

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO I. CARÁCTERÍSTICAS DE LAS TUNAS	9
Descripción de <i>Opuntia ficus indica</i>	9
Adaptaciones de la especie al medio ambiente	12
Adaptaciones fisiológicas de la planta.....	13
Distribución ecológica de la planta.....	14
Composición química de <i>Opuntia ficus indica</i>	15
Cladodio.....	15
Fruto.....	15
CAPÍTULO II. EL BIOGÁS.....	16
Caracterización y composición del biogás.....	16
Proceso de digestión anaeróbica	17
Etapas de la digestión anaeróbica	18
Factores determinantes en la producción de biogás	19
Biodigestores	23
Clasificación de los biodigestores	23
CAPÍTULO III. POTENCIAL DE BIOGÁS EN PLANTACIONES DE <i>OPUNTIA FICUS INDICA</i> EN EL NORTE CHICO.....	27
Características edáficas y climáticas del norte chico de Chile	27
Caracterización de los suelos del norte chico de Chile	27
Descripción agroclimática del norte chico de Chile.....	29
Plantaciones de tunas	36
Propagación.....	36

Sistemas de plantación.....	38
Podas	39
Estimación del potencial de producción de biogás en plantaciones de tunas con fines agroindustriales versus plantaciones de tunas exclusivamente con fines energéticos	40
Potencial de producción de biogás para plantaciones destinadas a la agroindustria	41
Potencial de producción de biogás para plantaciones destinadas totalmente a la producción de biogás	43
CAPÍTULO IV. OTROS RESIDUOS UTILIZABLES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	44
Residuos vegetales	44
Residuos provenientes de animales.....	46
CONCLUSIONES.....	49
GLOSARIO	51
BIBLIOGRAFÍA.....	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición promedio del biogás.....	16
Cuadro 2. Composición promedio del bioabono.....	17
Cuadro 3. Características de microorganismos que participan en las etapas.....	19
Cuadro 4. Descripción de microorganismos según su temperatura.....	21
Cuadro 5. Caracterización agroclimática del norte chico de Chile.....	33
Cuadro 6. Producción anual de biomasa de tuna comercial en Til Til.....	41
Cuadro 7. Distribución de plantaciones de tuna en el norte chico de Chile.....	41
Cuadro 8. Consumo promedio de una familia de 5 personas.....	42
Cuadro 9. Superficie de cultivos más plantados en el norte chico de Chile.....	45
Cuadro 10. Número de cabezas de ganado más frecuentes del norte chico de Chile.....	47
Cuadro 11. Número de cabezas de ganado en comunas donde existen plantaciones de tuna.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cladodios y frutos de <i>Opuntia ficus indica</i>	11
Figura 2. Flor de <i>Opuntia ficus indica</i>	12
Figura 3. Biodigestor discontinuo.....	24
Figura 4. Biodigestor modelo chino.....	25
Figura 5. Biodigestor modelo indio.....	26
Figura 6. Biodigestor horizontal.....	26
Figura 7. Temperaturas máximas y mínimas mensuales (°C) Región de Atacama 2009....	34
Figura 8. Temperaturas máximas y mínimas mensuales (°C) Región de Coquimbo 2009..	35
Figura 9. Precipitaciones acumuladas mensuales (mm) Región de Atacama año 2009.....	35
Figura 10. Precipitaciones acumuladas mensuales (mm) Región de Coquimbo año 2009..	36
Figura 11. Propagación por macetas.....	37

Figura 12. Paleta de *Opuntia ficus indica* plantada $\frac{3}{4}$39

RESUMEN

En los últimos años, la utilización de energías renovables no convencionales ha alcanzado gran importancia tanto a nivel mundial como nacional, generando el interés de encontrar nuevas alternativas para la aplicación de energías renovables. La presente memoria investiga sobre las plantaciones de tunales como fuente de materia prima para la generación de biogás, así como también estima su potencial de producción en el norte chico de Chile.

El biogás es una alternativa energética para el sector agropecuario, el cual es obtenido mediante bioprocesos de fermentación de diversos residuos y desechos que se producen diariamente. Además de generarse biogás, se obtiene un residuo estabilizado, el cual puede ser incorporado al suelo. Esto constituye una alternativa para las zonas áridas y semiáridas del norte chico de Chile debido a que son suelos pobres en materia orgánica, y por lo tanto, presentan alto grado de deficiencia en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, limitando la plantación de cualquier tipo de cultivo.

La tuna (*Opuntia ficus indica*) es una especie que se adapta fácilmente a este tipo de situaciones, ya que logra modificarse según características del terreno y del clima del sector. Un ejemplo es la forma de su tallo que se modifica de acuerdo al manejo cultural que se le otorgue y según el clima. Posee un sistema radical superficial carnoso que favorece la absorción de agua que se encuentre cercana a la superficie. Su metabolismo CAM le permite adaptarse a sequías, permaneciendo sus estomas cerrados durante todo el día y toda la noche y a lluvias, abriendo sus estomas bien temprano en la mañana.

Otra característica importante de esta especie es la gran cantidad de biomasa que genera, llegando a producir 30ton/ha en condiciones de buen manejo cultural y buena disponibilidad de agua. Es por esta característica y por el potencial de generación de biogás que se considera una buena alternativa para el norte chico de Chile. Referente a la elección del digestor a utilizar, ésta dependerá del uso que se le quiera dar y de las condiciones económicas que se tengan. Se tienen estimaciones de la producción de biogás en el norte chico de Chile del orden de 13.406,4m³/kg/día de biogás. Esto se puede mejorar a través de la inclusión de otros residuos presentes en la zona que permitan modificar algunos parámetros determinantes en la generación de biogás.

Palabras claves

Opuntia ficus indica, Biogás, metabolismo CAM, biomasa, potencial de biogás.

ABSTRACT

Renewable energies have reached importance in the past years, not only on a national scale, but also on a global one, finding new applications for the use of renewable energies. This project investigates about prickly plantations as main source for the production of biogas and their energy potential for northern Chile.

Biogas is an energy alternative for the agricultural sector and is obtained by fermentation processes of different wastes produced daily. Besides the generation of biogas it is also possible to obtain a stabilized waste that can be incorporated on the soil, meaning an alternative for the dry and semi dry zones of the northern Chile. Because their soil is poor in organic matter content, therefore, presents deficient chemical, physical and biological properties. This makes difficult the implementation of any type of crops.

The prickly pear (*Opuntia ficus indica*) adapts easily to the previous conditions, because it is possible to modify it according to the features of the land and the weather. In example, the form of the stem varies depending on the cultural management and the weather conditions. The specie possesses a superficial fleshy root system that facilitates the absorption of water on the surface. Also, the CAM metabolism allows the adaptability to drought and rains, by closing the stomatas during day and night, and opening them early in the morning.

Another important feature of this specie is the biomass production, reaching around 30 ton/ha with good cultural management and water availability. For this reason and for the potential to produce biogas it is considered a good alternative for the northern Chile. To define the best biodigestor to use, this will depend on the use and the costs associated. The estimation of biogas production in the northern Chile is 13.406,4 4 m³/kg/d. This result can be improved adding other wastes produced in the area that allows change some parameters relevant for the production of biogas.

Key words

Opuntia ficus indica, Biogas, CAM metabolism, biomass, potential of biogas.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la utilización de energías renovables no convencionales ha alcanzado gran importancia a nivel mundial a consecuencia de los altos precios que ha adquirido el petróleo y el gas natural. A nivel nacional, además existe la necesidad de independizarse de los países limítrofes en lo que se refiere a energía, ya que se importa el 97% de petróleo, 84% de carbón y 78% gas natural. Es por esto que en el año 2009 fue aprobada la ley sobre diversificación de la matriz energética, la cual expone que toda empresa eléctrica para el período 2010-2014 tiene la obligación de que el 5% de la nueva energía instalada provenga de energías renovables no convencionales, incrementando a partir de esa fecha en un 0,5% anual hasta llegar al 10% en el año 2024 (BCN, 2009). Para lograrlo, el gobierno ha desarrollado distintos instrumentos de fomento para el desarrollo de energías limpias.

Las energías renovables no convencionales han alcanzado un alto grado de desarrollo de la tecnología para su aprovechamiento y por lo tanto, tienen incidencia en el mercado energético del país. Las energías renovables no convencionales son aquellas como la energía eólica, solar, pequeña hidroeléctrica, mareomotriz, geotérmica, biomasa y biogás. Estas, a su vez, son una alternativa para que el país utilice sus recursos naturales de manera sustentable y logre su independencia energética a largo plazo.

Para las zonas rurales y para el sector agropecuario una energía factible y necesaria para el manejo y tratamiento de sus residuos es la energía proveniente de la biomasa, como es el biogás. Esta alternativa energética se basa principalmente en la utilización de biomasa, la cual se define como energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica por medio de un proceso de digestión anaeróbico, obteniéndose un gas rico en metano. Este proceso, es una biodegradación de la mayor parte del material orgánico, produciendo un compuesto gaseoso de alto valor combustible y un residuo estabilizado (Uribe, 1993), el cual se puede utilizar como abono.

Actualmente, las zonas áridas y semiáridas del norte chico de Chile han sido investigadas para desarrollar cultivos energéticos que no afecten a los cultivos tradicionales destinados para la alimentación del ser humano, así como también otorgarles opciones a los pequeños agricultores de esas zonas para que utilicen sus terrenos pobres en materia orgánica y así proporcionarles un valor agregado como la generación de electricidad y la generación de bioabono.

La tuna, *Opuntia ficus indica*, es una especie ideal para esos sectores ya que presenta un alto poder de adaptación a cualquier tipo de clima y suelo, no obstante de la precaria necesidad de agua. Además es un cultivo que no sólo interesa para la producción de fruta o nopalitos, sino que posee un alto potencial de generación de biomasa como para la producción de biogás y bioabono. De esta manera, los agricultores pueden disminuir sus

gastos en consumo eléctrico produciendo su propia energía y a la vez puede mejorar el manejo cultural de las plantaciones producto del bioabono generado.

Según Tohá (1999), tres kilos de tunas secas pueden producir un metro cúbico de gas, el cual equivale aproximadamente a 10kW/ h. Además, se sabe que una plantación de tuna produciría 250 veces más energía eléctrica por metro cúbico de agua que una central hidroeléctrica (Neuenschwander, 2008).

Sin embargo, García de Cortázar y Varnero (2006) indican que la tuna por si sola, no constituye un buen material metanogénico, debido a la acidez que presenta. Una forma de mejorar la producción de biogás proveniente de la tuna es mediante la adecuada mezcla con otros residuos orgánicos para optimizar las condiciones de desarrollo de los microorganismos metanogénicos, en relación a niveles de pH del sistema. Estos residuos pueden ser guano animal y residuos de otros cultivos existentes en el norte chico de Chile. Con esto se mejoraría además las condiciones ambientales del sector debido a las fuertes emanaciones de olores que produce el guano animal y previene la aplicación directa de los rastrojos al suelo.

El desarrollo de esta revisión bibliográfica busca dar a conocer a las plantaciones de tunas como una alternativa energética para los agricultores de zonas marginales o áridas y semiáridas principalmente, junto con estimar el potencial de generación de biogás en el norte chico de Chile.

Objetivo General

Revisión bibliográfica sobre el potencial de producción de biogás a partir de plantaciones de tuna (*Opuntia ficus indica*) y de otros residuos disponibles para establecer mezclas en el norte chico de Chile.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS DE LAS TUNAS

En las últimas décadas las tunas han sido utilizadas principalmente para la producción de frutas y de cochinillas. Sin embargo, actualmente se está analizando su utilización para la generación de energías renovables. En este capítulo se dará a conocer las características generales de la especie *Opuntia ficus indica*, junto con algunos parámetros químicos, físicos y biológicos que tendrían incidencia en la producción de biogás.

Descripción de *Opuntia ficus indica*

Las tunas pertenecen a la familia de las *cactáceas* del género *Opuntia*, especie *ficus indica*. La taxonomía de las *Opuntias* es muy compleja debido a que el fenotipo varía según las condiciones agroecológicas del lugar, además de la existencia de muchos híbridos. Es por esto que sólo un trabajo de campo intensivo permitiría identificarlas claramente (Scheinvar, 1999).

