal de una biorrefinería. Para ello se ha realizado un estudio y seguimiento durante 3 años de 39 ejemplares de Opuntia situados en la finca Tomás Ferro de la Universidad Politécnica de Cartagena. Como resultado de esta investigación se ha obtenido un rendimiento de 36.068,83 kg/hectárea con un marco de plantación de 1,5x3. Se ha estudiado el manejo del cultivo con el fin de encontrar el más adecuado desde el punto de vista agronómico y productivo. También se ha estudiado su manejo desde el punto de vista agronómico y técnico para optimizar lo máximo posible la producción de biomasa por parte del cultivo. A su vez, se han estudiado sus diferentes salidas al mercado de los productos derivados del cultivo y su polivalencia en ámbitos como: el cambio climático, el calentamiento global, la economía circular y su papel en la recuperación de ecosistemas erosionados y degradados.

## 2. Introducción

En el contexto actual de crisis medioambiental, escasez de recursos, cambio climático y calentamiento global, es de vital importancia buscar alternativas sostenibles y eficientes que nos permitan mitigar los impactos negativos en el medio ambiente y garantizar un futuro mejor. En este sentido, el estudio de *Opuntia ficus-indica* como posible fuente de recursos, se presenta como una opción prometedora y altamente relevante.

*Opuntia ficus-indica*, también conocida como nopal o chumbera, es una especie de cactus que se caracteriza por su resistencia a condiciones adversas, como la falta de agua, exposición a altas temperaturas y alta salinidad, la cual se encuentra disponible en gran parte del planeta. Esta planta ha despertado un creciente interés debido a su capacidad para crecer en suelos marginales, donde otros cultivos no serían viables, y su potencial como fuente de recursos renovables y sustentables ha hecho que durante los últimos años se realicen abundantes estudios en torno a ella.

En el marco de la economía circular, que busca maximizar la eficiencia de los recursos y minimizar los residuos, el uso de *Opuntia ficus-indica* adquiere una relevancia especial. Esta planta ofrece una amplia gama de productos y subproductos, desde sus frutos comestibles y los cladodios utilizados en la alimentación humana y animal, hasta la producción de biocombustibles, bioplásticos, cosméticos y productos farmacéuticos. La importancia de la economía circular radica en su capacidad para cerrar los ciclos de producción, reducir la dependencia de los recursos fósiles y promover la utilización eficiente de los recursos renovables. En este sentido, la utilización de *Opuntia ficus-indica* y la implementación de biorrefinerías que aprovechen al máximo todas las partes de la planta pueden contribuir significativamente a la transición energética y a la reducción de la huella ambiental.

Además, el estudio de *Opuntia ficus-indica* no solo tiene implicaciones en la economía circular y la transición energética, sino que también puede ofrecer soluciones para la seguridad alimentaria y la diversificación de cultivos en regiones afectadas por la escasez de recursos y el cambio climático. La capacidad de esta especie para adaptarse a condiciones adversas y producir cosechas abundantes la convierte en una opción atractiva para garantizar la disponibilidad de alimentos en entornos cada vez más desafiantes.

En resumen, el estudio de *Opuntia ficus-indica* se presenta como una oportunidad valiosa en el contexto actual de crisis medioambiental y escasez de recursos. Su potencial como fuente de

recursos renovables, su introducción en una economía circular mediante el uso de biorrefinerías, y su capacidad de adaptación a condiciones adversas hacen de esta planta una opción prometedora en la transición hacia una economía más sostenible y resiliente.

## 2.1 *Opuntia ficus-indica*

*Opuntia ficus-indica*, también conocida como chumbera, higuera de pala o nopal, es una especie de cactus que se encuentra principalmente en América Latina, el Mediterráneo y el norte de África. Esta planta tiene una gran importancia en la alimentación y la medicina tradicional, pero también presenta un gran potencial como materia prima para la producción de biocombustibles, productos químicos y alimentos para animales.



**Figura 1:** Ejemplar adulto de *Opuntia ficus-indica*. (A. Ojados, 2023).



Las primeras referencias que se tienen de *O. ficus-indica* datan de la época prehispánica, cuando los conquistadores españoles llegaron a México. En su forma sin espinas, esta especie es una forma hortícola, no se encuentra silvestre. De acuerdo con Bravo (1991) su domesticación comenzó hace unos 8000 años.

*O. ficus-indica* es una planta de porte. Su estructura aérea la forman unos tallos con actividad fotosintética llamados cladodios. Pertenece a la familia de las cactáceas y presentan una serie de características anatómicas, morfológicas y fisiológicas que les permiten desarrollarse en zonas áridas donde otros cultivos no son capaces de establecerse. A continuación, se describirán más detalladamente los órganos y partes que la componen.

La disponibilidad de *O. ficus-indica* varía según la región del mundo, pero su producción se concentra principalmente en México, Marruecos, Argentina, Chile y España. Esta planta se adapta bien a climas secos y cálidos, y puede cultivarse en zonas áridas y semiáridas donde otros cultivos no son viables.

La composición química de *O. ficus-indica* varía según la parte de la planta considerada, pero en general se caracteriza por un alto contenido de agua y fibra insoluble, y un bajo contenido de grasas y proteínas. La pulpa de la fruta contiene principalmente azúcares solubles como la sacarosa, la glucosa y la fructosa, mientras que la piel y las espinas contienen compuestos con propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Bravo, 1991).

En cuanto a las propiedades físicas, *O. ficus-indica* presenta una baja densidad y una alta porosidad, lo que puede facilitar su procesamiento y la extracción de compuestos de interés.

### **2.1.1 Descripción de la planta**

#### **Sistema radicular**

*O. ficus-indica* presenta radicular de distribución horizontal, el cual se extiende un total de 5-8 metros, con profundidades de 30 centímetros (Sudzuki, 1999). Durante los periodos de sequía, algunas raíces (sobre todo las más jóvenes) mueren, mientras que las que se mantienen vivas se recubren de una capa impermeable lo cual provoca que el flujo de agua que va de la planta hacia el suelo se corte. Una vez llegan las lluvias, las raíces vuelven a desarrollarse a partir de yemas latentes en las raíces que quedaban. Otro de los mecanismos que permiten a la planta

adaptarse a épocas de sequía con el que cuentan las raíces es reducir la transpiración de la parte aérea de la planta es manteniendo un alto potencial negativo radicular (Godoy, 2012).



**Figura 2:** Sistema radicular (<https://www.denopal.com>, 2023).

### **Tallo**

Los tallos de *O. ficus-indica* son conocidos como cladodios los cuales son suculentos y tienen una forma oblonga o incluso en forma de espátula, normalmente pueden llegar a medir entre 30 y 40 cm de largo. La epidermis de los cladodios se encuentra recubierta por una cutícula gruesa y una estructura cerosa, lo que provoca una reducción de su transpiración y le ayuda a que la humedad atmosférica se condense (Hull y Blekman, 1977). Esta cutícula posee un color blanco que refleja la radiación solar y hace que disminuya la temperatura del tallo. Las yemas axilares de los cladodios se llaman areolar, y es a partir de ellos de donde se van a generar los nuevos órganos como flores, raíces o nuevos cladodios. Estas areolas presentan espinas que proceden de primordios con pelos más espinosos que reciben el nombre de gloquidios (espinas foliares delgadas, generalmente poco visibles, que poseen numerosas barbas retrorsas a lo largo

y son deciduas, que se encuentran en las areolas de los cactus opuntioides). La función de estas hojas modificadas en pinchos es la de condensar el agua que se encuentra en el aire y bajar la temperatura de la superficie foliar. Debajo de esta epidermis se encuentra el tejido fotosintético, llamado clorénquima y por debajo de este encontramos dónde se almacenan las sustancias de reserva y el agua. El lugar donde se almacena esta agua en las chumberas recibe nombre de mucílago. A partir del segundo año los cladodios comienzan a lignificarse, provocando la aparición de corteza (Godoy, 2012).

### **Hojas**

Las hojas en *O. ficus-indica* aparecen en los cladodios jóvenes, tienen una forma cónica y se desprenden a las pocas semanas.



**Figura 3:** Hojas presentes en cladodios jóvenes. (A. Ojados, 2023).

### **Flores**

Las flores de *O. ficus-indica* son hermafroditas y actinomorfas (presenta simetría en, al menos, dos planos). Las flores aparecen en los cladodios de 1 año de edad o de 2 años, las cuales se desarrollan en las axilas del primordio de la hoja. El periantio está formado por pétalos y

sépalos, los cuales quedan fusionados en la base. Los estambres quedan insertados en la cavidad del receptáculo floral (Godoy, 2012). La polinización puede ser autógama o alógama.



**Figura 4:** Flores abiertas de *Opuntia ficus-indica*. (A. Ojados, 2023).

## **Fruto**

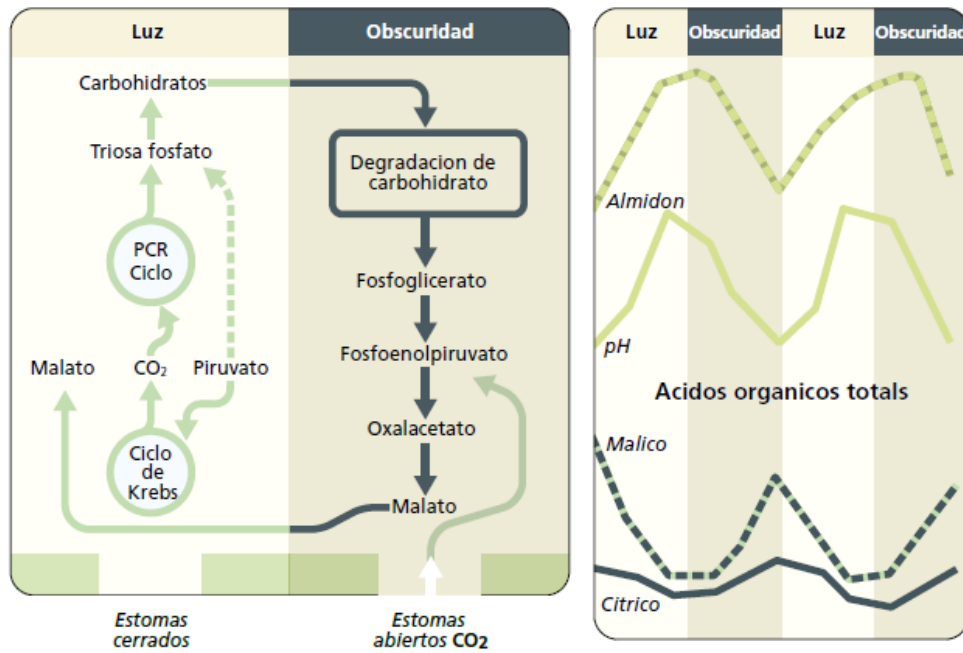
El fruto es una baya que procede de un ovario ínfero. La epidermis que la recubre es similar a la del cladodio y la pulpa de su interior se forma a partir del funículo y su recubrimiento. Las semillas presentes dentro de los frutos pueden ser o no viables, pero no se sabe exactamente el motivo de esto (Sudzuki, 1999). El tamaño y forma del fruto va a depender de la especie y la variedad cultivada. Presentan forma globosa, en las primeras etapas de formación del fruto son de un color verde y a medida que va madurando va cambiando su coloración, pasando por colores amarillos y naranjas hasta que llega a su etapa de maduración final que suele terminar con un color rojo intenso.