La especie *O. ficus indica* se caracteriza por ser plantas de crecimiento arborescente, arbustivas, suculentas, rastreras o erectas, bien ramificadas, pudiendo alcanzar alturas de 3 a 5 metros (Scheinvar, 1999). Posee un sistema radical superficial y carnoso, sin embargo es extenso y robusto, rico en raíces finas absorbentes con excelentes condiciones de penetración en el suelo (FUNDACIÓN CHILE, 1992) alcanzando profundidades de 30 centímetros, el cual varía según el manejo cultural que se le otorgue y de las condiciones hídricas del lugar, específicamente de riego y la fertilización (Sudzuki, 1999). En condiciones de sequía se desarrollan raíces laterales carnosas provenientes de la raíz principal, lo que le permite tomar agua a niveles superficiales, mientras que en condiciones favorables de suelo y de manejo cultural, se desarrolla una raíz extendida que penetra profundamente en el suelo, alcanzando los 80cm (Berger, *et al*, 1993; Sudzuki, 1999).

Por otro lado, las plantas que son fertilizadas constantemente con estiércol y se les realiza un buen manejo cultural, presentan una mayor cantidad de raíces suculentas y no ramificadas a una distancia horizontal de la planta, midiendo entre 15 a 65cm, en cambio aquellas plantas que tienen un menor manejo cultural, poseen raíces más ramificadas y de apariencia corchosa con longitudes entre 4 a 8 metros (Pimienta, 1990; Berger, *et al*, 1993).

Según Sudzuki (1999), las raíces tienen tres formas para contribuir a la tolerancia de la sequía: primero restringen la superficie radical y reduce su permeabilidad al agua; segundo, absorben velozmente las pequeñas cantidades de agua aportadas por lluvias ligeras y tercero, son capaces de disminuir la transpiración producto al alto potencial negativo

radicular. Además, la especie *O. ficus indica* puede tener cuatro tipos distintos de raíces, las cuales se denominan: **estructurales** a aquellas formadas por un esqueleto primario de pocas raíces fibrosas sin patrón de distribución; **absorbentes**, aquellas que se desarrollan en poco tiempo después de responder a la humedad; **en espolón**, pueden ser cortas, gruesas y carnosas con muchos pelos radicales y otras similares al sistema radical absorbente y finalmente, **raíces desarrolladas de aréolas**, aquellas que están en contacto con el suelo, siendo en un comienzo gruesas y sin pelos radicales (Sudzuki, 1999).

Otra estructura morfológica a describir es el tallo o cladodio (penca) (Figura 1), el cual posee gran capacidad para almacenar agua, permitiendo soportar largos períodos de sequía (Sáenz, 2006a). En él se transforma la luz en energía química, realizándose la fotosíntesis. Durante los dos primeros años son aplanados y pueden ser de forma lanceolada, elíptica abovada y suborviculares, dependiendo de las condiciones climáticas y manejo cultural (Pimentia, 1990; Berger, *et al*, 1993). Sus dimensiones son variables pudiendo alcanzar entre 60-150cm de ancho, entre 60-70 de longitud y 2 a 3cm de grosor, dependiendo de la cantidad de nutrientes y agua disponible en el lugar (Berger, *et al*, 1993; Sáenz, 2006b). Posteriormente, pasado los 5 a 6 años de edad, toman una forma cilíndrica, lignificada, llegando a ser tallos leñosos, agrietados de color ocre blancuzco a grisáceos, formando el verdadero tronco de la planta (Berger, *et al*, 1993; Sáenz, 2006b). El cladodio se desarrolla completamente al pasar los 90 días, dependiendo de la temperatura y humedad en el sitio (Berger, *et al*, 1993).

En este tallo modificado se desarrollan las aréolas por ambas caras del cladodio, las cuales dan origen a los nuevos cladodios, flores y raíces según las condiciones ambientales. Están compuestas por una cavidad en las cuales crecen hojas pequeñas que rápidamente caen para ser reemplazadas por espinas, las cuales pueden estar agrupadas y ser pequeñas y finas (gloquídeos) o pueden ser gruesas y largas (FUNDACIÓN CHILE, 1992; Berger, *et al*, 1993). Estas hojas modificadas tienen un color gris translúcido, pero rara vez están presentes en el tallo (Scheivar, 1999). Las espinas se desarrollan en el primer estadio de crecimiento, luego la mayoría se caen a medida que aumenta la temperatura, siendo ésta una característica única para las especies desarrolladas en Chile (Berger, *et al*, 1993). Las espinas poseen una superficie áspera y los gloquídeos tienen una superficie suave. Su tamaño alcanza 1,5cm y están acompañadas por dos espinas pequeñas. Además se separan con facilidad cuando son tocadas o producto del viento, ya que es su sistema de defensa ante la presencia de una especie animal. Sin embargo, la función principal de las espinas es condensar agua del aire y disminuir la temperatura diaria del tallo y la intercepción de luz por cladodio (Sudzuki, 1999).



Figura 1. Cladodios y frutos de *Opuntia ficus indica*.

Las flores (Figura 2) en esta planta son hermafroditas, sésiles, solitarias, de color variable de naranja a amarillo y es efímera, permaneciendo, en Chile, sólo dos días abierta. Se desarrollan en pencas de dos años (Berger, *et al*, 1993; Sáenz, 2006b). Su fruto (Figura 1) es clasificado como una baya, dulce, jugoso, comestible, cuyas dimensiones varían entre 5 y 10cm de largo y 4 a 8cm de ancho (Scheivar, 1999). Su tamaño depende del número de semillas fecundadas y abortadas, y su peso fresco y seco se determina con la medición del diámetro ecuatorial del fruto (Sudzuki, 1999). En Chile, el fruto de verano se demora menos en desarrollar que el fruto de invierno debido a la mayor temperatura y luminosidad que existe en época estival (Berger, *et al*, 1993).



Figura 2. Flor de *Opuntia ficus indica*.

Adaptaciones de la especie al medio ambiente

Las *Opuntias ficus indica* son especies que se adaptan fácilmente a distintos ambientes, tales como zonas áridas y semiáridas, alturas, zonas templadas hasta zonas muy frías con temperaturas de -40°C , lo que las hace poseer una gran diversidad ecológica (Nobel, 1999). Es por esta razón que esta planta ha realizado variadas modificaciones para lograr adaptarse a diferentes condiciones ambientales, específicamente a zonas áridas y semiáridas.

Una modificación determinante ha sido la reducción del tamaño de la lámina foliar y desarrollar hojas efímeras, cuya vida es de 30 a 40 días siendo reemplazadas por espinas, hojas modificadas esclerificadas. Esto permite reducir la pérdida de agua de las plantas por el proceso de transpiración foliar, realizándose de esta manera la fotosíntesis en los tallos verdes (FUNDACIÓN CHILE, 1992). Otra modificación se realiza en la epidermis de los cladodios, la cual se encuentra cubierta por una cutícula gruesa para reducir la evaporación, además de disminuir la absorción excesiva de energía lumínica. El grosor y la succulencia de esta planta, por un lado favorece para adaptarse a lugares donde las aguas lluvias son escasas y esporádicas, pero por otro lado afecta su actividad fotosintética, porque no se puede transmitir a través del cladodio la radiación fotosintética. Se ha observado que la orientación que poseen los cladodios también es un factor influyente en la radiación fotosintética, ya que las verticales interceptan más luz que las horizontales (Pimienta, 1990).

Una última adaptación afecta a la aréola, la cual ha realizado una diferenciación de funciones entre las espinas y los gloquídeos. Ambos, en conjunto, aumentan el grosor de la capa frontera, disminuyendo la transpiración foliar; y las espinas por sí solas, absorben

energía solar de onda corta, ayudando a moderar los extremos de temperatura diurna en los cladodios. Sin embargo, esta característica también puede tener su desventaja, ya que si existe gran cantidad de espinas en la superficie de un cladodio, éste puede disminuir la eficiencia fotosintética de la planta y asimismo disminuir la productividad neta de las plantas (Pimienta, 1990).

Adaptaciones fisiológicas de la planta

Las tunas poseen un proceso fotosintético distinto al de la mayoría de las plantas y se denomina Metabolismo Ácido Cruseláceo (CAM). Éste consiste en la apertura nocturna de sus estomas, permitiendo la captura del anhídrido carbónico (CO_2) cuando la temperatura y el déficit de presión de vapor sean bajos, evitando de esta manera, la pérdida de agua por transpiración durante el día (Pimienta, 1990).

Las plantas CAM son nativas de zonas áridas y semiáridas o de micro hábitats secos como playas, zonas rocosas y/o zonas tropicales. Factores ambientales como temperatura, luz, nutrientes y salinidad del suelo afectan en la entrada de CO_2 neto, productividad, reproducción y sobrevivencia (Nobel, 1993). Las *Opuntias* en general, se consideran CAM obligadas, es decir, no cambian su metabolismo fotosintético aunque haya existido aplicación de agua producto de lluvia o riego (Pimienta, 1990).

Una modificación en las plantas CAM se produce cuando existe sequía severa, ya que los estomas permanecen cerrados día y noche y así evitan la pérdida de agua, siendo el CO_2 producido por la respiración, reciclado a través del proceso CAM (Pimienta, 1990; Berger, *et al*, 1993). Cuando las plantas CAM permanecen regadas, comienzan a absorber CO_2 bien temprano en la mañana y al final de la tarde. Sin embargo, la captura de CO_2 depende de factores ambientales del lugar, tales como el agua presente en suelo, la temperatura del aire, la cual es influenciada por la velocidad del viento, incidencia de la luz y exposición. También son un factor influyente en la toma de CO_2 los macronutrientes, micronutrientes y la salinidad, ya que por ejemplo el exceso de sodio en el suelo inhibe la captura de CO_2 y el crecimiento de la planta (Nobel, 1999).

Un punto interesante a destacar es que, según estudios realizados por Nobel y Harstock en 1984, la tasa máxima de asimilación de CO_2 se realiza cuando en el día existe una temperatura promedio de 25°C y en la noche de 15°C y a medida que aumenta la temperatura en el día y la noche, la tasa de asimilación de CO_2 disminuye, llegando a ser nula a temperaturas de 40°C en el día y de 35°C en la noche (Pimienta, 1990). Esto se produce porque al ser las temperaturas tan altas en la noche, la apertura de los estomas disminuye considerablemente y ocurre un aumento en la respiración, originando una mayor transpiración de la planta. Por este motivo se aconseja que las plantaciones, especialmente aquellas con fines comerciales sean plantadas en sitios que presenten días calientes y noches frías.

Distribución ecológica de la planta

La distribución de esta planta depende de factores como la latitud y altitud, sobre todo en aquellos lugares donde las temperaturas son muy bajas en los meses de invierno. En el hemisferio norte se desarrolla hasta los 40° de latitud y en Chile se cultiva hasta los 36° de latitud sur (López, 1995). La *Opuntia ficus indica*, en Chile, se caracteriza por tener dos temporadas, una entre los meses de febrero a abril y otra entre julio y septiembre. En la primera temporada se produce mayor cantidad de toneladas, de 6 a 9 toneladas por hectárea aproximadamente y en la segunda temporada esta cantidad disminuye aproximadamente entre 2 a 4 toneladas por hectáreas (Barbera, 1999). Se desarrollan en localidades que tienen una precipitación pluvial anual de 80 a 800mm, siendo la región con mayor cantidad de hectáreas plantada, la región metropolitana, la cual presenta una precipitación anual de 300mm. Si fuera menor esa precipitación, generaría problemas en su desarrollo debido a la falta de agua (Pimienta, 1990).

Se puede desarrollar en distintos tipos de suelo, desde suelos livianos y arenosos hasta suelos pedregosos y arcillosos, no obstante se recomienda en suelos sueltos y pedregosos. En suelos calcáreos no se desarrolla bien, ya que reduce su crecimiento; en suelos arenosos tampoco se desarrolla satisfactoriamente, debido al gran drenaje que presenta éste, lo que no le permitiría hacer frente a una situación de sequía prolongada y en suelos arcillosos o muy compactos también tiene problemas para desarrollarse cuando se agrietan o retienen mucha humedad (Pimienta, 1990; Berger, *et al*, 1993). Prefiere los suelos que tengan profundidades entre 20 a 40cm y que posean un buen drenaje y permeabilidad. La humedad debe ser moderada, ya que no tolera suelos con humedad constante o que presenten napas freáticas superficiales. Suelos con exceso de potasio pueden provocar daños en el fruto y desarrollar capas escamosas en paletas y frutos (Berger, *et al*, 1993). El pH del suelo puede ser neutro a ligeramente alcalino, variando entre 5.0 a 7.5 (FUNDACIÓN CHILE, 1992) y los niveles de materia orgánica pueden ser muy bajos.

Su clima adecuado es el templado cálido con temperaturas medias máximas que fluctúan entre los 20 a 30° C, cuya humedad relativa varía entre los 60 a 80%. A medida que va madurando la planta, requiere de temperaturas máximas de 25 a 32° C y temperatura mínima de 6° C (Pimienta, 1990; Berger, *et al*, 1993). Las plantaciones nuevas son muy sensibles a las heladas, en especial en aquellas que son constantes en el tiempo. Sitios donde prevalezcan los vientos constantes o de moderada intensidad son una limitante para plantar tunales, debido a que el levantamiento de polvo inhibe el desarrollo de éstos. También los vientos muy fuertes son limitantes, debido a que las tunas tienen su sistema radical muy superficial, lo cual las hace más inestable para este tipo de vientos, pudiéndose derribar. Y por último, los vientos provenientes de la costa, vientos salinos, son perjudiciales para el desarrollo de las tunas, independientes de su intensidad.

Se puede cultivar desde el nivel del mar hasta los 2.500m, siendo la mayor productividad entre los 800 y 2000m de altura (López, 1995). En Chile se cultiva en el altiplano y al interior de Copiapó, alcanzando alturas entre los 2000 a 3000 m.s.n.m. Su distribución natural es en laderas, valles y terrenos planos donde la incidencia lumínica es importante

para el desarrollo de esta planta, por lo mismo se debe tener cuidado en utilizar sectores que le den sombra a los tunales, ya que ésta disminuye la productividad.

Composición química de *Opuntia ficus indica*

El conocimiento de la composición química de cada parte de esta planta es requerido para la caracterización de ésta en la producción de biogás y el tratamiento a seguir para llegar a un biodigestor. Esta composición varía a medida que crece la planta, ya sea disminuyendo o aumentando la cantidad de un componente establecido.

Cladodio

El cladodio presenta el mayor contenido de agua cuando se encuentra en su etapa juvenil, sin embargo, en el transcurso de su crecimiento el contenido de agua en él varía entre un 88% a un 91%. El contenido de materia seca aumenta con el crecimiento de la planta, teniendo los porcentajes más bajos cuando son cladodios jóvenes, no obstante, a esa edad presentan a la vez los niveles de proteínas más alto. Esta última, junto con la grasa, la fibra gruesa y las cenizas son parte del contenido de materia seca del cladodio, el cual fluctúa entre 9% a 12% en su total. El porcentaje promedio de proteínas presentes es aproximadamente de 4%, el de grasa es de 1,8%, el de fibra gruesa es de 9,2%, aumentando junto con la edad del cladodio y por último el porcentaje promedio de cenizas es aproximadamente 18%, el cual disminuye a medida que va creciendo la planta (Sáenz, 2006b).

Por otro lado, en la composición mineral del cladodio destaca el calcio presente con un 9,5%, aumentando en conjunto con la edad del cladodio. Otros minerales acentuados son el fósforo cuyo porcentaje en el cladodio es de 0,21%, el de sodio es de 0,05% y del potasio es 1% (Pimienta, 1990).

Fruto

El fruto de la tuna tiene una característica muy importante en la época de madurez, ya que una vez cosechado éstos no maduran, debiendo tener cuidado en el tiempo que se procederá a la etapa de cosecha. Si bien no existe un índice de cosecha establecido para estas especies, se deja a criterio de cada agricultor, según las características del fruto, la del lugar y el tiempo de cosecha, ya que la composición química del fruto varía también según la zona del cultivo.

De la totalidad del fruto, el componente agua es el principal porcentaje presente, el cual varía entre 85% a 90%. El porcentaje restante corresponde a otros componentes como

sólidos solubles totales, proteínas, fibra, azúcares, pH, fósforo, hierro, entre otros; los cuales varían según la edad del fruto (Pimienta, 1990).

Los sólidos solubles aumentan a medida que crece el fruto, al igual que la vitamina C, no así la acidez, la cual permanece constante al avanzar la madurez, con un valor de 6,0 aproximadamente. El alto contenido de sólidos solubles y del pH hace que prevalezca el crecimiento de microorganismos en la pulpa. Los contenidos de proteínas varían entre 0,21 a 1,6%, el de grasa es de 0,09 a 0,7%, el de fibra es de 0,02 a 3,15% y finalmente el de ceniza es de 0,4 a 1% (Sáenz, 2006b).

CAPÍTULO II. EL BIOGÁS

La fermentación o digestión anaeróbica es la degradación de la materia orgánica sin presencia de oxígeno, produciendo un compuesto gaseoso llamado biogás y un residuo orgánico, estabilizado, rico en nutrientes y libre de microorganismos patógenos, llamado bioabono. En el medio ambiente se puede encontrar de forma natural en fondos de lagos o en aguas detenidas como los pantanos y humedales. Los residuos provenientes de la poda en las plantaciones de tunas pueden ser utilizados como materias primas para alimentar un biodigestor. Por consiguiente, en este capítulo se conocerán las características necesarias para la producción de biogás, incluyendo la descripción del proceso para la producción de biogás. Además se expondrán tipos de biodigestores que podrían ser utilizados para la producción de biogás con *Opuntia ficus indica*.

Caracterización y composición del biogás

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano (CH₄) y por dióxido de carbono (CO₂) en proporciones que varían según el material orgánico utilizado y de las condiciones en que es procesado. Además contiene en una baja proporción de distintos gases como hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂) y ácido sulfhídrico (H₂S). En el Cuadro 1, se presenta la composición promedio del biogás apropiada para ser una mezcla combustible, junto con los valores promedios de otros gases que pueden o no estar presente.

Cuadro 1. Composición promedio del Biogás.

Compuesto	Porcentaje (%)
Metano (CH ₄)	54 – 70
Anhídrido carbónico (CO ₂)	27 – 45
Hidrógeno (H ₂)	0 – 1

(continúa)

Cuadro 1. (Continuación)

Compuesto	Porcentaje (%)
Nitrógeno (N ₂)	0,5 – 3
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0,1

Fuente: Varnero, 1992.

El gas metano es un gas combustible, incoloro e inodoro. El contenido de éste en el biogás determina el poder calorífico del biogás, el cual puede variar, según su composición, entre 4.700 a 5.500Kcal/Nm³. Estos valores pueden incrementarse si el porcentaje de metano se aumenta, permitiendo de esta manera ser una fuente de energía a utilizar en la cocina, iluminación, maquinaria, entre otras (Varnero, 1992). Este poder calorífico equivale aproximadamente a 6,4KWh/Nm³ y si no fuera por la existencia de ácido sulfhídrico, se podría considerar como un combustible ideal (Anónimo, 2009), ya que la presencia de este último puede provocar daños por corrosión en las instalaciones por contacto con agua o bien permitir la producción de óxidos de azufre, los cuales son contaminantes de la atmósfera. El metano es considerado un poco más liviano que el aire y la temperatura de la llama puede alcanzar los 870°C.

Proceso de digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica tiene como objetivo descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y bioabono. El bioabono es un residuo estabilizado, libre de microorganismos patógenos e inodoro. Puede presentarse de manera sólida o líquida, dependiendo del tipo de carga del digestor (Batch o discontinuas, respectivamente), del material orgánico tratado, del tiempo de fermentación y de las condiciones ambientales del lugar (Varnero, 1992). La fracción sólida, también llamado lodo, está compuesta principalmente por nutrientes orgánicos sin descomponer como la lignina y la fracción líquida, llamada también efluente o sobrenadante, está compuesta por sustancias solubles como el fosfato. Ambos materiales pueden ser utilizados como acondicionador de suelos y/o biofertilizantes. El bioabono, es un material orgánico que se ha estabilizado mediante este proceso, permitiendo disminuir o eliminar semillas de malezas, metabolitos fitotóxicos, microorganismos patógenos, vectores y olores. Constituye un acondicionador o mejorador de propiedades físicas del suelo. Además, dependiendo de la constitución bioquímica de las materias primas utilizadas en el digestor, puede ser utilizado como fertilizante. El Cuadro 2 presenta la composición promedio del bioabono.

Cuadro 2. Composición promedio del bioabono.

Compuesto	Unidad de medida	Contenido
Materia Orgánica	%	45
Nitrógeno total (N)	%	1,8

(continúa)

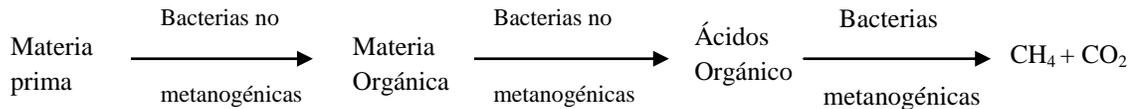
Cuadro 2. (Continuación)

Compuesto	Unidad de medida	Contenido
Fósforo total (P)	%	1,7
Potasio total (K)	%	0,7
Sodio (Na)	meq/l	27
Calcio (Ca)	meq/l	39
Magnesio (Mg)	meq/l	31
Conductividad eléctrica	dS/m	14
pH		7,5
Relación C/N		15:1

Fuente: Varnero, 1992.

Etapas de la digestión anaeróbica

La materia prima para la digestión anaeróbica se compone de material orgánico y de agua, los cuales son introducidos conjuntamente al digestor para así aumentar la fluidez de la materia prima. A continuación se presenta una ecuación donde están representadas las tres principales etapas del proceso de digestión anaeróbica (Baeza, 1995).



Etapa 1. Hidrólisis

En esta etapa los microorganismos facultativos degradan largas cadenas carbonadas de la materia orgánica, convirtiéndolas en cadenas más cortas y simples, es decir, en monómeros solubles. Los polisacáridos son transformados a monosacáridos, las proteínas a péptidos y aminoácidos y finalmente, las grasas son transformadas a ácidos grasos y glicerina. La etapa más crítica del proceso es la hidrólisis celulósica lenta, debido a que las bacterias reducen en serie la cadena polimerizada a azúcares diméricas y finalmente a monomérica (Uribe, 1993).

Etapa 2. Acidificación

Las bacterias acetogénicas, microorganismos facultativos, son las responsables de esta etapa. Ellas convierten el producto formado en la etapa anterior en ácidos de cadena corta y alcoholes. Los principales productos creados son ácido acético, propiónico y láctico. En esta etapa existe liberación de hidrógeno y dióxido de carbono (Uribe, 1993).

Etapa 3. Formación de metano

Los microorganismos encargados de esta etapa son las bacterias metanogénicas, las cuales son estrictamente anaeróbicas. Ellas convierten el producto de la etapa 2 en metano y dióxido de carbono, además de un residuo estabilizado. Existen dos mecanismos conocidos de producción de metano, el primero es a través de una reducción de dióxido de carbono y el segundo también es producto de una reducción de dióxido de carbono, más una oxidación del ácido acético y propiónico (Uribe, 1993).

Los microorganismos participantes en cada etapa presentan ciertas características que ayudan a comprender el equilibrio y funcionamiento del digestor (Cuadro 3). Todas las etapas se realizan simultáneamente dentro del digestor.

Cuadro 3. Características de microorganismos que participan en las etapas.

Etapa Hidrólisis y Acidificación	Etapa Formación de metano
Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno).	Bacterias anaeróbicas estrictas (no pueden vivir con presencia de oxígeno).
Reproducción muy rápida.	Reproducción lenta.
Poco sensible a los cambios de acidez y temperatura.	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura.
Principales metabolitos, ácidos grasos.	Principales productos metano y dióxido de carbono.

Fuente: Hilbert, 2009.

Factores determinantes en la producción de biogás

La digestión anaeróbica es afectada por diversos factores, los cuales determinan el volumen y velocidad de producción de biogás. Estos factores son: materia prima, temperatura, tiempo de retención hidráulica, relación carbono/nitrógeno, pH y material de arranque. Por consiguiente, a continuación se caracterizarán dichos factores enfatizando, principalmente, la manera que afecta cada uno a la generación de biogás.