**Figura 5:** Frutos maduros (<https://uchile.cl>, 2023).

### **2.1.2 Metabolismo tipo CAM**

La adaptación a la sequía más importante es su metabolismo ácido de las crasuláceas (llamado tipo CAM, debido a sus siglas en inglés). El metabolismo tipo CAM consiste en la apertura de los estomas de la planta durante la noche y el cierre de estos durante el día, de esta forma la planta toma  $\text{CO}_2$ , que se almacena en las vacuolas de las células en forma de ácido málico. Esto hace que se reduzcan las pérdidas de agua por parte de la planta, ya que si los estomas se abriesen en las horas de mayor calor del día, esta perdería mucha agua. En este momento es cuando se libera el ácido málico acumulado en las vacuolas y se descarboxila, liberando el  $\text{CO}_2$  en el citosol y mediante la luz y la enzima *Rubisco*, este  $\text{CO}_2$  será transformado en elementos fotosintéticos. Se ha observado como los ejemplares de *Opuntia ficus-indica* que no están siendo sometidos a ningún estrés hídrico llevan a cabo una apertura de sus estomas en horas de luz, en las cuales el  $\text{CO}_2$  que se capta es incorporado a las rutas metabólicas propias de las plantas C3 (Nobel, 1999).



**Figura 6:** Esquema del Metabolismo del ácido crasuláceo (CAM). (FAO, 2018).

En ambientes áridos, se observa una adaptación interesante en la forma en que las plantas pierden agua durante la temporada seca. En lugar de perder agua principalmente del tejido cercano al exterior, conocido como clorénquima, la pérdida se produce principalmente del tejido parenquimático que almacena agua. Esto permite que la actividad fotosintética del clorénquima no se vea afectada y evita la necesidad de acumular grandes cantidades de agua en sus células. Como resultado, las vacuolas del clorénquima, que ocupan hasta el 90% de la célula, pueden utilizarse para almacenar ácido málico (Nobel, 1999).

### 2.1.3 Mucilago

El mucilago de *O. ficus-indica* es un hidrocoloide que forma redes moleculares capaces de retener agua (Sepúlveda *et al*, 2007). Es un polímero complejo de naturaleza carbohidratada, con estructuras muy ramificadas. Se distingue en ellos dos fracciones: una con propiedad gelificante (llamada pectina) y otra no gelificante (Sepúlveda *et al*, 2007).

La cantidad presente de mucilago en los cladodios de las chumberas es muy variable, ya que va a depender en gran medida de la edad del cladodio, la época del año y el método de extracción de mucilago que se aplique. Los resultados obtenidos por Abraján (2008) hacen

referencia a la composición del mucílago a partir de 4 métodos de extracción diferentes y que se resumen en la **Tabla 1**.

**Tabla 1:** Composición mucílago de *Opuntia ficus-indica* según Abraján (2008).

<b>Hidratos de carbono (% sms)</b>	64,9 – 74,8
<b>Fibra cruda (% sms)</b>	0,1 – 1,3
<b>Proteínas (% sms)</b>	3,0 – 4,0
<b>Grasa (% sms)</b>	0,6 – 0,9
<b>Cenizas (% sms)</b>	20,5 – 25,9

A continuación, en la **Tabla 2**, se mostrarán los datos recogidos por Sepúlveda *et al* (2007) corregidos al 0% de humedad, para evidenciar los diferentes resultados según el autor y el método de extracción.

**Tabla 2:** Composición de mucílago de *Opuntia ficus-indica* según Sepúlveda *et al* (2007). Valores corregidos al 0% de humedad.

<b>Proteína (% sms)</b>	7,7
<b>Extracto etéreo (% sms)</b>	0,8
<b>Fibra bruta (% sms)</b>	0,7
<b>Cenizas (% sms)</b>	39,5
<b>Ca (% sms)</b>	10,4
<b>K (% sms)</b>	1,6
<b>N (% sms)</b>	1,2

Una vez vistos los resultados, se aprecia claramente las diferencias que hay entre ellos, lo que nos da una aproximación de como el método utilizado y el material usado supone una diferencia en la obtención de los resultados, aunque en este caso no es una diferencia reseñable.

Debido a su composición, el mucílago supone una fuente reseñable de monosacáridos que mediante un proceso de fermentación puede convertirse en bioetanol. Esto lo convierte en un elemento indispensable para una biorrefinería cuyo fin sea la obtención de biocombustibles y otros subproductos.

#### **2.1.4. Sustrato**

Las chumberas son plantas que pueden crecer en diferentes tipos de suelo, incluso en aquellos que no son adecuados para otros cultivos, como suelos someros o pedregosos. La única condición indispensable para su cultivo es un buen drenaje del suelo, por lo que se intentará instaurar el cultivo en un suelo ligero antes que en uno arcilloso que retenga mayor humedad. Además, las chumberas toleran muy bien la salinidad por lo que sus suelos con una conductividad eléctrica de 5-6 mS cm<sup>-1</sup> en el extracto de saturación serían los más indicados (Le Houérou, 1992 cit. en De Kock, 2001).

Las chumberas no son muy exigentes en fertilidad, por lo que son bastante modestas en sus requerimientos básicos, sin embargo, se obtiene una respuesta muy positiva por parte de la planta cuando se les suministra fertilizante. Esta respuesta positiva incrementa en gran medida el rendimiento en kilogramos de biomasa y en fruto (Godoy, 2012).

#### **2.1.5 Necesidades hídricas**

La chumbera es una de las especies vegetales con mayor tolerancia a la falta de agua. Su estructura y funciones fisiológicas le permiten sobrevivir en condiciones prolongadas de sequía, aunque aún requiere una cantidad mínima de agua para su supervivencia. Según L'Houérou (1966), para un cultivo de *O. ficus-indica* se necesitaría un mínimo de 150 mm de precipitación anual en un suelo profundo y arenoso. En términos generales, este mismo autor establece que la chumbera puede desarrollarse adecuadamente con una precipitación anual de al menos 200 mm (L'Houérou, 1984). Además, se ha observado que la chumbera responde de manera muy positiva al aumento de la precipitación por encima de estos valores mínimos (Monjauze y L'Houérou, 1965). Establecer una precipitación máxima anual como límite para la chumbera resulta complicado. Sin embargo, se ha observado que si la precipitación es superior a 800 mm año<sup>-1</sup>, lo ideal es que la parcela cuente con una pendiente para que se pueda drenar el agua. Esto se debe a que la chumbera es altamente susceptible al encharcamiento del suelo, por lo que es importante garantizar un drenaje adecuado en condiciones de alta pluviosidad.

La chumbera muestra una notable respuesta positiva ante cantidades relativamente pequeñas de agua aplicadas en momentos críticos. Un estudio realizado por la Universidad Politécnica de Madrid con *O. ficus-indica* demostró que si se proporciona un riego de 240 mm (con cinco



riegos distribuidos en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, y 40 mm adicionales a finales de julio), la producción de biomasa se triplica en comparación con otro régimen que solo recibía los primeros 200 milímetros de agua (Saiz, 1988).

En comparación a otros frutales leñosos, la producción de Opuntia requiere de muy pocas aportaciones vía riego de agua para su mantenimiento. En la **Tabla 3** se compara las necesidades de agua por hectárea de algunos de los principales frutales leñosos con las de Opuntia a lo largo del año.

**Tabla 3:** Necesidades hídricas mm/año principales frutales leñosos en comparación con Opuntia.

<b>Cultivo</b>	<b>Necesidades de agua por hectárea (mm/año)</b>
Opuntia	30-250
Manzano	800-1200
Peral	800-1200
Melocotonero	800-1200
Almendro	800-1200
Naranja	800-1200
Limónero	800-1200

### 2.1.6 Necesidades térmicas

Según L'Houerou (1984), para un óptimo desarrollo de *O. ficus-indica*, en el mes más frío la temperatura mínima no debe bajar de los 3 °C, de esta manera se desarrollará de forma correcta durante su etapa de crecimiento. La FAO (2002) establece un valor de -10°C como referencia de temperatura a partir de la cual se sufre daño severo e irreparable en la planta. Nobel y Bobich (2001) aseguran que la capacidad de resistencia al frío viene determinada por la cantidad de agua que se encuentra en los cladodios. Aquellos en los que hay menos agua tienen mayor capacidad para soportar temperaturas bajas, por lo que se deduce que mediante el aumento de la presión osmótica la planta adquiere una mayor tolerancia a las bajas temperaturas.

En cuanto a las temperaturas máximas, se ha observado que las plantas de chumbera pueden sobrevivir a temperaturas superiores a 50°C, según Le Houerou (2002). Sin embargo, generalmente se encuentran en áreas donde las temperaturas máximas promedio durante los

meses de mayor demanda hídrica (finales de primavera y verano) no se superan los 42 °C (Inglese *et al*, 2009).

### **2.1.7 Productividad de biomasa**

La cantidad de biomasa que una chumbera es capaz de producir, al igual que otros cultivos, se ve influenciada por la disponibilidad de agua, la cantidad de nutrientes a la que tenga acceso, la luz que reciba, la temperatura u otras condiciones presentes en su entorno. La captación de CO<sub>2</sub> y su acumulación en forma de fotoasimilados son fundamentales para la producción de biomasa, por lo que es importante considerar las limitaciones en la captación de CO<sub>2</sub> que pueden surgir debido a estos factores. Para llevar a cabo estas conclusiones nos hemos basado en la publicación de Nobel “Agroecología, cultivo y usos del nopal” (1999) y “Cacti: Biology and Uses” (2001).

Para evaluar el impacto de la luz, es necesario cuantificarla mediante el flujo fotosintético de fotones (FFS o DFFF), también conocido como radiación fotosintéticamente activa (PAR), que incide sobre las superficies fotosintéticas. Se cuantifica en "moles de fotones por unidad de área por unidad de tiempo". En la chumbera, la fijación de CO<sub>2</sub> no ocurre por debajo de 2 moles m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. La mitad de la máxima absorción posible ocurre a 13 moles m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, el 90% a 22 moles m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, y se alcanza la saturación a partir de los 30 moles m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Esta relación entre la captación neta de CO<sub>2</sub> y el FFS se conoce como Índice de FFS (IFSS) (Godoy, 2012).

La cantidad de FFS incidente depende de la orientación de la superficie y la época del año. Si se promedian todas las orientaciones durante todo el año, considerando días despejados, el FFS diario total sería de 21 moles m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> en latitudes bajas (0°-20° del Ecuador), 21 moles m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> en latitudes medias (20°-40°) y 17 moles m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> en latitudes altas (40°-60°). Estos valores disminuyen en días nublados. Dado que las superficies expuestas al sur reciben más PAR, los cladodios con orientación este-oeste capturan más CO<sub>2</sub>. Además, la orientación del cladodio originalmente plantado puede afectar significativamente la producción total del cultivo, ya que los cladodios hijos suelen tener la misma orientación que sus progenitores. En plantas silvestres, los cladodios tienden a presentar esta orientación, aunque en menor medida en áreas más alejadas del ecuador y dependiendo de la temporada en que comienza su crecimiento (Godoy, 2012).

Hasta ahora, hemos visto que la chumbera tiene características morfológicas y fisiológicas que la hacen capaz de producir biomasa en condiciones desfavorables para la mayoría de los cultivos C3 y C4. Es considerada una planta rústica y esta rusticidad ha sido clave en su dispersión mundial y en su manejo agronómico a lo largo de la historia. La chumbera ha sido tradicionalmente cultivada en terrenos no aptos para otros cultivos, como áreas secas, poco fértiles, someras o pedregosas, sin requerir insumos, sin desmalezar ni utilizar pesticidas, y con pocos cuidados más allá de la cosecha.

En la actualidad, la biomasa se obtiene principalmente de residuos procedentes de la agricultura, entre los que destacan los cultivos leñosos y COP (cereales, oleaginosas y proteaginosas) (Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, 2008). Las tablas que se presentan a continuación nos muestran la producción media de biomasa de origen vegetal que se obtiene de estos cultivos (**Tabla 4 y 5**). Tomaremos los datos proporcionados por la Junta de Andalucía para poner el contexto los datos, ya que las condiciones climatológicas y geográficas son similares a las de la Región de Murcia.