Materia prima

Las materias primas utilizadas en el proceso de digestión anaeróbica pueden ser de distintas naturaleza, ya sea de residuos provenientes de animales (orina, excremento, etc.), de vegetales (malezas, pajas, residuos provenientes de las podas, etc.), de humanos (excretas, orina y basuras), de la agroindustria, forestales y de cultivos acuáticos (algas). Sin embargo, la calidad y cantidad de gas metano, dependerá de la composición bioquímica del

material a utilizar. Cuando el material esté compuesto por celulosa o lignina, la producción de biogás será menor y más lenta.

La composición bioquímica de un material es posible de analizar en función de los sólidos totales y volátiles y según esto, se toma la decisión del tipo de digestor a utilizar. A modo de ejemplo, un digestor discontinuo o batch trabaja con una cantidad de 50 a 60% de sólidos totales y el resto es agua. En cambio los digestores continuos y semicontinuos solo pueden trabajar con cantidades de sólidos totales entre 8 y 10 %, el resto agua. Si se tiene un material con un porcentaje superior al necesario en un digestor, es necesario diluir con agua.

La efectividad de la reducción por fermentación de los sólidos volátiles y los sólidos totales en el proceso de producción de biogás, dependerá únicamente de la composición de la mezcla.

Temperatura

La temperatura del proceso determina el tipo de microorganismo que estará presente en la producción de biogás, afectando únicamente a la velocidad de producción de biogás, no al rendimiento total de metano, por lo cual se debe asegurar la estabilidad de la temperatura. La temperatura y la producción de biogás tienen una relación directamente proporcional, no así la temperatura con el tiempo de retención hidráulica, el cual disminuye a medida que la temperatura aumenta y por ende necesitará un volumen menor de reactor para digerir una misma cantidad de materia orgánica (Hilbert, 2009).

Para que la producción de biogás sea óptima, se destacan dos rangos de temperaturas:

- **Rango mesófilo:** Su rango de temperatura varía entre 25°C a 40°C, siendo su temperatura óptima 35°C. Se caracteriza porque sus bacterias se reproducen rápidamente y pueden mantenerse activas si no ocurren cambios bruscos de temperatura. Este rango presenta mejores condiciones de manejo (Varnero, 1992).
- **Rango termófilo:** Su temperatura varía entre 50°C a 60°C. Sus microorganismos son muy sensibles a los cambios de temperatura, donde variaciones de 0,5°C los afectan. Es recomendado para aquellas instalaciones industriales, ya que para el sector rural es poco económico, debido a la necesidad de calefacción (Varnero, 1992).

A continuación se muestra la caracterización de estos dos rangos (Cuadro 4). Sin embargo, Uribe (1993) señala que la temperatura óptima para la producción de biogás a partir de cladodios de tunas es de 30°C.

Cuadro 4. Descripción de microorganismos según su temperatura.

Grupo	T°C Mínima	T°C Óptima	T°C Máxima	Comentarios
Mesófilo	10 – 15	30 – 40	Bajo 45	Lo comprenden la mayoría de las bacterias.
Termófilo	45	50 – 85	Sobre 100	Entre todos los termófilos existe una amplia variación en la temperatura óptima y la máxima.

Fuente: Varnero, 2006a

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Se define como el intervalo de tiempo que un residuo permanece dentro de un sistema de tratamiento. En un tratamiento de lodo activado el tiempo mínimo debe ser igual al necesario para la reproducción de los microorganismos adecuados. Para un digestor discontinuo, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga y descarga del sistema. Para un digestor continuo, el tiempo de retención determina el volumen diario de carga (Volumen digestor/TRH) (Varnero, 1992).

Los factores más importantes ligados con el tiempo de retención hidráulica son la temperatura y el tipo de sustrato. Una temperatura superior reduce el TRH requerido, por consiguiente el volumen de reactor será menor para digerir una determinada materia prima. Igualmente, la cantidad de carbono retenido en el sustrato, así como su degradabilidad, establece la demanda requerida de TRH, es decir, a mayor carbono retenido y menor degradabilidad, mayor es el TRH requerido (Hilbert, 2009).

El TRH tiene relación directa con:

- **Producción de biogás:** mayor permanencia del material en el sistema, por ende mayor eficiencia de la degradación orgánica (Uribe, 1993).
- **Acumulación de amonio no ionizado (N-NH₃):** Mayor formación de bicarbonato de amonio (NH₄HCO₃) y mayor descomposición de nitrógeno orgánico (Uribe, 1993).
- **Alcalinidad:** se relaciona con el contenido de CO₂ en el efluente (Uribe, 1993).
- **pH:** capacidad amortiguadora del digestor (Uribe, 1993).
- **Porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio total del efluente:** aumenta su proporción al aumentar la eficiencia de la bioconversión de carbono (Uribe, 1993).

Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

Se define como el cociente entre el carbono total y el nitrógeno total del material orgánico. Su relación óptima es 30 o cercana a ese número, debido a que las bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno. El carbono se describe como la fuente de energía y el nitrógeno como el formador de nuevas células. Una alta relación C/N es más estable que una baja relación, biológicamente hablando (Varnero, 1992; Uribe, 1993). Sin embargo, dependiendo del material orgánico, es la relación óptima aceptada para la producción de biogás.

El exceso de nitrógeno puede llegar a ser tóxico, implicando una inhibición del sistema. Por otro lado, la inexistencia de nitrógeno, impediría la multiplicación de los microorganismos, lo cual limitaría la velocidad de producción de metano (Varnero, 1992; Uribe, 1993).

pH

El pH determina la producción de biogás y el porcentaje de metano que existe en la producción de biogás. Por otro lado, relaciona los ácidos volátiles con la alcalinidad del sistema, indicando la capacidad amortiguadora del digestor. Su rango óptimo para la digestión anaeróbica varía entre 6,5 y 7,5 (Varnero, 1992; Uribe, 1993; IIP, CUBA, 2007). Al tener pH ácidos en el medio, como es el caso de los cladodios de tunas, se disminuye la actividad microbiana y se aumenta los TRH, pudiendo paralizar el proceso, es por esto que se debe mantener una relación que genere una acción amortiguadora en el digestor (Uribe, 1993; Baeza 1995).

Causas que inciden en el descenso del pH son:

Aumento repentino de la carga (Varnero, 1992).

Presencia de elementos tóxicos en el material orgánico (Varnero, 1992).

Cambios bruscos de temperatura (Varnero 1992).

Material de arranque

Se llama así a la inclusión de un determinado material proveniente de otro digestor, rico en bacterias metanogénicas. Su función principal es adelantar y aumentar la producción de biogás. Es importante para los digestores discontinuos, ya que deben ser puesto en funcionamiento permanentemente (Hilbert, 2009).

Biodigestores

Biodigestor es aquel depósito cerrado en el cual se introducirán los materiales orgánicos mezclados con agua para producir biogás. Está formado por un tanque hermético donde ocurre la fermentación y por un depósito donde se almacena el biogás producido, el cual puede ser una campana rígida o flotante. Según las características del residuo a tratar (cantidad y periodicidad), características de la zona y disponibilidad de agua principalmente, se toma la decisión del diseño del digestor que le es más conveniente (García de Cortázar y Varnero, 1999; Varnero, 2006b). Para las zonas áridas, donde la disponibilidad de agua es mínima y en consecuencia la cantidad de materia prima es precaria, se aconseja utilizar biodigestores estacionarios (Varnero, 2006b).

Para que un biodigestor tenga una correcta utilización deberá cumplir con un mínimo de características, tales como, ser hermético, impidiendo de esta manera la salida de gas producido y la incorporación de aire no deseado. Debe estar térmicamente aislado para evitar los fuertes cambios de temperatura y debe poseer una válvula de seguridad. Además, debe tener fácil acceso para su mantenimiento, contar con los medios para realizar las cargas y descargas del sistema y proveer de herramienta para destrozarse las natas que se forman en el biodigestor (Varnero, 1992).

Clasificación de los biodigestores

La clasificación más común para diferenciar los tipos de biodigestores es mediante su modo de operación, según su utilización y complejidad. Se distinguen los siguientes tipos: Discontinuos o régimen estacionario, semi continuos, horizontales y continuos.

Discontinuos o Régimen estacionario

Se caracterizan por ser varios contenedores herméticos donde una vez cargados no permite realizar ninguna otra carga hasta que se acabe el proceso de producción de biogás, es decir, finaliza la fermentación metanogénica (Pearson, 2009). Son varios depósitos con el fin de poseer siempre uno de ellos en carga o descarga, mientras los demás realizan la producción de biogás. Presentan una salida de gas, la cual está conectada a un gasómetro flotante donde se almacena el biogás. Se entiende por gasómetro cuando la campana de almacenamiento de biogás está separada del digestor (Varnero, 1992).

Este tipo de digestores (Figura 3) es ideal para aquellas materias primas que son difíciles de digerir o son poco diluidas. También son ideales para aquellos lugares donde la materia orgánica no está disponible continuamente, como es el caso de los rastrojos (Varnero, 1992; Pearson, 2009). Su uso puede ser tanto en grandes como pequeñas explotaciones

Los diseños más conocidos de digestores semi continuos son:

Modelo Chino (Figura 4): su objetivo principal es maximizar el ahorro de material, asumiendo altos costos en su construcción (Pearson, 2009). En el inicio del proceso se carga con material orgánico mezclado con un inóculo proveniente de otro digestor. Luego se continúa cargando diariamente con los residuos disponibles en la zona (Varnero, 1992; Pearson, 2009). Este modelo consiste en una estructura cerrada con cámaras de carga y descarga construida de ladrillo o cemento. No posee gasómetro, por ende su almacenaje es dentro del sistema. Una a dos veces al año se vacía completamente para su mantenimiento. Este modelo es excelente en la producción de bioabono, no así en la producción de biogás ya que los tiempos de retención son muy largos (Varnero, 1992). Su vida útil alcanza a los 15 años.

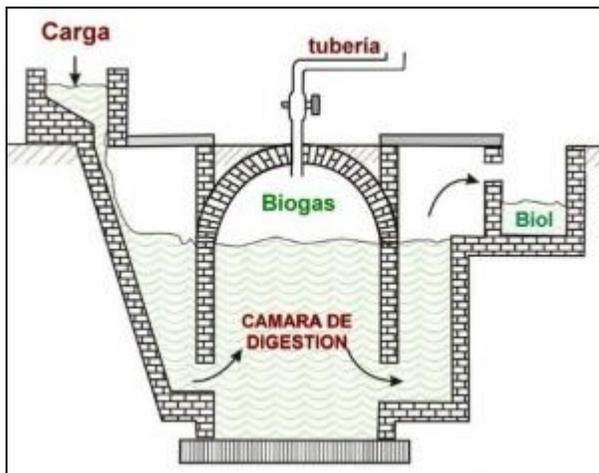


Figura 4. Biodigestor modelo chino.

Modelo Indio (Figura 5): También llamado domo flotante. Está formado por una cámara de digestión cilíndrica en la cual flota una campana gasométrica. A medida que el biogás ejerce presión, la campana va subiendo, almacenando el gas producido (IIP, CUBA, 2007; Hilbert, 2009). Estos biodigestores son enterrados y verticales, se cargan por gravedad una o dos veces por día. Su volumen de carga depende del tiempo de retención y produce una cantidad constante de biogás, diariamente. El volumen de salida del efluente es equivalente al volumen de carga y se realiza por rebalse. Su producción de biogás es eficiente y tiene como ventaja que su gasómetro está dentro del mismo sistema (Varnero, 1992; Hilbert, 2009; Pearson 2009). Su funcionamiento es sencillo, ideal para zonas rurales.

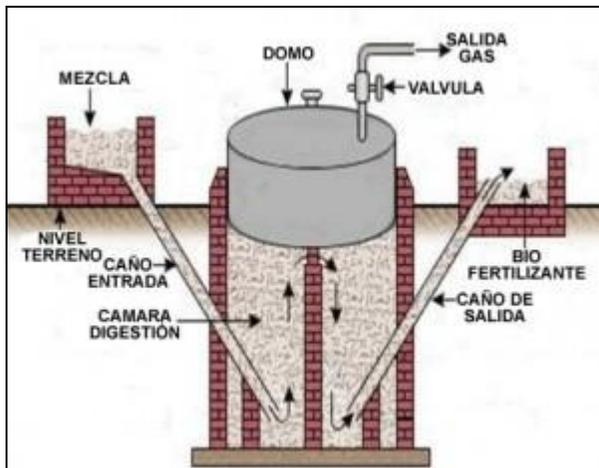


Figura 5. Biodigestor modelo indio.

Biodigestores Horizontales

Este tipo de biodigestores (Figura 6) son alargados, poco profundos y se construyen enterrados. En sus extremos posee las cámaras de carga y descargas respectivamente, evitando que se mezclen ambos fluidos, debido a su forma alargada (Varnero, 1992; Pearson 2009). Esta estructura permite que sea útil para residuos que necesiten un tratamiento prolongado. Es de bajo costo, ideal para zonas rurales. Su vida útil puede llegar a 5 años (Pearson, 2009). Se recomienda que sea utilizado cuando se trabaje con volúmenes mayores a 15m^3 (Varnero, 1992).

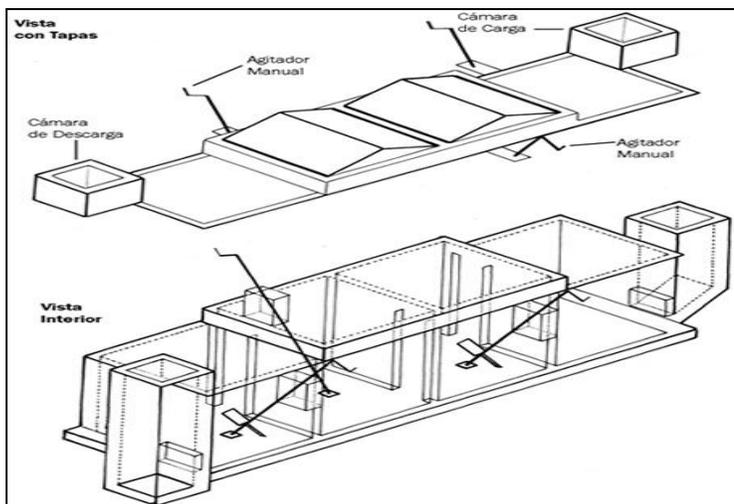


Figura 6. Biodigestor horizontal.

Régimen continúo

En este tipo de biodigestores la carga de material se hace frecuentemente. Se carga y recarga alrededor del 5% al 15% del volumen total del digestor. La concentración de sólidos es baja, alcanzado los 2% a 6% del volumen total. La producción de biogás es constante y de gran cantidad (Varnero, 1992; Varnero 2006b). Son utilizados principalmente en tratamiento de aguas negras, residuos de la agroindustria y áreas urbanas.

CAPÍTULO III. POTENCIAL DE BIOGÁS EN PLANTACIONES DE *OPUNTIA FICUS INDICA* EN EL NORTE CHICO

Las características de *Opuntia ficus indica* señalan que pueden ser cultivadas en diferentes zonas, con distintos climas y tipos de suelo. En este capítulo se dará a conocer las características agroclimatológicas del norte chico con el fin de hacer una representación general del sitio de estudio. Luego, se describirá los tipos de plantaciones que se pueden realizar para sacar un mayor provecho a la producción de biogás y finalmente, se estimará el potencial de biogás en plantaciones de tunas destinadas para la agroindustria y para aquellas plantaciones destinadas completamente para la producción de bioenergía.

Características edáficas y climáticas del norte chico de Chile

Caracterización de los suelos del norte chico de Chile

En Chile, el suelo es un recurso que se encuentra bastante deteriorado debido principalmente a la mala utilización que se tiene de éste. El 78% de los suelos productivos en Chile presentan algún grado de erosión y enfrentan procesos de desertificación (Ruiz, 2006). El norte chico se caracteriza por poseer suelos de texturas gruesas con gravas, con gran acumulación de sales, implicando suelos áridos y semiáridos, los cuales abarcan el 40% de la superficie del territorio continental de Chile.

Los valles presentes en el norte chico (Copiapó, Huasco, Elquí, Limarí y Choapa) manifiestan suelos muy heterogéneos en relación a las texturas, profundidad, estratificación, pendientes complejas y series de suelo de áreas no extensas; provocando gran variabilidad en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Sierra, 2009). Principalmente son suelos de texturas arenosas, con limitaciones de salinidad, compactación y sodicidad (Doussolin y Quezada, 2006).

Uno de los principales problemas que tienen los suelos del norte chico es la acumulación de sales, del cual derivan otros tipos de problemas como la escasa permeabilidad y baja velocidad de infiltración. Existen suelos salinos, sódicos y salinos sódicos. Los primeros son aquellos que concentran sales mayores al 0,15%, con pH menor a 8,5, imposibilitando la vida normal de las plantas, debido a que el exceso de sales en los tejidos de las plantas puede generar lesiones en ellas. Los segundos presentan más del 15% de sodio intercambiable, pH mayor a 8,5, reduciendo la permeabilidad y el movimiento del agua. Su exceso puede causar problemas en el medio ambiente y en la agricultura debido a los efectos negativos en la estabilidad estructural del suelo y en la conductividad eléctrica. Igualmente, puede causar daños en las propiedades físico-químicas del suelo, disminuir la infiltración y las condiciones hidráulicas del suelo. Finalmente, los terceros, son una combinación de ambas características. Para estos tres tipos de suelos es necesario desarrollar drenaje para mantener condiciones favorables de humedad en el crecimiento de los cultivos (Doussolin y Quezada, 2006), así como también la incorporación de materia orgánica, ya que en estos tipos de suelo es escasa.

Una de las ventajas de estos suelos para las plantaciones de tunas es que se adapta muy bien a condiciones extremas, los suelos a utilizar no compiten con otros cultivos, no necesitan grandes cantidades de agua para el riego y con la aplicación de prácticas adecuadas de manejo de agua, suelo y de la plantación, se disminuye los riesgos de la sustentabilidad de la agricultura de riego. Además, se cultiva sin limitaciones en texturas finas, francas y gruesas; en texturas muy finas la limitación es leve, por lo tanto es posible de cultivar en el norte chico. En el caso de la pedregosidad del terreno, las tunas resisten a terrenos no pedregosos (< 15% piedras) a extremadamente pedregoso (> 60% piedras). En el caso del drenaje, las limitaciones son mínimas ya que se cultiva muy bien en lugares sin nivel freático, con nivel freático a 110cm y a 50cm. Una última ventaja es la pendiente ya que se puede plantar en zonas con 20% de pendiente (CIREN, 1989).

Las desventajas que presentan estos tipos de suelos para las plantaciones de tunas es que son suelos pobres en nutrientes y en materia orgánica. Asimismo, producto de la precaria cantidad de lluvias durante el año y el origen geológico que tienen, presentan problemas de salinidad, sodicidad y otros elementos como por ejemplo el boro, que en exceso puede llegar a ser tóxico. La salinidad es un factor crítico para la tuna debido a su baja tolerancia, además que disminuye la productividad y el rendimiento de los cultivos y a pH muy ácidos (5,0) o muy básicos (9,8) es posible provocar problemas en la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Pero todas estas desventajas nombradas anteriormente se pueden revertir a través de buenas prácticas agrícolas.

Un buen manejo del suelo se logra primero a través de la preparación del suelo que permite mejorar la permeabilidad del suelo, rompe costras superficiales y mejora la infiltración del agua. Se recomienda realizar actividades como subsolados, aradura profunda, modificaciones en perfil y eliminación de sales del suelo. Las dos primeras se deben hacer con precaución, ya que un error puede provocar el efecto contrario como por ejemplo, reducir el suministro de agua. En suelos sódicos se debe evitar realizar estas actividades con suelo húmedo y con maquinaria pesada. En suelos salinos se recomienda realizar

aradura profunda ya que mejora condiciones físicas de capas permeables, aumenta retención de agua y ayuda al control de salinización cuando se usan aguas salinas de riego. Una segunda actividad es el aporte de la materia orgánica al suelo, ya que ésta mejora la permeabilidad del suelo, libera CO₂ y otros ácidos durante su descomposición, permitiendo disminuir el pH del suelo. Para aumentar el rendimiento del cultivo se pueden incorporar nutrientes mediante fertilizantes naturales y/o artificiales los cuales mejoran la estructura del suelo, la actividad biológica del suelo y la retención de la humedad. Para suelos sódicos se aplican enmiendas que provocan el intercambio catiónico entre el calcio y el sodio. El tipo de enmienda dependerá del problema específico del suelo. Un ejemplo de enmienda es el yeso que se utiliza en suelos arcillosos principalmente, mejorando la permeabilidad del suelo (Quezada, 2006).

En relación con el riego a utilizar en estos tipos de suelos, se recomienda para suelos salinos aumentar la cantidad de agua de riego, ya que disminuye la concentración de sales y aplicar con mayor frecuencia y en menor dosis. Cuando llueve es mejor regar con el fin de sacar las sales acumuladas en las raíces, y así mantener la concentración de sales. Para disminuir las sales del suelo se debe tomar en cuenta la textura de éste, ya que en suelos arcillosos se requiere mayor cantidad de agua que en texturas arenosas. El riego por goteo permite que se use agua con gran cantidad de sales, pero es necesario que cada cierto tiempo éste se lave. Para que las sales presentes en la profundidad del suelo no suban a la superficie se recomienda realizar un colchón antievaporante en la superficie, para así lograr un crecimiento de raíces adecuado y a la vez mejorar las condiciones hidráulicas del suelo. Los drenajes subsuperficiales aumentan el flujo a través del suelo y los que están a una mayor profundidad remueven mayor cantidad de sales. Para suelo con texturas gruesas se le agrega material fino con el fin de incrementar el almacenamiento de agua a largo plazo (Quezada, 2006).

Descripción agroclimática del norte chico de Chile

Las zonas agroclimáticas en Chile son determinantes para la producción de sistemas de cultivos, ya que éstas son analizadas a través del requerimiento climático de los cultivos, antecedentes agronómicos y del clima de la zona en estudio. En el norte chico se puede diferenciar tres sectores, el sector costero, sector de valles transversales y el sector cordillerano. El primero se caracteriza por tener un clima homogéneo entre invierno y verano, siendo las temperaturas de invierno mucho más benignas que los otros dos sectores, esto principalmente por la presencia del mar, el cual genera mayor estabilidad térmica. Es un sector libre de heladas, con pocas precipitaciones. El sector de valles transversales presenta temperaturas que aumentan a medida que se avanza más al interior, generando un mayor déficit hídrico debido a la acentuación de la oscilación térmica entre el día y la noche. Finalmente, el sector cordillerano, presenta un clima que es dominado por las alturas, presenta mayor precipitación y mayor oscilación térmica que los otros sectores.

La IV Región, en términos generales, presenta un clima semiárido, cuyas precipitaciones son irregulares y el déficit hídrico es constante. La temperatura media en el período cálido y el período frío varía en 5°C en la costa y 7,5°C en el interior. El sector costero se encuentra libre de heladas durante todo el año y sus temperaturas media durante el periodo cálido, acumulaciones térmicas y horas de frío son inferiores que el interior de la región. Los inviernos son más benignos, con menores precipitaciones que en el interior. El sector de los valles presenta un clima con mayores oscilaciones térmicas, disminución de la humedad relativa del aire, mayor ocurrencia de heladas, aumento de las horas de frío y el déficit hídrico aumenta porque existe mayor evapotranspiración potencial. Finalmente, el sector cordillerano de la región presenta un clima dominado por la altura, implicando mayor oscilación térmica y mayor déficit hídrico por aumento de la evapotranspiración (CIREN, 1990).

Para el análisis, los climas presentes en el norte chico son: Desierto subtropical marino, Desierto de altura, Semiárido patagónico, Mediterráneo subtropical semiárido, Mediterráneo marino y Tundra. Para la identificación geográfica de los climas, se le asignó un nombre relacionado con la zona o ciudad más característica, lo que se definió como agroclima. La Región de Atacama presenta 5 agroclimas: Putre, Potrerillos, Refresco, Copiapó y Caldera. La Región de Coquimbo presenta 10 agroclimas: Pangué, La Serena, Ovalle, Cordillerano central, Potrerillos, Refresco, Copiapó, Caldera, Los Vilos y La Ligua (Cuadro 5). A continuación se describirá cada uno de éstos agroclimas con su respectivo clima (Novoa y Villaseca, 1989).