**Tabla 4:** Producción de t/ha de biomasa cultivos leñosos (Junta de Andalucía, 2008).

<b>Cultivo</b>	<b>Superficie</b>	<b>Toneladas/año biomasa</b>	<b>Toneladas/ha año</b>
<i>Olivar</i>	1.456.020	2.162.927	1,49
<i>Almendo</i>	158.920	206.596	1,30
<i>Viñedo</i>	38.255	133.891	3,50
<i>Cítricos</i>	60.258	120.603	2,00
		<b>Media</b>	<b>2,07</b>

**Tabla 5:** Producción de t/ha de biomasa cultivos COP (Junta de Andalucía, 2008).

<b>Cultivo</b>	<b>Superficie</b>	<b>Toneladas/año biomasa</b>	<b>Toneladas/ha año</b>
<i>Trigo</i>	539.209	1.478.368	2,74
<i>Maíz</i>	2.9872	675.820	22,62
<i>Cebada</i>	10.2105	207.670	2,03
<i>Avena</i>	65.292	119.182	1,83
<i>Soja</i>	1.658	17.549	10,58
<i>Girasol</i>	201.397	306.681	1,52
		<b>Media</b>	<b>6,89</b>

Según los datos de la **Tabla 4**, de media se obtiene unas 2,07 t/ha al año de biomasa cuyo origen son cultivos leñosos. En la **Tabla 5** observamos que en cultivos COP obtenemos 6,89 t/ha al año, pudiendo llegar a obtener hasta 22,62 t/ha por año en maíz, procedentes de los residuos generados de su cultivo. En estos datos se refleja la significativa mejora que se puede lograr al trabajar con un material vegetal que nos dé un alto rendimiento en biomasa sin que ello suponga un incremento en el coste de labor y mantenimiento de cultivo. Se reportó que cuando se regaron y fertilizaron, *Opuntia ficus-indica* y *O. ficus-indica* forma amyaclea, tuvieron productividades de 47 y 45 t/ha/año (Nobel, 1991; Nobel et al., 1992). *Opuntia* supone una excelente solución ante esta problemática.

Desde una perspectiva agroenergética, la rusticidad de la chumbera juega un papel fundamental, ya que permite llevar a cabo una agricultura de bajos insumos con un balance energético positivo. Bajo este enfoque, se pueden cultivar opuntias añadiendo a su producción de fruto y nopal el uso de la poda como biorrefinería.

## **2.2 Usos relacionados con la alimentación y medicina**

### **2.2.1 Consumo humano**

Los frutos de la chumbera son conocidos como higos de pala o tuna, según la región del mundo. Se consumen como alimento en diferentes partes del mundo. Estos frutos son ricos en minerales, proteínas, fibra dietética y fitoquímicos. Se pueden consumir frescos o procesados en mermeladas, jaleas, conservas y otros productos alimenticios.

Cabe destacar que, en la mayoría de los casos, para que se pueda consumir deben de pasar por un proceso de preparación, en el cual se generan muchos subproductos. Estos son la cubierta exterior de las plantas, que se deben de retirar antes de la preparación de los alimentos. Estos contienen las espinas y gran cantidad de gloquidios y pulpa. Alrededor del 20% y el 45% del peso en fresco de los cladodios y los frutos, respectivamente, son subproductos (FAO, 2018).

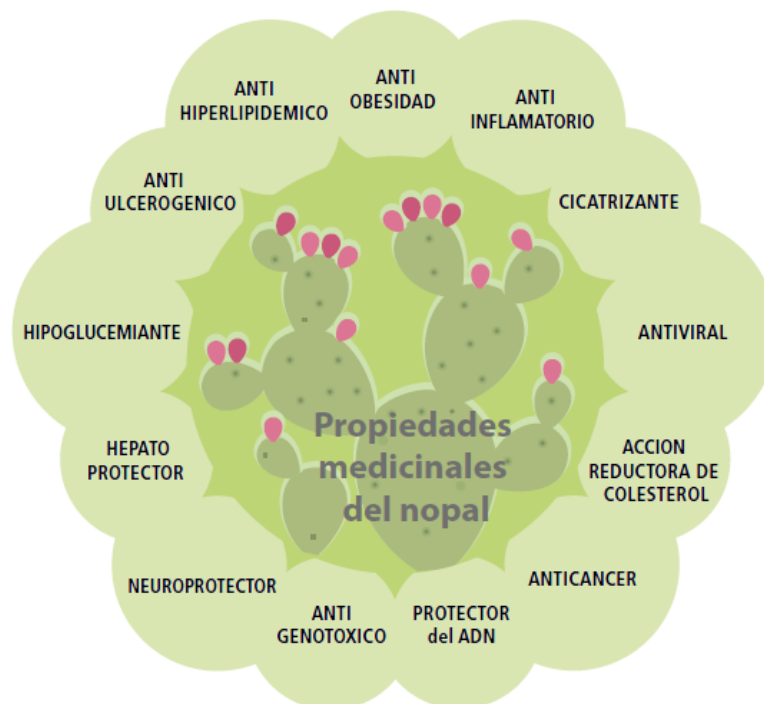
El mucílago dependiendo del grado de madurez del nopal, se pueden desarrollar aplicaciones como aditivos naturales para la industria alimentaria; tales como: espesantes, reemplazantes de grasas, estabilizadores de emulsiones, películas comestibles y recubrimientos para alargar la vida de anaquel y mejorar la calidad de alimentos frescos, congelados y procesados (Torres-Ponce, *et al.*, 2015).

### 2.2.2 Uso medicinal

*O. ficus-indica* se ha utilizado en la medicina tradicional de las antiguas civilizaciones latinoamericanas para tratar diversas afecciones. Las hojas de la planta se han utilizado para tratar heridas, quemaduras y dolores de cabeza. La pulpa de los frutos se ha utilizado para tratar inflamaciones y enfermedades del tracto urinario. También se ha investigado su uso en el tratamiento de la diabetes y la hipertensión arterial, debido a su contenido de compuestos bioactivos como los polifenoles y las betalaínas.

El fruto contiene sustancias antioxidantes las cuales son beneficiosas para los seres humanos. También existen estudios que afirman que los frutos son capaces de eliminar la carcinogénesis en ratones y en cultivos de células humanas (Zou et al., 2005).

Con respecto a los cladodios se ha visto que las ratas que han sido alimentadas con ellos, han disminuido su nivel de colesterol y triglicéridos (Galati et al., 2001). Existen estudios que establecen una relación entre el consumo de nopalitos y la reducción de la obesidad y la glucosa en sangre lo cual lo identifica como un posible elemento importante en la lucha contra la obesidad (Bwititi et al., 2000; Frati Munari et al., 2004; Yang et al., 2008). Otros estudios han demostrado que los cladodios estimulan la mucosa gástrica protegiendo así el estómago de úlceras (Galati et al., 2001).



**Figura 7:** Beneficios medicinales de *O. ficus-indica* (FAO, 2018).

Como alimento, el nopal puede ser considerado como una fuente de sustancias bioactivas y muy útil para la preparación de nuevos alimentos con altos niveles nutricionales.

Entre los usos más extendidos se encuentra un té de pétalos de *Opuntia* utilizado para la hiperplasia de próstata (Dan Palevitch, G. Earon & I. Levin, 2010).

### **2.2.3 Uso como forraje**

*O. ficus-indica* es resistente a la sequía y a las altas temperaturas, lo que la hace ideal como forraje para el ganado. Los cladodios de la planta son ricos en agua y nutrientes, y se pueden utilizar como alimento para el ganado en zonas áridas y semiáridas. La FAO ha definido *Opuntia* como cultivo para zonas áridas con potencial para ganadería, ya que serviría como una reserva en caso de emergencia para sequías severas que puedan afectar a la falta de disponibilidad de cultivos forrajeros permanentes.

Los cladodios de nopal son una fuente nutritiva para el ganado, ricos en agua, azúcares, cenizas y vitaminas A y C. Sin embargo, presentan deficiencias en proteína cruda y fibra (Ben Salem *et al.*, 1996). El contenido nutricional de los cladodios varía según la especie, variedad, estación del año y condiciones agronómicas. Aunque pueden resolver el problema de agua para el ganado, su bajo contenido de materia orgánica puede causar diarrea, por lo que se recomienda asociarlos con alimentos fibrosos y suplementos ricos en nitrógeno (Ben Salem *et al.*, 2002).

### **2.3 Sustrato para cochinilla del carmín**

La cochinilla del carmín (*Dactylopus coccus Costa*) es un insecto que produce el carmín, un colorante rojo que en los últimos tiempos se ha vuelto muy importante, tanto económica como socialmente, a raíz de que se prohibieron, por considerarlos cancerígenos, los colorantes artificiales (FDA N° 2 y 4). Su importancia radica en que de los cuerpos secos de las hembras adultas se obtiene un colorante natural conocido como ácido carmínico (AC), empleado en la industria textil, farmacéutica, de cosméticos y alimentaria (FAO, 2018).

Es importante no confundir *Dactylopus coccus Costa* con *Dactylopius opuntiae* (conocida como Cockerell, cochinilla basta del carmín o cochinilla silvestre) ya que esta segunda es mucho más agresiva hacia la planta y supone una gran amenaza para esta. Tanto es así que en

muchas regiones ha sido catalogada como especie invasora y supone una seria amenaza al cultivo de *O. ficus-indica*.



**Figura 8:** Cultivo tradicional de cochinilla en Las Islas Canarias (Gobiernodecanarias.org, 2023).

#### **2.4 *Opuntia ficus-indica* considerada como una especie alóctona**

En la actualidad, en España, se encuentra vigente el Real Decreto 1628/2011, de 14 de noviembre, establece qué especies animales o vegetales exóticas son consideradas como invasoras, las cuales se encuentran dentro del *Catálogo español de especies exóticas invasoras*, junto con las medidas legales para prevenir su propagación en el entorno natural. Dentro de este marco, el documento cataloga a *Opuntia maxima* Miller como una especie exótica invasora junto a *O. ficus-indica* en el listado de especies exóticas con potencial invasor.

La chumbera, al igual que el trigo, el maíz y la patata, es una planta introducida en España desde al menos el siglo XVII (Fernández Rubio y Martínez Ortuño, 1983). Sin embargo, se encuentra en el Anuario de Estadística Agraria desde 1930 donde se trata como un cultivo, dentro de la categoría de frutales no cítricos, específicamente en el subapartado 13.9.19. Los datos del año 2009 nos dicen que se cultivaron 359 hectáreas para la producción de frutas, y se contabilizó un censo de 198.227 árboles dispersos.

Sin embargo, las restricciones que aparecen en la legislación vigente contradicen la importancia del cultivo de chumbera en el secano semiárido español, tal como destaca el Ministerio de Agricultura en varias publicaciones divulgativas. Estas incluyen: 15/1915 "Nueva utilidad de

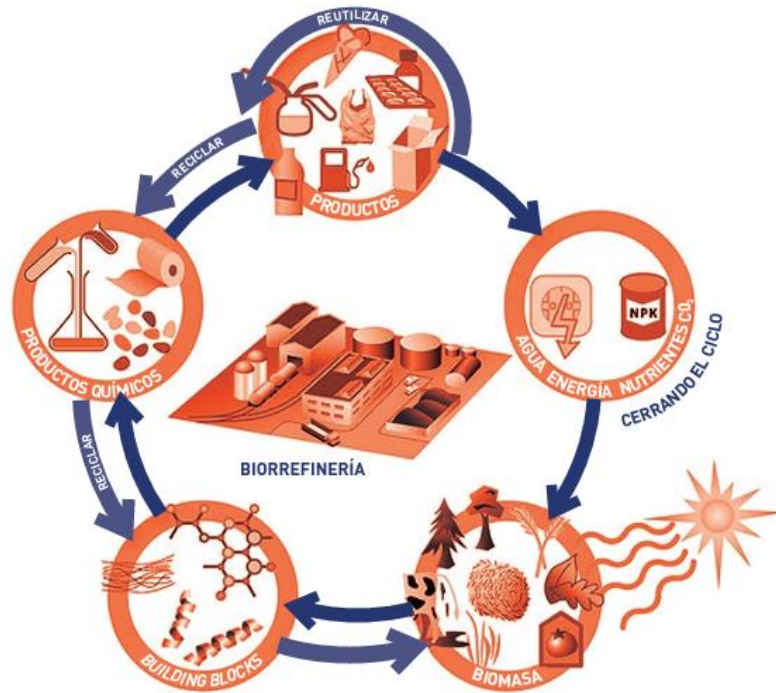
las chumberas" (Ministerio de Fomento, 1915), 15/1983 "El cultivo de la chumbera para la producción de higos de retallo" (Fernández Rubio y Martínez Ortuño, 1983) y 01/1990 "La chumbera como cultivo de zonas áridas" (Fernández González y Sáiz Járabo, 1990).