Clima Desierto Subtropical Marino

Este clima se caracteriza por presentar heladas esporádicas, las cuales son muy ligeras. Presenta inviernos con temperaturas medias mínimas entre -2,5°C a 7°C y temperaturas máximas medias entre 10°C a 21°C. En verano presenta temperaturas máximas media mayor a 21°C, lo cual se refleja en un significativo nivel de sequedad durante todo el año. Los agroclimas presentes en este clima son: Caldera y Copiapó.

Agroclima Caldera: El régimen térmico se caracteriza por una temperatura media anual de 16,5°C, con una máxima media del mes más cálido (febrero) de 23,9°C y mínima media del mes más frío (julio) de 9,9°C. Las lluvias alcanzan 26,9 mm anual, entre los meses de mayo a agosto. El período libre de helada es durante 12 meses, son muy excepcionales. No presenta limitaciones para el crecimiento de plantas, pero no es posible cultivar sin riego. Tampoco es apta para frutales con requerimiento de frío, pero sí para cultivos tradicionales extensivos.

Agroclima Copiapó: Presenta un régimen térmico con temperatura media anual de 18°C, con una máxima media del mes más cálido (febrero) de 30,1°C y con una mínima media del mes más frío (julio) de 6,5°C. Las precipitaciones ocurren entre abril a octubre y corresponden a 22mm anual. Presenta estación seca durante 12 meses. No es posible de cultivar sin riego. Este agroclima es favorable para el cultivo de frutales y vides.

Clima Desierto de Altura

Se caracteriza por presentar inviernos que pueden variar de templado a tropical, con heladas más intensas. La estación sin heladas es menor a un mes. En verano presenta temperaturas máximas mayores a 10°C en los meses más cálidos. De este clima, el norte chico presenta los agroclimas Refresco, Potrerillos y Putre.

Agroclima Refresco: Se caracteriza por tener un régimen térmico con temperatura media anual de 17,7°C; con una temperatura máxima media del mes más cálido (enero) de 28,4°C y una mínima media del mes más frío (junio) de 5,5°C. Las lluvias durante el año alcanzan 12mm entre los meses mayo a julio. Presenta estación seca durante 12 meses, por lo que no se recomienda para frutales con necesidad de frío ni con necesidad de riego.

Agroclima Potrerillos: El régimen térmico presente en este agroclima se destaca por tener una temperatura media anual de 11,9°C, temperatura máxima media del mes más cálido (enero y febrero) de 18,4°C y una mínima media del mes más frío (junio) de 4,9°C. Presenta entre dos meses y medio y cuatro meses y medio de período sin heladas. Las lluvias alcanzan una media de 44,1mm entre los meses mayo a agosto.

Agroclima Putre: Se caracteriza por tener temperatura mínima media en el mes de invierno de -2,9°C y una máxima media del mes más frío entre 0°C a 5°C. La temperatura máxima media del mes más cálido es mayor a 10°C. La estación sin helada tiene una duración menor a un mes. Las precipitaciones alcanzan 256,6mm anual, de los cuales 196,3mm caen durante los meses de enero y febrero.

Clima Semiárido Patagónico

Este clima ocupa gran parte de la precordillera de la IV Región de Coquimbo. Las temperaturas mínimas medias del mes más frío pueden variar desde -29°C a -10°C y las máximas medias varían entre 0°C a 5°C. En verano, la temperatura máxima media del mes más cálido permuta desde 10°C a 21°C. Los cultivos de cereales son aptos con riego y las zonas sin riego se pueden utilizar para criar ovejas o cabras. El agroclima del norte chico presente en este clima es Pangué.

Agroclima Pangué: Presenta un régimen térmico con temperatura máxima media del mes más cálido de 18°C y con una mínima media del mes más frío de 1°C a 2°C. La temperatura máxima media del mes más frío es 12°C. Período libre de heladas es de 4 meses entre los meses de noviembre a febrero. Las precipitaciones anuales alcanzan entre 135mm y 170mm en los meses de invierno. El principal uso del suelo es para la ganadería caprina, ya que los cultivos son aptos con riego.

Clima Mediterráneo Marino

Este clima se caracteriza por tener inviernos suaves, con una estación libre de heladas promedio de 4 meses y medio. Las temperaturas máximas media del mes más frío son de 10°C a 21°C y las mínimas media son entre -2,5°C a 7°C. Las temperaturas máximas del mes más cálido son entre 10° a 21°C. Presenta una estación seca de 5 meses. El agroclima del norte chico que está presente en este clima es Los Vilos.

Agroclima Los Vilos: Presenta una temperatura media anual de 13,9°C, una temperatura máxima media del mes más cálido (febrero) de 21,2°C y una temperatura mínima media del mes más frío (julio) de 7,6°C. Período libre de heladas es de 12 meses. Las lluvias alcanzan 209mm anual, de los cuales 75mm caen en el mes de julio. La estación seca es de 7 meses entre los meses de octubre a abril. Los vientos es una limitante para los cultivos sensibles.

Clima Mediterráneo Subtropical Semiárido

Este clima presenta temperaturas mínimas del mes más frío mayor a -4°C y la máxima media es mayor a 10°C. La temperatura máxima media del mes más frío es mayor a 21°C. Presenta un régimen hídrico durante la estación de primavera a la de otoño, o bien durante todo el año. Los agroclimas del norte chico presentes en este clima son Ovalle, La Ligua y La Serena.

Agroclima Ovalle: El régimen térmico presenta una temperatura media anual de 16,6°C, una temperatura máxima media del mes más cálido (enero) de 28,5°C y una mínima media del mes más frío de 6,3°C. Período libre de heladas es de 10 meses entre septiembre y julio. Las lluvias alcanzan 125,7mm, siendo junio el mes más lluvioso con 35,7mm. Es por esto que no se generan lluvias de lavados. La estación seca es de 10 meses entre agosto y mayo. Los cultivos son aptos con riego y con bajo requerimiento de frío.

Agroclima La Ligua: Se caracteriza por tener una temperatura media anual de 14,4°C, una temperatura máxima media del mes más cálido (febrero) de 26,5°C y una mínima media del mes más frío (julio) de 4,5°C. Las lluvias alcanzan a 340mm, siendo en junio el mes más lluvioso con 75mm. Existe lluvia de lavado. Estación seca dura 6 meses entre noviembre y abril. Los cultivos son posibles con riego.

Agroclima La Serena: Presenta un régimen térmico con una temperatura media anual de 13,5°C, una temperatura máxima media del mes más cálido (enero) de 21°C y una mínima media del mes más frío (julio) de 7°C. El período libre de heladas es de 12 meses entre los meses de septiembre a agosto. Las precipitaciones rodean los 104,4mm, de los cuales 25,9mm caen en el mes más lluvioso, junio. No presenta lluvia de lavados. La estación seca es de 9 meses. Los cultivos son posibles con riego.

Clima Tundra

Es parte del clima polar alpino, el cual corresponde a toda la alta montaña de la Cordillera de los Andes. Este clima presenta en invierno temperaturas mínimas media es mayor a los -29°C y en verano la temperatura máxima media de los meses más cálidos es mayor a 10°C . El agroclima presente en este clima es Cordillera Central.

Agroclima Cordillera Central: Presenta inviernos fríos con temperaturas mínimas media que van desde los -29°C a los -10°C y una máxima media mayor a 0°C . En el verano se alcanzan temperaturas máximas medias mayores a 6°C . Este agroclima no es apto para la agricultura.

Cuadro 5. Caracterización agroclimática del norte chico de Chile.

Agroclima	Temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura máxima media mes cálido ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura mínima media mes frío ($^{\circ}\text{C}$)	Precipitaciones (mm)
Caldera	16,5	(feb) 23,9	(jul) 9,9	26,9
Copiapó	18	(feb) 30,1	(jul) 6,5	22
Refresco	17,7	(ene) 28,4	(jun) 5,5	12
Potrerillos	11,9	(ene y feb) 18,4	(jun) 4,9	44,1
Putre	*n.i	10	-2,9	256,6
Pangue	*n.i	18	1 - 2	135 - 170
Los Vilos	13,9	(feb) 21,2	(jul) 7,6	209
Ovalle	16,6	(ene) 28,5	(jun) 6,3	125,7
La Ligua	14,4	(feb) 26,5	(jul) 4,5	340
La Serena	13,5	(ene) 21	(jul) 7	104,4
Cordillera Central	*n.i.	> 6	-29 - -10	*n.i.

*n.i.: no hay información.

El cultivo de las tunas requiere una temperatura mínima de crecimiento de 10°C y un rango óptimo de temperatura para el crecimiento entre 22°C a 30°C . La temperatura crítica, ya sea por daño a las heladas o por otros factores, es de -2°C , clasificándola como medianamente resistente a las heladas. Para su crecimiento no requiere de horas de frío ($< 7^{\circ}\text{C}$) (CIREN, 1989). Según el Cuadro 5, es posible deducir que la gran mayoría de los agroclimas presentes, cumplen con las características agroclimáticas requeridas por las tunas. Se excluye el agroclima cordillera central, ya que presenta temperaturas muy extremas en el invierno, lo cual dañaría a las plantaciones.

Morales, *et al* (2006), confirman dicha información a través de un estudio realizado a la IV Región de Coquimbo, el cual indica que las temperaturas más altas se encuentran en los valles y las más bajas, en la cordillera. También indican que las precipitaciones promedio se encuentran en los valles, donde la mayor cantidad de precipitación está en la zona sur-este de la región y la zona con menor precipitación está en la zona norte de la región. La

radiación solar aumenta de oeste a este, siendo las zonas bajas y planas las que manifiestan menor radiación solar.

Según las 9 estaciones meteorológicas presentes en la Región de Atacama, las temperaturas mínimas mensuales en el año 2009 variaron entre 1,1 y 10,4°C y las temperaturas máximas mensuales oscilaron entre 28,6 a 33,7°C (Figura 7). Para la Región de Coquimbo, las 13 estaciones meteorológicas indicaron que las temperaturas mínimas mensuales del año 2009 oscilaron entre 0,9 y 10,5°C y las temperaturas máximas mensuales variaron entre 26,4 y 36,7°C (Figura 8). Las correspondientes estaciones meteorológicas también señalaron que las precipitaciones acumuladas mensuales para el año 2009 variaron entre 1,8 y 9,1mm en la Región de Atacama (Figura 9) y 2,3 a 99,2mm en la Región de Coquimbo (Figura 10).

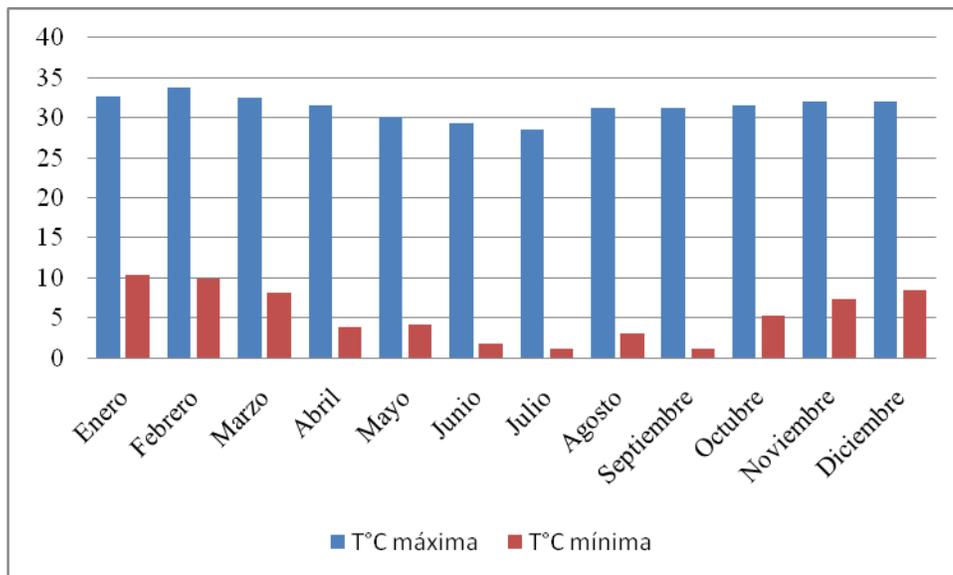


Figura 7. Temperaturas máximas y mínimas mensuales (°C) Región de Atacama 2009 FIA, 2010

En el gráfico anterior se puede apreciar que los meses con menor temperaturas en el año 2009 fueron julio y septiembre y el con mayor temperatura es el mes de febrero. Sin embargo las máximas temperaturas son constantes a lo largo del año.