## **2.5 Biorrefinería**

La creciente población mundial, que se espera aumente en más de un 30% en los próximos 40 años, junto con el agotamiento de recursos, la dependencia energética exterior y el cambio climático, hace que Europa tenga que dar un cambio en su manera de producir, consumir y gestionar los recursos biológicos. Estos, son cada vez más importantes para satisfacer la demanda de alimentos saludables, así como para obtener productos químicos, energía y otros materiales. La adopción de políticas basadas en la bioeconomía en Europa ofrece grandes oportunidades para el crecimiento económico, la creación de empleo y la mejora de la sostenibilidad en las zonas rurales, costeras e industriales, al reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover la sostenibilidad en la producción y transformación de recursos primarios (COM, 2012).

Una biorrefinería es un sistema en el que se integran distintos procesos para la conversión de biomasa en combustibles, energía, productos químicos y alimentos. Este concepto es muy similar al de una refinería convencional de petróleo, con la diferencia de que la materia prima que se utiliza es la biomasa. Esta biomasa puede provenir de desechos de procesos industriales o naturales, así como del procesamiento de animales o vegetales (plantaciones de maíz, algas, entre otros); por lo que, a diferencia del petróleo, estamos hablando de una materia prima que es renovable. Las biorrefinerías ofrecen un camino prometedor para enfrentar la crisis energética y el cambio climático, puesto que con el uso de biocombustibles se reducen las emisiones de dióxido de carbono. Además, ciertos organismos de los que se obtiene la biomasa usan como nutriente CO<sub>2</sub>, con lo que se podría cerrar el ciclo de generación y consumo de este gas.

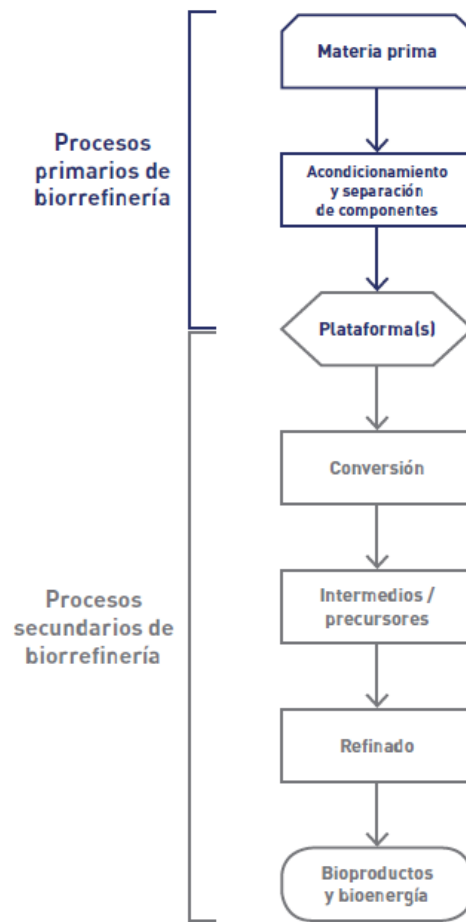




**Figura 9:** Esquema de biorrefinería (Manual sobre las Biorrefinerías en España, 2017).

La idea de la biorrefinería implica la utilización de procesos para aprovechar la biomasa. Estos procesos dependerán del tipo de biomasa utilizada como materia prima y de los productos deseados, lo que dará lugar a diferentes tipos de biorrefinerías basadas en estos dos conceptos.

Los procesos iniciales de una biorrefinería involucran la separación de los componentes de la biomasa en productos intermedios, como celulosa, almidón, azúcar, lignina, aceite vegetal, biogás, fracciones proteicas, proteínas individuales, metabolitos vegetales y microbianos. Estos procesos suelen incluir operaciones de acondicionamiento y descomposición de la biomasa, así como operaciones de pretratamiento. Mientras que la separación de componentes se lleva a cabo dentro de la biorrefinería, los procesos de acondicionamiento o pretratamiento pueden realizarse fuera de ella (Manual sobre las biorrefinerías en España, 2017).



**Figura 10:** Esquema del proceso global de una biorrefinería (Manual sobre las biorrefinerías en España, 2017).

Existen tres sistemas al respecto, que se persiguen en la investigación y su desarrollo. En primer lugar, la biorrefinería de residuo de cultivo (de naturaleza húmeda), con materia prima tales como cereales o maíz. En segundo lugar, la biorrefinería verde, usando biomásas tales como la hierba verde, alfalfa, trébol, o cereal inmaduro. En tercer lugar, la biorrefinería de residuo lignocelulósico, usando materia prima de naturaleza seca, tal como biomasa y residuos que contienen celulosa. El modelo que vamos a utilizar para nuestra propuesta de biorrefinería a partir de *O. ficus-indica* es el de residuo lignocelulósico, que pasaremos a explicar en más detalle a continuación.

Las principales ventajas de las biorrefinerías son la elaboración de productos de valor añadido a partir de residuos orgánicos, el uso de tecnologías más limpias y eficientes en términos energéticos y la promoción de la economía circular. Además, las biorrefinerías pueden

contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, a mejorar la seguridad energética y a fomentar el desarrollo local y regional.

Sin embargo, las biorrefinerías también presentan algunas limitaciones, como la necesidad de disponer de grandes cantidades de biomasa para su operación, la dependencia de las condiciones climáticas y de la calidad de la biomasa, y la necesidad de utilizar tecnologías avanzadas y costosas. Además, el uso de la biomasa para la producción de biocombustibles y otros productos puede competir con otros usos, como la producción de alimentos o la conservación de la biodiversidad.

En cuanto a la relación entre las biorrefinerías y la sostenibilidad, se reconoce que la bioeconomía puede contribuir a la transición hacia un modelo de desarrollo sostenible, ya que permite la utilización de recursos renovables y la producción de productos más sostenibles en términos ambientales y sociales. Sin embargo, para que las biorrefinerías sean sostenibles, es necesario considerar aspectos como la eficiencia en el uso de recursos, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la gestión adecuada de residuos y subproductos, y la equidad social en la distribución de beneficios.

Los desafíos tecnológicos clave asociados a las biorrefinerías involucran el desarrollo de la catálisis química y enzimática, la biotecnología y nuevos procesos, así como la optimización y escalado de estos. Para completar con éxito la implementación comercial de las biorrefinerías, es necesario conseguir la reducción de costos y el aumento de la eficiencia en la conversión a bioenergía y bioproductos, lo cual está estrechamente ligado a la investigación y la innovación (Manual sobre las biorrefinerías en España, 2017).

### **Biorrefinería a partir de tejido lignocelulósico**

Los materiales lignocelulósicos están formados por: hemicelulosa, celulosa y lignina, tres polímeros fundamentales los cuales constituyen y forman las plantas

Cabe destacar que no hay enzimas naturales que sean capaces de dividir la lignina, esto complica su tratamiento a diferencia de otros formados de forma natural como proteínas poliméricas o hidratos de carbono, que si es posible su tratamiento.

Algunas cepas de levadura presentan una capacidad inusual para desviar la glucosa hacia la producción de etanol, lo que resulta en una alta eficiencia de conversión. Este proceso de

desviación permite una reducción casi completa de la glucosa a etanol, logrando un rendimiento del 90% (Godoy, 2012).

*O. ficus-indica* está formada en gran parte por estos polímeros, por lo que resulta una materia prima idónea para este tipo de biorrefinerías.

### **2.5.1 Producción de bioetanol a partir celulosa y hemicelulosa.**

La celulosa se considera el polímero que se encuentra más en la naturaleza, por lo que tiene un gran potencial para ser usado como materia prima en la producción de bioetanol en comparación con otros materiales. Sin embargo, hay varios desafíos asociados con su transformación. Estos incluyen la necesidad de realizar pretratamientos para descomponer la estructura lignocelulósica, lo cual aumenta el coste a la hora de realizar una hidrólisis para la celulosa y a su vez genera subproductos tóxicos que afectan de manera negativa a las levaduras que se utilizan en estos procesos. Estas dificultades son las principales razones por las cuales hay una escasez de plantas de biorrefinerías o plantas de procesado que utilicen estos materiales para la producción de bioetanol.

Existen dos métodos para la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos: la hidrólisis ácida y la hidrólisis enzimática. La hidrólisis es un proceso químico en el cual una molécula se descompone mediante la adición de agua. En este proceso, el agua se divide en sus componentes (Hidrógeno y Oxígeno) y se utiliza para romper enlaces químicos dentro de la molécula objetivo. Como resultado, la molécula se descompone en fragmentos más pequeños o en sus componentes originales.

Estos procesos difieren en las etapas iniciales, que incluyen el pretratamiento, la hidrólisis y el proceso de purificación del sustrato utilizado. A continuación, pasaremos a describir procesos citados anteriormente.

#### **Hidrolisis ácida**

##### Pretratamiento

La biomasa que se vaya a emplear en este pretratamiento tiene que ser troceada y reducida hasta que se obtenga un tamaño de esta el cual facilite el manejo que se dará en las siguientes

fases. Normalmente se astilla o se pica dependiendo de lo significativo que se encuentre el material.

### Hidrólisis

Cuando estamos tratando con materiales con un alto contenido en lignocelulosa, se lleva a cabo un proceso llamado hidrólisis con el objetivo de descomponer la celulosa y las hemicelulosas que conforman la estructura principal de la biomasa. Durante la hidrólisis de la celulosa, se obtienen glucosas como resultado, mientras que la composición de las hemicelulosas varía dependiendo de la planta de origen. En general, los materiales vegetales más lignificados están formados por un tipo de hemicelulosa que es rico en pentosas, como es común en muchos subproductos agrícolas. Por otro lado, aquellos que no se encuentran tan lignificados poseen principalmente una hemicelulosa que produce hexosas.

- Hidrólisis con ácidos diluidos: es ampliamente utilizada y generalmente se realiza en dos etapas. La primera etapa, menos intensa y a una temperatura menor, se utiliza para degradar la hemicelulosa presente. Posteriormente, se lleva a cabo una segunda etapa con mayor intensidad, centrado en los sólidos que surgen de la primera etapa, con el objetivo de descomponer la celulosa. Los procesos que utilizan ácido sulfúrico (con una concentración inferior al 1%) a una temperatura de 215°C durante tres minutos pueden lograr rendimientos de sacarificación entre el 50% y el 70% (Hamelinck et al. 2005).
- Hidrólisis con ácidos concentrados: este método requiere mayor tiempo de acción a la vez que la temperatura y la presión utilizada son más bajas. Normalmente se realiza en dos etapas. Este método nos permite obtener menor degradación de azúcares y aumentar el rendimiento, lo que resulta en una menor generación de subproductos tóxicos. Sin embargo, también requiere mayor delicadeza en el manejo de este proceso y con el objetivo de que sea económicamente viable recuperar el ácido que se utiliza. Por lo general, se aplica a sustratos reducidos a partículas pequeñas, como serrín. El uso de ácido sulfúrico en concentraciones del 30% al 70%, a una temperatura de 40°C durante 2 a 6 horas, permite obtener un rendimiento de sacarificación cercano al 90% (Hamelinck et al. 2005).

## **Hidrolisis enzimática**

### Pretratamiento

En este proceso, al igual que el anterior, es necesario reducir la biomasa a partículas de menor tamaño para un mejor manejo.

### Hidrólisis

La hidrólisis enzimática tiene ventajas importantes tales como una temperatura menos elevada, presiones atmosféricas también más bajas y esto se traduce en una reducción del coste de la energía del proceso. También cabe destacar que no se producen compuestos tóxicos que afecten a la fragmentación. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes tradicionales era el alto precio de las enzimas, especialmente las celulasas. Ante situación, una de las posibles soluciones que se plantean es la de utilizar pretratamientos biológicos en los que los microorganismos implicados en la fermentación sean capaces de producir una serie de enzimas necesarias para hidrolizar la celulosa.

Las celulasas son un grupo de enzimas que tienen un efecto sinérgico en la degradación de la celulosa. Tanto hongos como bacterias son capaces de producir celulasas. Entre las bacterias se encuentran como *Bacillus*, *Erwinia*, y *Streptomyces*. Entre los hongos, se destacan *Aspergillus*, *Penicilium* y *Sclerotium*. En la industria, *Trichoderma viridae*, *T. reesei* y *T. longibrachiatum*, tanto en sus formas silvestres como mutadas, son productores importantes de celulasas y hemicelulosas.

Las siguientes etapas en el proceso de obtención de etanol son independientes del tipo de hidrólisis que se haya utilizado.

### Fermentación

Como consecuencia de la hidrólisis de la hemicelulosa hay presencia de pentosas, el proceso de fermentación presenta algunas diferencias en comparación con las materias primas ricas en azúcares y almidón.

En situaciones donde se han utilizado pretratamientos que descomponen la hemicelulosa, pero no la celulosa, o en hidrólisis ácidas que se realizan en dos etapas, donde la degradación de estos dos compuestos ocurre por separado, se puede considerar la fermentación separada de pentosas y hexosas. En tales casos, se pueden utilizar microorganismos y condiciones específicas para cada uno de estos sustratos.

En caso de que no se quiera realizar una fermentación que no dé como resultado hexosas y pentosas, existe la posibilidad de usar microorganismos que puedan fermentar simultáneamente la xilosa y la glucosa.

Además, existe la opción de realizar fermentaciones con cultivos mixtos donde se utiliza pan varias especies distintas de microorganismos. Esto permite fermentar los productos resultantes de ambas (celulosa y hemicelulosa) en un mismo reactor.

### **2.5.1.1 Gestión de subproductos y residuos**

Cuando se trata de sustratos lignocelulósicos, la lignina remanente resultante de los pretratamientos puede ser aprovechada comercialmente para su conversión en diferentes productos químicos. Esta opción suele ser más lucrativa que utilizarla con fines térmicos.

### **2.5.2 Producción de biogás como fuente de energía**

Se suele denominar biogás a la mezcla gaseosa obtenida en la fermentación anaerobia de materia orgánica. Está compuesto principalmente por  $\text{CH}_4$  (45 – 70 %) y  $\text{CO}_2$  (30 – 45 %), así como por  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , y vapor de agua en proporciones variables, junto con trazas de decenas de otros compuestos (Osorio y Torres, 2009).

La descomposición de la materia orgánica que resulta en la producción de biogás se conoce como digestión anaeróbica. El resultado de esta digestión anaeróbica se mide en metros cúbicos de gas generados por cada kilogramo de sólidos volátiles que han sido introducidos en el digester. Estos, representan la cantidad de materia orgánica presente en el sustrato.

El biogás se produce principalmente de cultivos con alto valor energético o residuos de explotaciones agrícolas, ya sea ellos sin nada más o combinados con residuos ganaderos. En ocasiones, puede haber similitudes en las infraestructuras y procesos utilizados, pero los parámetros operativos se ajustan específicamente para maximizar la producción de biogás, siempre teniendo en cuenta que a raíz de la digestión anaeróbica surgen unos efectos secundarios que resultan positivos.

En las regiones áridas, la escasez de desechos orgánicos es una clara desventaja para la producción de biogás. Sin embargo, esta limitación puede superarse mediante el desarrollo de

cultivos energéticos adaptados a las condiciones áridas. En este sentido, las cactáceas, en nuestro caso OFI, que se caracteriza por su metabolismo CAM, se recomiendan como fuentes alternativas de energía debido a su gran potencial para la producción de biomasa (García de Cortázar y Nobel, 1992; García de Cortázar y Varnero, 1995).

En la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Chile, los experimentos con *Opuntia ficus-indica* (Uribe et al., 1992, Varnero et al., 1992; Varnero y Garcia de Cortazar, 1998) indicaron que los cladodios no son un buen material metanogénico. La calidad del material utilizado inicialmente en los digestores es de vital importancia para el proceso (Hilbert, 2009). Es necesario incorporar un material específico proveniente de otro digestor y enriquecido con bacterias metanogénicas, o incluir un porcentaje de abono animal, para asegurar un buen inicio en la producción de biogás. Además, el pH de la mezcla es generalmente bajo, lo cual también afecta la producción de biogás. Por esta razón, es recomendable mezclarlo con otros materiales, especialmente abono animal, para optimizar el proceso.

El mantenimiento de un pH cercano a 6 es crucial para lograr una eficiente fermentación de las mezclas que contienen diferentes concentraciones de cladodios y estiércoles. Esto permite obtener biogás con un contenido de metano superior al 60%. La composición del biogás producido está estrechamente relacionada con el pH de la materia prima biodigerida. Cuando el pH es inferior a 5.5, el biogás está compuesto principalmente de dióxido de carbono, con una menor combustibilidad y contenido energético. Por otro lado, cuando el pH es neutro o básico, el biogás es rico en metano. Por lo tanto, es importante aumentar la proporción de estiércol en la mezcla y utilizar cladodios de más de 1 año de edad. El tamaño de partícula del material picado no tiene un impacto significativo en la eficiencia del proceso de fermentación (Varnero y López, 1996; Varnero y García de Cortázar, 1998).

## **2.6 Interés desde el punto de vista ecológico**

La alta rusticidad de *Opuntia ficus-indica* hace que tolere épocas de sequía prolongada, altas temperaturas, suelos erosionados y viento. Estas características tan especiales hacen que sea una planta apta para poblar las áreas afectadas por los dos grandes problemas ecológicos de la actualidad: la desertificación y el cambio climático (Nefzaoui y El Mourid, 2008).

En zonas marginales que sufren grandes épocas de sequía, una plantación de *Opuntia* puede servir de reservorio de forraje permanente en épocas donde no haya pasto para el ganado. Al



poder instaurarse en suelos muy arenosos, climas secos y suelos degradados, hace un papel de rehabilitador de estas zonas.

En zonas áridas y semiáridas la erosión hídrica es muy acentuada, ya que no existe una cubierta vegetal que aguante la erosión, por lo que la instauración de *Opuntia* en este tipo de ecosistemas ofrecería una protección de la capa superficial que mejoraría las condiciones para otras especies puedan instalarse allí y crear una barrera vegetal.

También es importante recordar que las raíces de *Opuntia* crecen cada año en las épocas de lluvia y en los periodos secos las raíces más pequeñas mueren, agregando de esta manera materia orgánica al suelo. De esta manera, estamos aportando a suelos muy pobres materia orgánica muy valiosa, lo que mejora las condiciones a otros seres vivos que si no fuera de esta manera no tendrían acceso a esta materia orgánica y no podrían instaurarse en zonas en proceso de desertificación, protegiendo de esta manera la capa superficial del suelo.



**Figura 11:** Manejo de *Opuntia* en Túnez para la protección de la cuenca hidrográfica (FAO, 2018).

Al tener un metabolismo tipo CAM también son ideales para regular los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico y paliar parte del efecto invernadero. Otra ventaja de su metabolismo es el aprovechamiento que hace del agua en comparación a las tipo C3 y C4.

Otro punto importante es el relacionado con la biodiversidad en el modelo de agricultura actual. En la actualidad la intensificación de la agricultura ha provocado la pérdida de biodiversidad en ambientes naturales de flora y fauna local. La implantación de opuntia en ecosistemas de clima cálido sirve de protección para otras plantas locales, además de una fuente de refugio, agua y comida para animales. Cabe destacar la importancia para las aves, a las cuales proporciona un excelente lugar para anidar. Los excrementos de estas aves suelen contener semillas de plantas, por lo que el sombreado que provoca la planta de *Opuntia* favorece la germinación de estas.

Al no necesitar un sistema de riego se garantiza su supervivencia en el medio rural y su época de floración coincide con la estación seca, proporcionando así alimento en momentos de escasez debido a las duras condiciones.

Estos servicios que proporciona *Opuntia ficus-indica* son muy valiosos en el entorno cambiante desde el punto de vista medioambiental del presente, por lo que debe ser considerada como un pilar fundamental en la lucha por la recuperación de los ecosistemas que se encuentren en proceso de desertificación y en áreas pobres del planeta como una importante fuente de recursos de muy bajo coste de producción debido a sus escasas necesidades para su mantenimiento.

### **3. Objetivo**

El objetivo principal es evaluar y analizar los rendimientos de la cosecha de *O. ficus-indica* en nuestra parcela durante tres años, identificando tendencias y patrones. También se tendrán en cuenta factores ambientales y técnicas de agronomía para el manejo del cultivo. Se busca proporcionar una visión detallada de los rendimientos e identificar los factores críticos que afectan la productividad. Con los resultados obtenidos esperamos poder ofrecer las claves para sacar el mayor rendimiento de una plantación cuyo objetivo sea la producción de biomasa vegetal a partir de *O. ficus-indica*, para ser utilizada como fuente principal para el funcionamiento de una biorrefinería.

#### 4. Material y métodos

Este trabajo se ha llevado a cabo sobre la plantación de la Finca Tomás Ferro de la Universidad Politécnica de Cartagena, ubicada en La Palma (Cartagena) (**Figura 12**). La plantación está formada por 39 ejemplares adultos de *O. ficus-indica* de entre 10 y 14 años (**Figura 13**). El marco de plantación es de 1,5 x 3 metros.



**Figura 12:** Vista aérea de la Finca Tomás Ferro (Google Maps, 2023).



**Figura 13:** Parcela en la que se realizó el estudio en la finca Tomás Ferro. (A. Ojados, 2023).

Las coordenadas de la plantación son N 37° 41' 12.896", O 0° 57' 3.937". Bajo un clima mediterráneo subtropical cálido o semicálido, con dos estaciones bien marcadas (verano e invierno) separadas por dos de transición (primavera y otoño), donde la temperatura media anual es muy elevada, lo cual se explica por la ausencia de una verdadera estación fría. La temperatura del mes más frío está entre los 8 y 11°C, con unas medias mínimas de 4 y 7°C, por lo que las heladas son prácticamente inexistentes. Las temperaturas medias del mes más cálido están entre 26 y 28°C, con medias de máximas entre 32 y 34°C. La media de las precipitaciones anuales es de 200-300 mm, destacando un periodo seco que dura entre 7-11 meses según las estaciones.

El cultivo está implantado sobre un suelo desarrollado sobre sedimentos cuaternarios calizos, que es el más común dentro de la llanura del Campo de Cartagena. Es un suelo poco evolucionado, con pocos horizontes y difíciles de diferenciar.

El estudio se ha llevado a cabo a lo largo de 3 años, comenzando en febrero de 2020 y dándose por finalizado en mayo de 2023.

En la **Tabla 6** se muestran las precipitaciones mensuales durante los años del estudio.

**Tabla 6:** Precipitación mensual (mm) durante el periodo de estudio en La Palma (Cartagena). Datos de la estación meteorológica de AEMET.