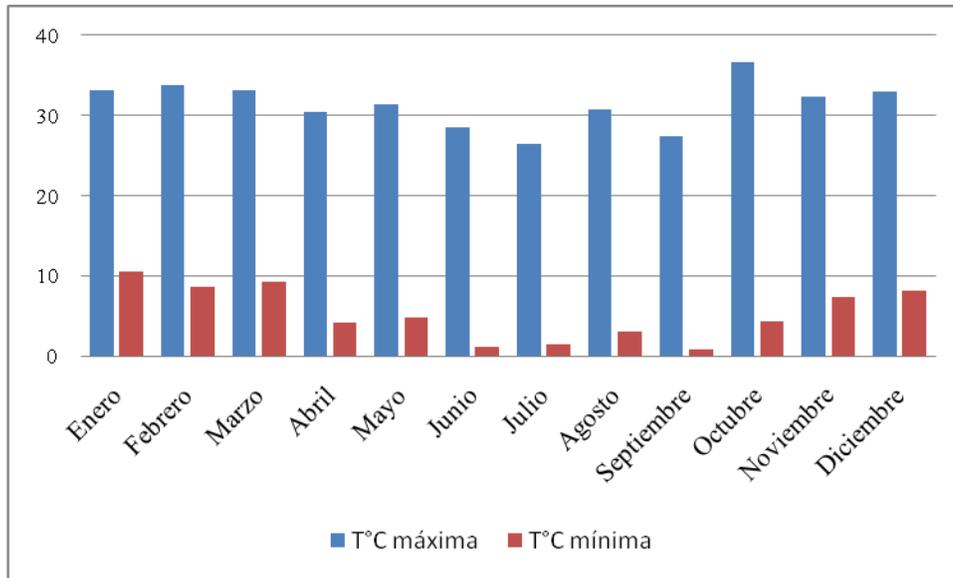


Figura 8. Temperaturas máximas y mínimas mensuales (°C) Región de Coquimbo 2009 FIA, 2010

Este gráfico (Figura 8) indica que el mes con temperatura más baja fue septiembre y el mes con las temperaturas más altas fue octubre. Si bien los gráficos anteriores presentan temperaturas extremas, esto se puede deber a que las estaciones meteorológicas se encuentra en el interior de la región, implicando un cierto margen de error. Por ejemplo, la costa de la IV Región no debería presentar grandes oscilaciones en temperaturas, ya que el mar es un agente estabilizador.

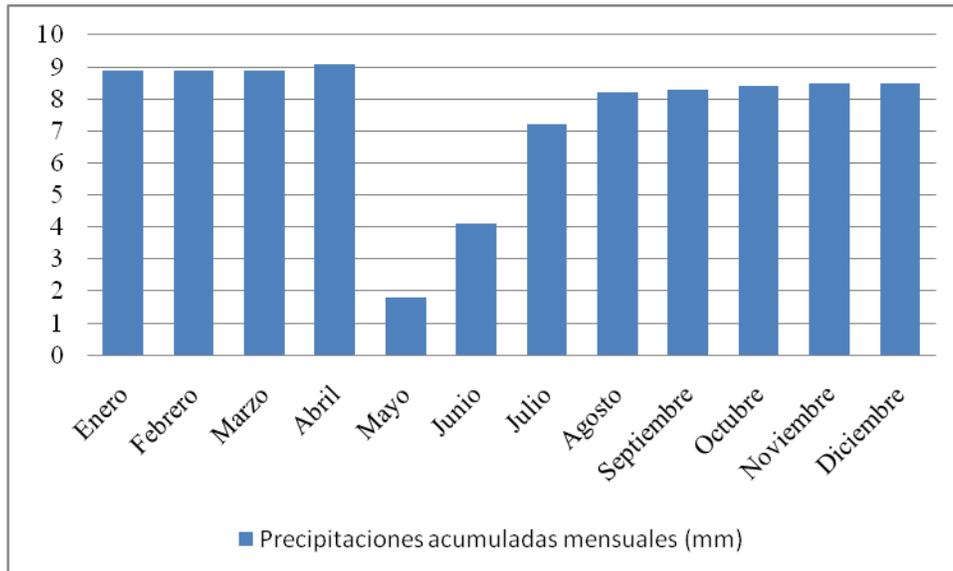


Figura 9. Precipitaciones acumuladas mensuales (mm) Región de Atacama año 2009. FIA, 2010.

La figura 9 representa las precipitaciones acumuladas en la Región de Atacama, explicando que los meses más lluviosos oscilan entre enero y abril y el mes menos lluvioso es mayo.

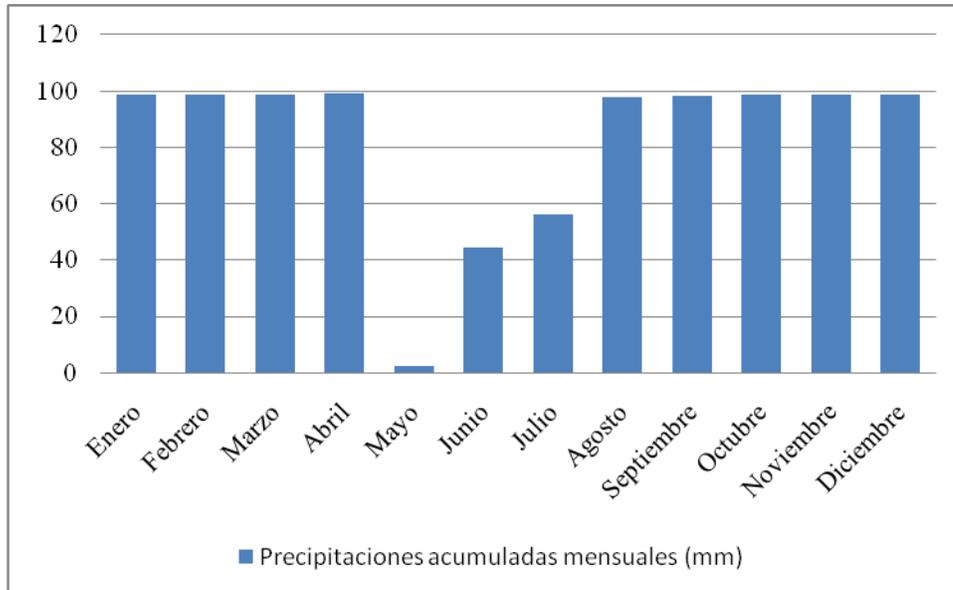


Figura 10. Precipitaciones acumuladas mensuales (mm) Región de Coquimbo año 2009. FIA, 2010.

El gráfico anterior (Figura 10) indica que el mes menos lluvioso en la IV Región en el año 2009 fue el mes de mayo al igual que en la III Región, sin embargo los meses de lluvias aumentan, oscilando entre agosto a abril. La Región de Coquimbo presentó mayor precipitación que la III Región en el año 2009, ya sea como en cantidad de meses como en cantidad de precipitación.

Plantaciones de tunas

Propagación

Para iniciar una plantación de tunas en el norte chico es necesario primero seleccionar la paleta o la planta para su propagación. Existen dos formas de realizarlo, la primera es plantar directamente al terreno definitivo los cladodios de tuna y la segunda es a través de un vivero o huerto de reconocida productividad, sanidad y buen manejo, teniendo una mayor seguridad de que los cladodios estén en buen estado. Esta selección puede ser a través de trozos de cladodios, injertos, cultivo in vitro o por paletas.

Para el método de cultivo por paletas, el material a propagar debe cumplir con ciertas características como por ejemplo que sean cladodios de uno o dos años de edad, cosechados a principio de la primavera, específicamente antes que la planta haya dado el brote. La

paleta debe estar turgente y sana. Aquellas plantas con varias paletas no van a ayudar a aumentar la producción e incluso puede que el enraizamiento sea más lento que el de una sola paleta (Vega, 2010). Con este sistema, se puede obtener frutos al segundo año de plantación, una vez que hayan pasado las lluvias (noviembre en la zona central) (Sudzuki, *et al*, 1993).

El corte de la paleta debe hacerse con cuidado, ya que un mínimo desgarro puede llegar a podrir la paleta. Una vez realizado este procedimiento, se colocan todas las pencas madres cortadas a la sombra o semi sombra por 15 días, en una superficie plana en posición horizontal una sobre otra para permitir la deshidratación de la herida del corte, si no la herida puede generar pudriciones. También se recomienda voltearlas para evitar el curvamiento de las paletas que están expuestas al sol (Ochoa, 2009; Ruiz, *et al*, 2008; Ríos y Quintana, 2004; Pimienta, 1990). El lugar de acopio de las pencas debe estar ventilado, evitando la humedad y en consecuencia, las pudriciones (Vega, 2010).

Otra forma de propagación es en maceta (Figura 11), la cual consiste en producir paletas de alta densidad que posteriormente se llevarán a terreno. Para ese método es necesario preparar un sustrato con buena capacidad de retención de agua y a la vez que evite la concentración de ésta, permitiendo aireación. Igualmente la maceta se debe encontrar desinfectada. Luego se planta en la maceta de forma vertical y se mantiene plantado hasta que crecen 4 a 8 paletas hijas, de las cuales sólo se plantan 4-5 paletas para una mejor productividad y se podarán aquellas que sean más pequeñas o estén ubicadas en zonas donde le es perjudicial (Vega, 2010).



Figura 11. Propagación por macetas.

La fecha de plantación depende principalmente de la temperatura y disponibilidad de agua, no de un mes determinado. Las limitaciones de plantación son: bajas temperaturas, altas

temperaturas sin riego suficiente después de la plantación y en período de lluvias (Sudsuki, *et al*, 1993).

Sistemas de plantación

Antes de iniciar la plantación es necesario preparar el terreno, donde deben ser eliminadas todo tipo de maleza y remover el suelo para que éste quede nivelado y fertilizar si es necesario. Asimismo, otro factor importante a tomar en cuenta es el drenaje, por lo cual se debe verificar si existe un buen drenaje o bien preparar el terreno (Berger, 2006; Inglese, 1999).

La elección de un sistema de plantación depende de diferentes factores como el tamaño del campo agrícola, condiciones ambientales, presencia de plagas, objetivo del campo a plantar y sistema de riego. Existen dos sistemas más comunes de plantación de tunas: sistema tradicional y sistema de microtúneles o intensivo. El primero consiste en cultivar tunas en hileras con una separación de 1m a 1,5m entre hileras y una separación entre pencas de 0,25m a 0,5m a una altura de la planta de 1m a 1,5m. Con este sistema se alcanzan densidades entre 15.000 a 40.000 plantas por hectáreas, donde las densidades más comunes es un promedio entre ambas (Berger, 2006). El sistema de microtúneles se destaca por el aumento de producción en los meses de invierno del nopalito. Éste consiste en camas de 1,2m a 2m de ancho y entre camas 1m a 1,5m; con un largo entre 40m a 47m. Las paletas se plantan una al lado de la otra con una separación de 30cm y las hileras tienen una distancia de 20 a 30cm entre sí. Se coloca un plástico sobre la cama durante invierno disminuyendo la pérdida de nopalitos por heladas. Este sistema es recomendable para zonas con suelos con buena fertilidad natural y al menos 30cm de profundidad. La densidad de plantación que alcanza este sistema es entre 120.000 a 160.000 plantas por hectárea (Berger, 2006; Ríos y Quintana, 2004). Actualmente, se está empleando también el sistema de camellones, donde se facilita la entrada de la luz, cosecha, limpieza de maleza y raleo de flores y de pencas. Además facilita que el agua salga gravitacionalmente de la zona de las raíces. El sistema tradicional llega alcanzar rendimientos de 30 a 80 ton/ha en condiciones óptimas, en cambio el sistema intensivo de microtúneles logra un rendimiento de 179 ton/ha a 263 ton/ha en condiciones óptimas (Berger, 2006).