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
<b>2020</b>	75,3	0,3	168	44,6	9,8	9,1	6,4	1,6	2	2,1	7,6	1	<b>328</b>
<b>2021</b>	41,4	0,5	76,3	48,9	69,7	5,4	1,3	0,4	60	5,7	70,8	1,3	<b>381</b>
<b>2022</b>	9,7	0,8	223	92	22,4	0,8	0	0,8	21	21,5	12,3	36	<b>440</b>

Durante este periodo las plantas se regaron 2 veces cada año, durante el mes de diciembre y en agosto. El riego del mes de diciembre se hizo junto a un fertilizante nitrogenado para, junto con la poda, favorecer una segunda fructificación en el mes de febrero. El riego que se dio en el mes de agosto es para que la planta tuviese disponible agua en el suelo durante los meses de mayor demanda hídrica y que así no sufriese ningún tipo de estrés hídrico. En la **Tabla 7** se presentan los datos de agua procedente de lluvia que recibió cada planta por año a lo largo del tiempo, y respectivamente en la **Tabla 8** los datos de agua que cada planta recibió por riego al año.

**Tabla 7:** Litros anuales que ha recibido la planta a causa de las precipitaciones.

<b>Año</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Litros/planta</b>
<b>2020</b>	328	1476
<b>2021</b>	381	1714.5
<b>2022</b>	440	1980

**Tabla 8:** Litros anuales que ha recibido la planta por riego.

<b>Año</b>	<b>Riego (mm)</b>	<b>Litros/planta</b>
<b>2020</b>	3	13.5
<b>2021</b>	3	13.5
<b>2022</b>	3	13.5

En el primer año de estudio se le dio una primera poda de formación, ya que cuando se empezó este trabajo, los ejemplares llevaban muchos años sin haber sido cuidados y había que eliminar ramas dañadas y zonas envejecidas, todo esto con el objetivo de que la planta renovara sus cladodios y darle una forma adecuada a la planta para evitar enmarañamiento.

La primera poda se realizó en el mes de agosto del año 2020, y más adelante se realizó una segunda poda en el mes de julio de 2021. Debido a la situación sanitaria provocada por la pandemia, no se pudo realizar una poda en el mes de diciembre. En el año 2022 se planifico una poda de nuevo para verano, pero el cultivo sufrió una plaga muy fuerte de *Dactylopius opuntiae*, lo que provocó daños severos en el cultivo y se decidió no podar la planta, ya que los cladodios obtenidos estarían dañados y no servirían para el estudio. Además, que supondría dañar a las plantas que ya estaban debilitadas por la plaga y esto podría suponer un daño mayor para el cultivo. En la **Figura 14** se pueden apreciar los daños provocados por la plaga y el estado de los ejemplares.



**Figura 14:** Cladodio infectado por *Dactylopius opuntiae*. (A. Ojados, 2023).

En mayo de 2023, tras más de un año, las plantas aún no se han recuperado y siguen en un mal estado que imposibilita seguir trabajando a día de hoy en ellas. La **Figura 15** fue tomada el pasado 29 de junio de uno de los ejemplares de la finca, como se aprecia en ella, los cladodios están muy dañados y la planta no se encuentra en un buen estado, aunque está comenzando a brotar nuevos cladodios.





**Figura 15:** Cladodio partido a causa del daño de *Dactylopius opuntiae*. (A. Ojados, 2023).

La poda se llevó a cabo junto con los trabajadores de la finca. Para ello se utilizó:

- **Tractor:** se precisó de la ayuda de un tractor para poder transportar la balanza. Por el espacio que había entre las dos filas de Opuntia iba avanzando, y a medida que se podaba cada ejemplar, se metían los restos de poda en el capazo y se llevaba a la balanza, donde una vez pesados, los restos se vaciaban y se avanzaba a los siguientes ejemplares.
- **Báscula de precisión:** utilizada para calcular el peso de la poda. Unida al tractor sobre una plataforma para poder moverla con mayor facilidad a lo largo de la parcela.
- **Machete:** utilizado para cortar los cladodios de menor tamaño, jóvenes no lignificados y más al descubierto.
- **Sierra con mango largo:** se utilizó para cortar cladodios que se encontraban en zonas más altas o de difícil acceso debido al enmarañamiento y cladodios más viejos y que presentaban lignificación o incluso ya leñosos.

- **Capazo:** fue el recipiente utilizado para colocar los restos de la poda, lo cual facilitó su manejo, transporte y posterior pesaje en la báscula.
- **Guantes y gafas de protección:** elementos de protección ya que al estar manejando y cortando cladodios, los pinchos que estos tienen pueden provocar accidentes no deseados.

Los datos seleccionados para este estudio han sido obtenidos de la poda de los cladodios de Opuntia, utilizando los instrumentos y la metodología anteriormente expuesta. En el siguiente capítulo se pasará a exponer dichos datos y a ponerlos en contexto del planteamiento inicial.

## 5. Resultados y discusión

Cada ejemplar de fue asignado con una letra, que indicaba su posición en la fila en la que está ubicada en la plantación y con número que indica a que fila pertenece.

Algunos de los ejemplares no se llegaron a podar, ya sea porque se encontraban muy dañados y la poda podía suponer un riesgo para su supervivencia o porque estaban con buena estructura y no era necesaria.

### Producción

Los datos obtenidos durante la poda de 2020 nos dan un total de 882,58 kg de peso fresco de la poda tal y como refleja la **Tabla 9**.

**Tabla 9:** Peso en Kg de poda de cada ejemplar de la plantación, año 2020.

PODA 2020			
Ejemplar	Peso (kg)	Ejemplar	Peso (kg)
A1	29,16	A2	65,62
B1	6	B2	2,84
C1	24,06	C2	0
D1	12,88	D2	0
E1	68,16	E2	0
F1	22,34	F2	3,3
G1	3	G2	0
H1	0	H2	15,54
I1	17,86	I2	24,86
J1	14,8	J2	8,14
K1	4,52	K2	38,64
L1	40,4	L2	8,04
M1	41,5	M2	10,68
N1	57,3	N2	20,98
O1	12	O2	11,86
P1	20,76	P2	9,3
Q1	33,64	Q2	0
R1	36,14	R2	23,7
S1	27,7	S2	27,78
T1	139,08	T2	
<b>Total: 882,58</b>			

A continuación, se muestran los datos obtenidos de la poda realizada en el año 2021, con un total de 392,83 kg de peso fresco (**Tabla 10**).

**Tabla 10:** Peso en Kg de poda de cada ejemplar de la plantación, año 2021.

<b>PODA 2021</b>			
<b>Ejemplar</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Ejemplar</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>A1</b>	9,5	<b>A2</b>	15,9
<b>B1</b>	23,28	<b>B2</b>	2,48
<b>C1</b>	6,2	<b>C2</b>	0
<b>D1</b>	0	<b>D2</b>	8,9
<b>E1</b>	3,92	<b>E2</b>	0
<b>F1</b>	27,81	<b>F2</b>	5,68
<b>G1</b>	7,14	<b>G2</b>	7,54
<b>H1</b>	4,58	<b>H2</b>	7,1
<b>I1</b>	12,44	<b>I2</b>	16,66
<b>J1</b>	0	<b>J2</b>	6,8
<b>K1</b>	0	<b>K2</b>	28,6
<b>L1</b>	19,18	<b>L2</b>	19,5
<b>M1</b>	11,88	<b>M2</b>	21,22
<b>N1</b>	23,18	<b>N2</b>	8,54
<b>O1</b>	6,74	<b>O2</b>	3
<b>P1</b>	7,28	<b>P2</b>	6,2
<b>Q1</b>	8,3	<b>Q2</b>	0
<b>R1</b>	27,92	<b>R2</b>	0
<b>S1</b>	10	<b>S2</b>	11,36
<b>T1</b>	14	<b>T2</b>	
<b>Total: 392,83</b>			

En el primer año de poda se consiguió un 224,67% más que al año siguiente, lo que supone más del doble. La explicación de esto es que esta primera poda fue mucho más abundante ya que los ejemplares llevaban años sin ser podados y había que aclarar y rejuvenecer los ejemplares para las recolecciones de los años siguientes.

De todos los componentes que posee el cladodio, solamente nos interesan para nuestro estudio los siguientes: pectina, hemicelulosa, celulosa y lignina.

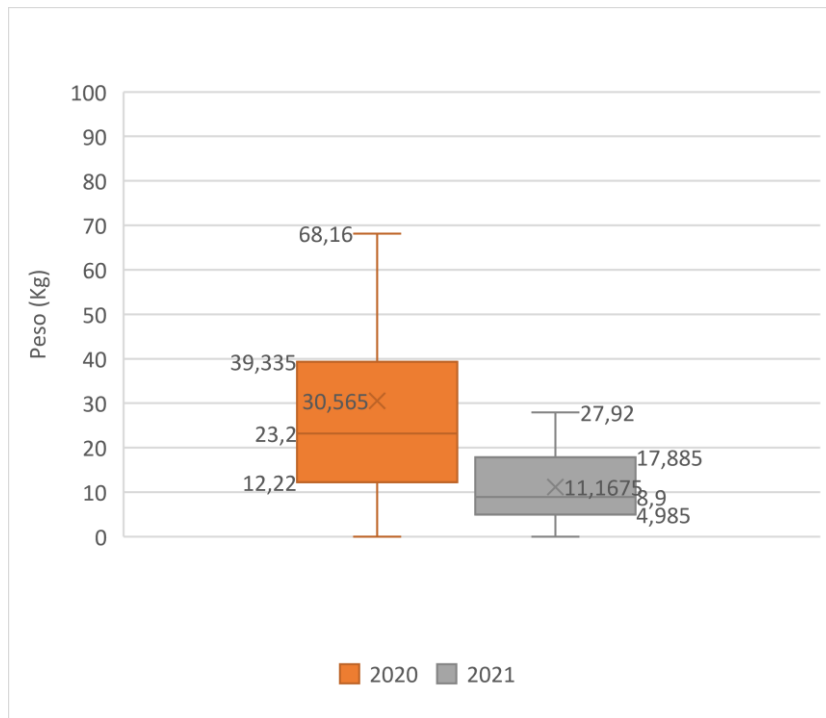
Para calcular la cantidad de cada uno de estos compuestos presentes en los restos de poda, nos hemos basado en los datos proporcionados por un proyecto sobre *O. ficus-indica* que se llevó a cabo en 2003 por BIONET Engineering y desarrollado por el grupo de Genética de la UPCT. En este estudio se trabaja con 3 variedades distintas del género *Opuntia*, como actualmente se

desconoce de que variedad es cada ejemplar que se encuentra en la finca, se ha hecho una media de las proporciones de estos componentes y se ha trabajado con ella. En la **Tabla 11** se muestran los datos del estudio de Genetics-UPCT en el que nos hemos basado.

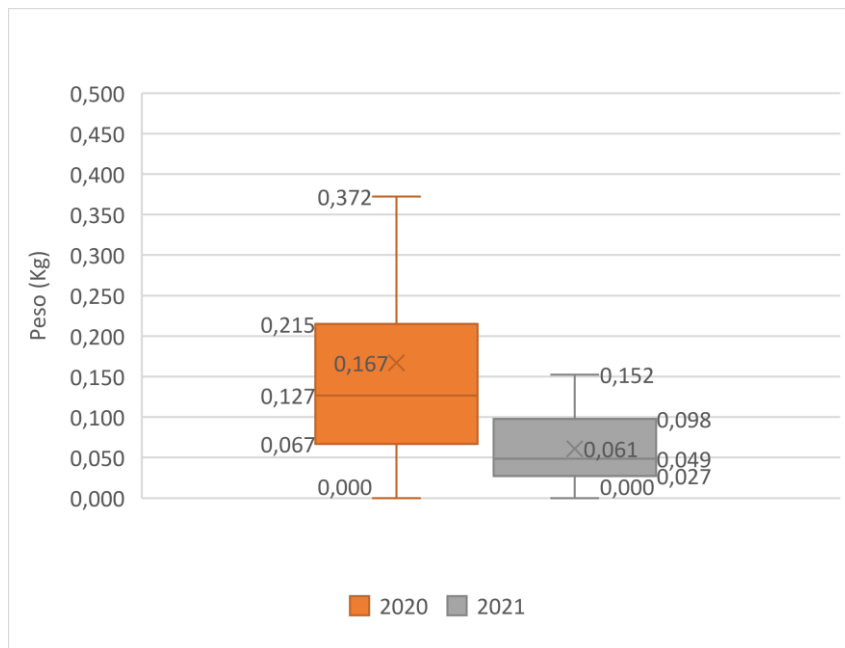
**Tabla 11:** Composición de los cladodios (Informe Genetics-UPCT, 2013).

<b>CLADODIOS</b>								
<b>Variedad</b>	% Materia Seca							
	<b>Pectina</b>	<b>SD pec.</b>	<b>Hemicelulosa</b>	<b>SD hem.</b>	<b>Celulosa</b>	<b>SD cel.</b>	<b>Lignina</b>	<b>SD lign.</b>
<i>Bersheva 1</i>	5,28	0,7	46,56	1,59	11,25	0,3	22,56	1,01
<i>Revertante</i>	6,27	2,49	43,01	1,22	11,33	0,71	23,84	1,02
<i>Ofer</i>	4,82	1,18	46,13	1,9	11,57	0,49	24,9	2,01
<b>Media</b>	5,46	1,46	45,23	1,57	11,38	0,50	23,77	1,35

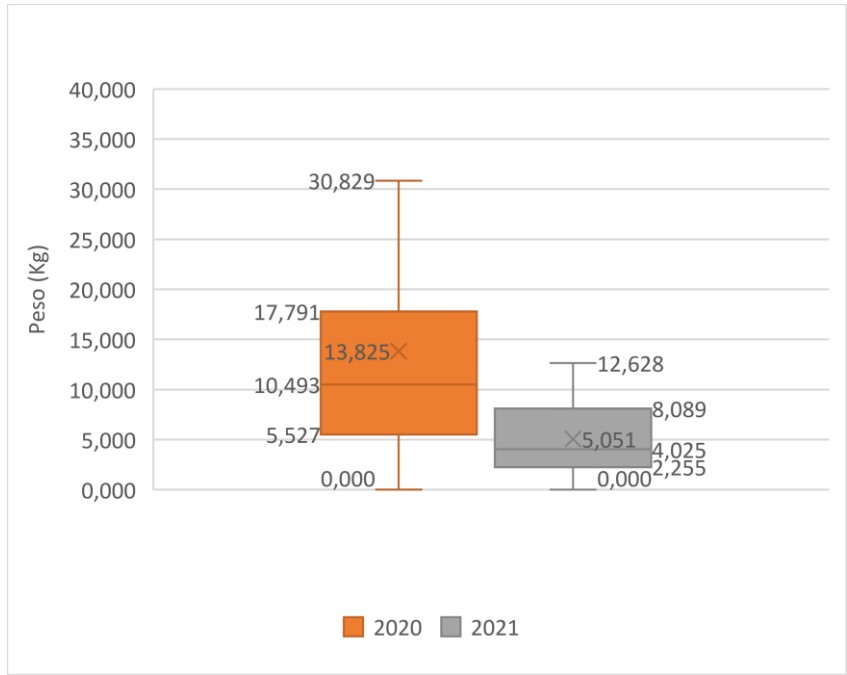
Basándonos en la cantidad de componentes presentes en los cladodios de la **Tabla 8**, elaboramos con nuestros datos los siguientes diagramas para ver qué cantidad de componentes había presente en nuestro trabajo en base a las dos podas realizadas. A continuación, se muestran los diagramas pertenecientes a el peso de la poda (**Figura 16**), pectina (**Figura 17**), hemicelulosa (**Figura 18**), celulosa (**Figura 19**) y lignina (**Figura 20**). Los datos están calculados para ver las cantidades que encontraríamos de cada componente por cada árbol de nuestro estudio.



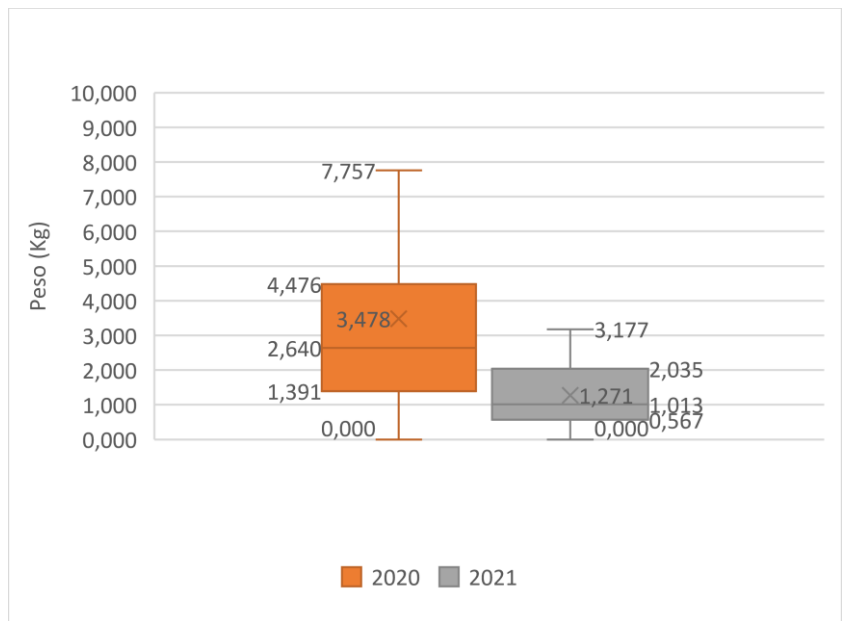
**Figura 16:** Kg de poda por planta.



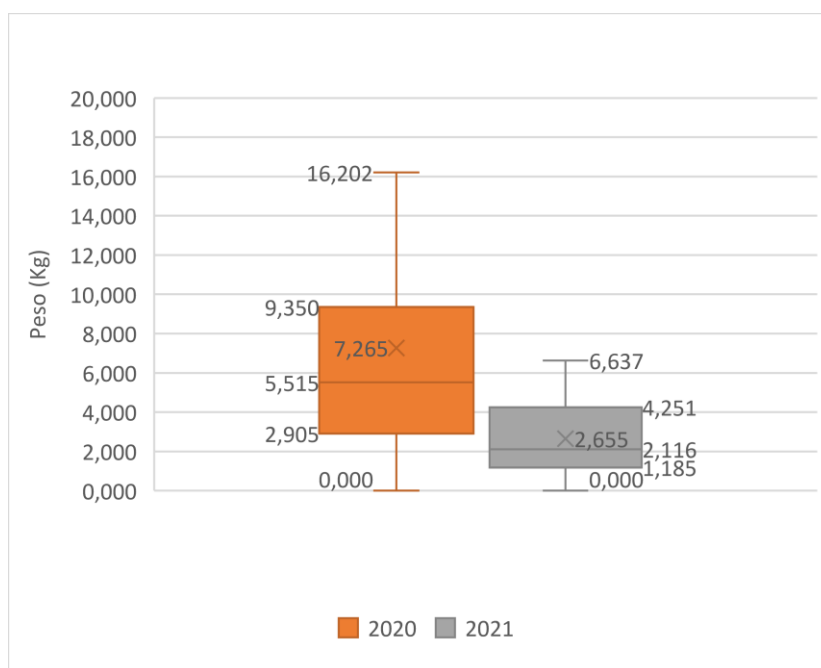
**Figura 17:** Kg de pectina por planta.



**Figura 18:** Kg de hemicelulosa por planta.



**Figura 19:** Kg de celulosa por planta.



**Figura 20:** Kg de lignina por planta.

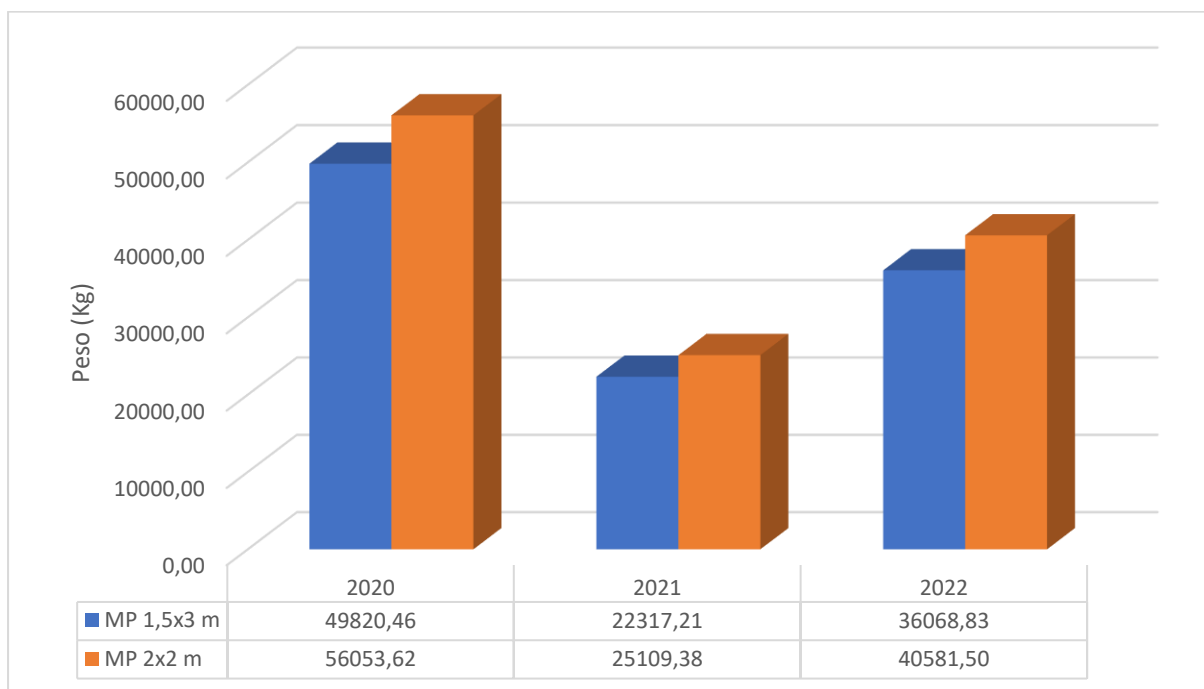
Tal y como se aprecia en la **Figura 16** se sacó una media de 30,56 kg de poda por árbol en 2020, la cual contrasta con los 11,16 kg de media que se obtuvieron en el 2021. Esto se debe a la limpieza y formación que se les hizo a los ejemplares como hemos comentado anteriormente.

El componente principal del cladodio es la hemicelulosa (**Figura 18**) consiguiendo de media unos 13,82 kg por planta, seguido de la celulosa y la lignina (**Figura 19** y **Figura 20**) las cuales se obtiene alrededor de la mitad en comparación a la hemicelulosa.

Conocidos estos datos, decidimos calcular qué cantidad de estos componentes obtendríamos por hectárea con el marco de plantación (MP) de 1,5 x 3 m que tiene nuestro cultivo en la actualidad. También decidimos calcular cual sería la producción si cambiásemos el marco de plantación a 2 x 2 m ya que en otros estudios se ha demostrado que se obtiene un mayor rendimiento y no afecta negativamente a las plantas. Se asumió que, aunque se cambiara el marco de plantación, la producción de cada árbol sería la misma que en el primer supuesto.

También se estableció una hipotética tercera poda, que habría correspondido al año 2022, que no se pudo realizar por la plaga que sufrió el cultivo y que hemos mencionado anteriormente. Los datos de esta tercera hipotética poda se han obtenido haciendo la media de los datos de producción por hectárea estimados con los datos de 2020 y 2021, los cuales se muestran a continuación en la **Figura 21**.





**Figura 21:** Comparativa del peso de poda/ha al año en función al marco de plantación utilizado.

Como se puede apreciar en la **Figura 21**, el marco de plantación de 2x2 metros incrementa en un 11% los rendimientos de poda obtenidos en comparación a un marco de plantación de 1,5x3 metros. Un marco de plantación de 2x2 metros nos brinda una mayor densidad de plantación y aumentado el rendimiento por hectárea de la explotación.

En la columna correspondiente al año 2022 obtenemos 36.068,83 y 40.581,5 Kg de poda (en marco de plantación 1,5x3 y 2x2 respectivamente), los cuales tomaremos como datos de referencia a la hora de establecer un rendimiento de Kg de biomasa producidos por cada hectárea de plantación, ya que se considera representativo teniendo en cuenta las circunstancias anteriormente citadas de los dos primeros años.

Según Godoy (2012), por cada tonelada de cladodio de chumbera se obtienen entre 156 y 221 litros de etanol, por lo que, para nuestro modelo, estaríamos consiguiendo entre 5.616 y 7.956 litros/ha de etanol. En el año 2023, el precio del bioetanol ronda los 4 €/L (energia.roams.es, 2023), lo que supondría una facturación de 22.464€ - 31.824€/ha de cultivo.

Respecto a la producción de metano, Godoy (2012) establece el rendimiento 198 m<sup>3</sup> por cada tonelada, por lo que obtendríamos entre 7.128 y 7.920 m<sup>3</sup>/ha de metano, que teniendo en cuenta

que el precio del metano es de 1.09 €/m<sup>3</sup> (globalpetrolprices.com, 2023) obtendríamos una facturación de 39,24 - 43,6 €/ha.

El precio de la biomasa de origen vegetal ronda los 0,5 €/kg (energia.roams.es, 2023) por lo que obtendríamos entre 18.034 – 20.290 €/ha de facturación por podas.

La hemicelulosa, lignina de celulosa y pectina tiene un precio conjunto de entre 350 – 500 € (alibaba.com), por lo que obtendríamos entre 18.900 - 27.000 €/ha de facturación por estos compuestos.

Por último, he de destacar la importancia del ahorro de agua respecto a otros frutales leñosos, ya que para Opuntia basta con agregar 27 L de agua por ejemplar al año es más que suficiente para mantener la supervivencia del cultivo y que la producción se mantenga. Esto hace que no sea necesario la instalación de un sistema de riego y baste con aportar el agua con maquinaria externa en los momentos que se precise.

## 6. Conclusión

Los resultados obtenidos en este estudio nos confirman una alta productividad por hectárea de biomasa por parte de *Opuntia ficus-indica*, se obtienen entre 36 y 41 T/ha de biomasa

El estudio que se ha realizado en campo junto con la bibliografía concluye que del cultivo de *Opuntia ficus-indica* se obtiene una facturación de 22.464€ - 31.824 €/ha de bioetanol, 18.034 - 20.290 €/ha de biomasa, 39,24 - 43,6 €/ha de metano y 18.900 - 27.000 €/ha de hemicelulosa, lignina de celulosa y pectina.

También es importante destacar el papel que juega *Opuntia ficus-indica* de cara a un futuro ya que brinda una serie de ventajas indispensables para afrontar un futuro más sostenible. Su capacidad para capturar CO<sub>2</sub>, las bajas necesidades de aportación de agua de riego respecto a otros frutales leñosos, su resistencia a condiciones climáticas adversas y su valor como alimento sostenible son características destacadas que resaltan la importancia en la protección del medio ambiente y promoción de sustentabilidad.

Promover este cultivo y su uso responsable es una estrategia obligatoria para poder hacer frente de manera responsable a los desafíos del cambio climático y poder avanzar hacia un futuro más sostenible.

## 7. Bibliografía

- Abraján, M.A. 2008. “Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica* (L) Miller) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A. & Ben Salem, L. 2002. Supplementation of *Acacia cyanophylla* Lindl. foliage-based diets with barley or shrubs from arid areas (*Opuntia ficus indica* var. *inermis* and *Atriplex nummularia* L.) on growth and digestibility in lambs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 96: 15–30.
- Ben Salem, H., Nefzaoui, A., Abdouli, H. & Ørskov, E.R. 1996. Effect of increasing level of spineless cactus (*Opuntia ficus indica* var. *inermis*) on intake and digestion by sheep fed straw-based diets. *Anim. Sci.*, 62: 293–299. Ç
- Bwititi, P., Musabayane, C.T. & Nhachi, C.F.B. 2000. Effects of *Opuntia megacantha* on blood glucose and kidney function in streptozotocin diabetic rats. *J. Ethnopharmacol.*, 69: 247–252.
- Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. 2008. Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía, pp. 44-49.
- COM. 2012. 60 final. La innovación al servicio del crecimiento sostenible: una bioeconomía para Europa.
- Dan Palevitch, Gideon Earon & Israel Levin. 2010. *Treatment of Benign Prostatic Hypertrophy with Opuntia ficus-indica (L.) Miller*. Volume 2, *Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants*, pp. 45-49.
- FAO. 2018. Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal.
- Fernández Rubio, J. Martínez Ortuño, V. 1983. “El cultivo de la chumbera para la producción de higos *de retallo*”. Hoja divulgadora 15/83. Editada por el Ministerio de Agricultura, Pesca, y Alimentación de España.
- Fernández, J, Sáiz, M.M. 1990. “La chumbera como cultivo de zonas áridas”. Hoja divulgadora 01/90. Editada por el Ministerio de Agricultura, Pesca, y Alimentación de España.
- Francisco Sánchez Godoy. 2012. Potencial del cultivo de la chumbera (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) para la obtención de biocombustibles. Tesis doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid (España).

- Frati Munari, A.C., Fernandez Harp, J.A., de la Riva, H., Ariza Andraca, R. & del Carmeritorres, M. 2004. Effect of nopal (*Opuntia* sp.) on serum lipids, glycaemia and body weight. *Am. J. Clin. Nutr.*, 80: 668–673.
- Galati, E.M., Mondello, M.R. Lauriano, E.R. Taviano, M.F. Galluzzo, M. & Miceli, N. 2005. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit juice protects liver from carbon tetrachloride induced injury. *Phytother. Res.*, 19: 796–800.
- Hull y Blekman. 1977. “An unusual epicuticular wax ultrastructure on leaves of *Prosopis tamarugo* (Leguminosae)”. *American Journal of Botany* 64(9): 1083 – 1091. Citado en: Sudzuki Hills, F. 1999. “Anatomía y morfología”. En “Agroecología, cultivo, y usos del nopal”. Estudio F.A.O Producción y Protección Vegetal n° 132. Roma. ISBN: 9253037350.
- García de Cortázar, V. y Varnero, M.T. 1999. “Producción de Energía”. En “Agroecología, cultivo, y usos del nopal”. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal n° 132. Roma. ISBN: 9253037350.
- García de Cortázar, V., Nobel, P.S. 1990. “Worldwide environmental productivity indexes and yield predictions for a CAM plant, *Opuntia ficus – indica*, including effects of doubled CO<sub>2</sub> levels”. *Agricultural and Forest Meteorology* 49: 261 – 279.
- Hamelinck, C.N., Hooijdonk, G.V., Faaij, A.P.C. 2005. “Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-, and long-term”. *Biomass and Bioenergy* 28(4): 384 – 410.
- Hilbert, J. 2009. *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural.
- Inglese, P., Barbera, G., Gugliuzza, G, Liguori, G. 2009. “Ecophysiology and fruit production of cultivated *cacti*”. En: De la Barrera, E., Smith, W. (editores) “Perspectives in Biophysical Plant Ecophysiology. A tribute to Park S. Nobel”. Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 978057800411.
- Le Houérou, H.N. 1984. “Forage and fuel plants in the arid zone of North Africa the Near and Middle East”. En: Wickens, G.E., Goodwin, J.R. and Field, D.V. (editores). “Plants for Arid Lands”. George Allen and Unwin, Londres (Reino Unido), pp. 117-141.
- Le Houérou, H.N. 1992. “The role of *Opuntia* cacti in the agricultural development of the Mediterranean arid zones”. En: “Segundo Congreso Internacional de Tuna y Cochinilla”. 22-25 de septiembre, Santiago (Chile). Citado en: De Kock, G.C. (2001) “El uso de nopal como forraje en las zonas áridas de Sudáfrica”. En “El nopal (*Opuntia* spp.) como forraje”. Estudio F.A.O. Producción y Protección vegetal n° 169. Roma.

- Le Houérou, H.N. 1996. "The role of *cacti* (*Opuntia* spp.) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin". *Journal of Arid Environments* 33(2): 135-159.
- Le Houérou, H.N. 2002. "Man-made deserts: Desertization processes and threats". *Arid Land Research and Management* 16:1 – 36.
- Monjauze A., Le Houérou, H. N. 1965. "Le rôle des *Opuntia* dans l'économie agricole nord- africaine". *Bulletin de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Tunis*, 8-9 : 8-164.
- Nefzaoui, A. & El Mourid, M. 2008. Cash from cactus. *Appropriate Technol.*, 35: 18–20.
- Nobel, P. S. 1999. "Biología ambiental". En "Agroecología, cultivo, y usos del nopal". Nobel PC, J.; Andrade, J.L. (1992) Mucilage in cacti: its apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Experimental Botany*, 43 641– 648.
- Nobel PS (1991) Achievable Productivities of Certain Cam Plants - Basis for High Values Compared with C3 and C4 Plants. *New Phytologist* 119: 183-205
- Estudio F.A.O Producción y Protección Vegetal n° 132. Roma. ISBN: 9253037350.
- Nobel, P.S., Bobich, E.G. 2001. "Environmental Biology". En: Nobel, P.S. (Ed). "Cacti: Biology and Uses". University of California Press. ISBN: 0520231570.
- Orosio, F., y Torres, J.C. (2009) "Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production". *Renewable Energy* 34: 2164–2171.
- Plataformas Tecnológicas Españolas de Biomasa para la Bioeconomía (BIOPLAT) y de Química Sostenible. 2017. Manual sobre las biorrefinerías en España, pp. 11-12
- Saiz Jarabo, M.M. 1988. "Productividad de la chumbera (*Opuntia ficus-indica* (L) Miller) en distintos regímenes hídricos". Tesis doctoral. E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid (España).
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., Aceituna, C. 2007. "Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp.". *Journal of Arid Environments* 68: 534-545.
- Sudzuki Hills, F. 1999. "Anatomía y morfología". En "Agroecología, cultivo, y usos del nopal". Estudio F.A.O Producción y Protección Vegetal n° 132. Roma. ISBN: 9253037350.
- Torres-Ponce, Reyna & Morales-Corral, Dayanira & Ballinas, María & Nevarez-Moorillon, Guadalupe. 2015. El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en

- farmacia, alimentos y nutrición animal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6. 1129-1142. 10.29312/remexca.v6i5.604.
- Uribe, J.M., Varnero, M.T., Benavides, C. 1990. “Biomasa de la Tuna (*Opuntia ficus-indica* L. Mill.) como acelerador de la digestión anaeróbica de guano de bovino”. En: “XLI Congreso Anual Agronómico”. Santiago (Chile).
- Varnero, M.T. & Garcia de Cortazar, V. 1998. Energy and biofertilizer production: alternative uses for pruning-waste of cactus-pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill). In *Proceedings of the International Symposium on Cactus Pear and Nopalitos Processing and Uses*, 24–26 September 1998, Santiago, Chile, pp. 96–102. Faculty of Agrarian and Forest Sciences, University of Chile, CactusNet.
- Varnero, M.T. & Lopez, X. 1996. *Efecto del tamaño y edad de cladodios de tuna en la fermentación metanogénica de guano de bovino*. Boletín No. 11, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, pp. 80–89.
- Yang, N., Zhao, M., Zhu, B., Yang, B., Chen, C., Cui, C. & Jiang, Y. 2008. Anti-diabetic effects of polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladode in normal and streptozotocin- induced diabetic rats. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 9: 570–574.
- Zou D.M., Brewer, M., Garcia, F., Feugang, J.M., Wang, J., Zang, R., Liu, H. & Zou, C.P. 2005. Cactus pear – a natural product in cancer chemoprevention. *Nutr. J.*, 4: 25–29.