En Chile para huertos con fines comerciales, las distancias de plantación varía entre 2 y 4 metros entre hileras y entre plantas varía entre 1 a 2m plantando una densidad aproximada por hectárea entre 2.000 a 5.000 plantas (López, 1995). El sistema de hileras es recomendable para terrenos con pendientes menores a 15% y el sistema de rectángulo o cuadrado es recomendable para terrenos planos, cuyos distanciamiento varían de 2x2 a 4x4 en cuadrado y 2x3 a 3x4 en rectángulo, donde la densidad de plantas va desde 825 a 2.500 por hectárea (López, 1995). Sin embargo, se debe tener en cuenta que plantar en altas densidades no significa mayor productividad, ya que llega a un límite en que el rendimiento no aumenta, sino que disminuye al momento de la cosecha (Ruiz, *et al*, 2008). Otro sistema que actualmente se está utilizando en Chile, es plantar en camellones de 80cm de ancho, a distancias entre 2m a 3m entre plantas y entre hileras 4m a 5m. Otra opción, también en

camellones, es plantar a distancias entre plantas de 1,5m a 2m y de 5m a 7m entre hileras (Sudzuki, *et al*, 1993).

La orientación de las plantaciones es preferible que sea este-oeste, noroeste-sureste o noreste-suroeste, ya que de esta forma hay mayor captación de luz, mayor fotosíntesis en las paletas de tunas y mayor rapidez en el enraizamiento. En Chile se planta desde mediados o fines de noviembre hasta la primera semana de marzo, una vez que las paletas cortadas logren su semi-deshidratación (Sudzuki, *et al*, 1993). Para la plantación de las tunas, es necesario realizar un hoyo relleno con 1 a 2 kilos de estiércol para poder enterrar 2/3 de la paleta (Figura 12), sin dejar tierra arimada sobre ésta, puesto que puede generar pudrición. En suelos pobres de materia orgánica es necesario adicionarla con anticipación.

Una vez plantada las tunas, si el suelo está húmedo no es necesario regarlo, no así cuando se encuentra seco, puesto que debe ser regado de manera lateral sin regar directamente la paleta. Igualmente, se deben efectuar cuatro riegos abundantes para asegurar el enraizamiento. El sistema riego recomendado y más utilizado es el sistema por goteo ubicándose a una distancia de 20cm a 25cm de la plantación, ya que permite una mayor eficiencia del agua y de los aportes de nutrientes (FUNDACIÓN CHILE, 1992).



Figura 12. Paleta de *Opuntia ficus indica* plantada $\frac{3}{4}$.

Podas

La finalidad de la poda es principalmente eliminar toda la vegetación en mal estado, mal ubicada, avejentada, con plagas, enferma y descolorida. Es por esto que existen diferentes tipos de podas en el transcurso de la vida de la planta. Los principales tipos de podas son:

Poda de formación: Se realiza los tres primeros años de vida de la planta con el fin de que la planta no gaste energía en otras paletas que no estén dentro de su forma, en consecuencia, aumenta su rendimiento. Existen diferentes formas, de abanico, circular y arbolito. La primera consiste en elegir de su primera brotación tres paletas vigorosas que formen ángulos de 40° a 60° que estén ligeramente inclinadas. En la segunda se escogen de su base, las paletas más vigorosas que formen ángulos de 45° a 60°. Y la tercera, deja una paleta vigorosa en posición vertical el primer año y al segundo año se dejan dos a tres pencas a una misma distancia. De estas tres formas se eliminan todas las pencas mal ubicadas, que se encuentren cruzadas, orientadas al suelo, etc. (Ríos y Quintana, 2004; Inglese, 1999; López, 1995; Pimienta, 1990).

Poda de mantenimiento: Controla el crecimiento en altura de la planta para lograr un equilibrio de las paletas según a la forma anteriormente adoptada. Se elimina las pencas entrecruzadas, las que se salen de la forma deseada y aquellas más altas al 1,80m. Se debe efectuar durante los 2 meses de su crecimiento (agosto a diciembre) (Ríos y Quintana, 2004; Inglese, 1999; López, 1995; Pimienta, 1990).

Poda de limpieza: Consiste en limpiar la planta de aquellas pencas enfermas, secas, muertas o con daños severos. Se realiza en cualquier época del año. Su objetivo es reactivar a la planta (Ríos y Quintana, 2004; Inglese, 1999; López, 1995; Pimienta, 1990).

Poda de reconstitución: Se aplica en cultivos que nunca han sido podados o que han sido abandonados durante años después de su última poda. Se realiza con el fin de equilibrar y acondicionar la planta (Ríos y Quintana, 2004; Inglese, 1999; López, 1995; Pimienta, 1990).

Otro tipo de poda es el raleo de flores, renuevos y frutos, cuyo fin es de no afectar la productividad de la planta.

Estimación del potencial de producción de biogás en plantaciones de tunas con fines agroindustriales versus plantaciones de tunas exclusivamente con fines energéticos

La productividad de las plantaciones de tunas es muy similar a otros cultivos como el trigo y el maíz, debido a que las tunas crecen durante todo el año. A medida que pasan los años, el crecimiento de las paletas va disminuyendo producto que la tasa de fotosíntesis neta, disminuye por sombreado de paletas superiores (Acevedo y Doussoulin, 1984). Lo que no tiene relación con el contenido de materia seca, ya que su incremento es todos los años durante todo el año (Cuadro 6). En Chile, el rendimiento comercial máximo está estimado en 16 toneladas por hectárea de fruto en peso fresco para plantas de 16 a 20 años de edad con un buen manejo, luego comienza a declinar entre los 21 a 35 años de edad, produciendo 8ton/há (Pimienta, 1990; Acevedo y Doussoulin, 1984). En la cosecha de la temporada enero-abril, el rendimiento varía entre 5 a 16 ton/há y en la temporada junio-septiembre, el rendimiento alcanza a los 0,5 ton/há (Sudzuki, *et al*, 1993).

Cuadro 6. Producción anual de biomasa de tuna comercial en Til Til.

Edad media de las plantas (años)	Producción biomasa seca (Ton. de M.S. há ⁻¹ año ⁻¹)		
	Paletas	Frutos	Total
1,5	5,33	0,10	5,43
3,5	7,43	0,43	7,86
5,5	10,50	3,15	13,65

Acevedo y Doussoulin, 1984.

Potencial de producción de biogás para plantaciones destinadas a la agroindustria

En Chile, el total de las plantaciones destinadas al cultivo de tunas alcanzan las 1.231,77 hectáreas, de las cuales la Región de Atacama comprende sólo 3,1 hectáreas y la Región de Coquimbo contiene 450,3 hectáreas (Cuadro 7) (ODEPA, 2007). Se estima que toda la producción de frutas es destinada para el mercado interno en ambas regiones.

Cuadro 7. Distribución de plantaciones de tuna en el norte chico de Chile.

Región	Provincia	Comuna	Superficie plantada (Há)
Atacama	Huasco	Vallenar	0,90
Coquimbo	Elqui	La Serena	376,7
	Elqui	Vicuña	26,9
	Choapa	Canela	0,90
	Limarí	Ovalle	19,5
	Limarí	Combarbalá	12
	Limarí	Monte Patria	3,4
	Limarí	Punitaqui	10,9

Escenario favorable para las plantaciones de tunales

Este escenario consiste en plantaciones de tunas con las mejores condiciones a las que se puedan enfrentar en relación al manejo y a las condiciones del sitio para obtener una buena producción. Para esto es necesario considerar características como una textura arcillo limosa, arcillo arenosa y areno francosa fina. Con respecto a su pH, éste se debe encontrar entre el rango de 7 a 8,9 con un buen drenaje, sin nivel freático y el porcentaje de pedregosidad sea menor a 15% hasta 30% (CIREN, 1989). El riego debe ser por goteo, idealmente 5 a 6 riegos por temporada para mantener el suelo ligeramente húmedo (Sudzuki, *et al*, 1993).

Los residuos originados por plantaciones comerciales se estiman que son 30 toneladas por hectárea producida (Robles, 2001), incluso puede ser mayor según el sistema de plantación y de las condiciones del sitio. Para este caso, de producción destinada para la agroindustria,

se calculará el potencial de biogás para condiciones óptimas de manejo y riego, ya que se espera que esta producción genere la mayor cantidad de frutos y residuos, por ende, la Región de Atacama y de Coquimbo producirían 93 y 13.509 toneladas, respectivamente. Esto da como resultado 13.602 toneladas generadas por residuos al año para el norte chico de Chile, equivalente a 37,27 toneladas diarias, las cuales se pueden utilizar como materia prima para la generación de biogás.

Por otro lado, estudios realizados por Tohá indican que tres kilos de tunas secas son capaces de producir 1m^3 de biogás lo que implica a la vez una producción de 10kW-h. (Robles, 2001).

Baeza (1995) indica que el poder calorífico de las tunas es $7.058\text{Kcal}/\text{m}^3$, con un rango de error que varía entre 6.800 y $7.200\text{Kcal}/\text{m}^3$. Asimismo, señala que el potencial de biogás para *Opuntia ficus indica* se puede expresar de la siguiente manera:

1g seco entrega 0,360L ó
1Kg seco es equivalente a $0,360\text{m}^3$

Es por esto que la estimación del potencial total de biogás para el norte chico de Chile es:

$$37.270 * 0,360 = 13.417,2 \text{ m}^3/\text{día de biogás.}$$

Por lo tanto, se tiene un potencial de biogás de $13.417,2\text{m}^3/\text{día}$ generado por 37.270 kilogramos diarios en el norte chico de Chile, lo que equivale a satisfacer las necesidades básicas de 3.716 familias en zonas rurales, ya que se tiene como consumo promedio para una familia de 5 personas (Cuadro 8) de $3,61\text{m}^3$ diario de biogás de *Opuntia ficus indica*.

Cuadro 8. Consumo promedio de una familia de 5 personas.

	Consumo promedio estándar (poder calorífico de 5.000 Kcal/m^3 apróx.)	Consumo biogás con Opuntia (poder calorífico $7058\text{Kcal}/\text{m}^3$ correspondiente 75% de Ch_4)
Cocina (5 horas)	$0,30 \text{ m}^3/\text{h} * 5\text{h} = 1,50 \text{ m}^3/\text{día}$	$0,21\text{m}^3/\text{h} * 5\text{h} = 1,05 \text{ m}^3/\text{día}$
3 Lámparas (3 horas)	$0,15 * \text{m}^3/\text{h} * 3\text{h} * 3 = 1,35 \text{ m}^3/\text{día}$	$0,11\text{m}^3/\text{h} * 3\text{h} * 3 = 0,99 \text{ m}^3/\text{día}$
Refrigerador medio	$2,20\text{m}^3/\text{h} * 1 = 2,20 \text{ m}^3/\text{día}$	$1,57\text{m}^3/\text{h} * 1 = 1,57 \text{ m}^3/\text{día}$
Total	$5,05 \text{ m}^3/\text{día}$	$3,61 \text{ m}^3/\text{día}$

Fuente: Baeza, 1995.

Potencial de producción de biogás para plantaciones destinadas totalmente a la producción de biogás

Para este caso, la estimación de biogás se analizará para dos escenarios, uno será en condiciones regulares y otro en condiciones deficientes, ya que se supone que existe mayor preocupación en las plantaciones comerciales. Por lo tanto, el escenario favorable sería el descrito para las plantaciones agroindustrial.

Escenario para sitios con condiciones regulares para la plantación de tunales

Las condiciones de este escenario consisten en suelos con texturas franco arcillo limosa, franco arcillosa, franco limosa y franco arenosa, cuyo pH es 6 y el porcentaje de piedras es entre 35-60%. El nivel freático se encuentra 110cm y el grado de inclinación de la pendiente varía entre 6 a 10%. El riego es 2 a 3 veces en total durante los meses de diciembre, enero y febrero (Sudzuki, *et al*, 1993). En este caso se estimará que la producción de residuos por las plantaciones es de 18ton/há anuales, con el fin de observar la diferencia de producción según el manejo otorgado y características del sitio.

Entonces, la Región de Atacama produciría 55,8 ton/há al año y la Región de Coquimbo produciría un total de 8.105,4ton/há anuales, dando un total de producción para el norte de chico de Chile de 8.161,2 ton/há/año equivalentes a 22,36 ton/há diarias, destinadas totalmente a la generación de biogás.

La estimación de potencial de biogás para el norte chico de Chile, según este escenario regular sería:

$$22.360 * 0,360 = 8.049,6 \text{ m}^3/\text{día de biogás.}$$

Este valor indica que 2.229 familias podrían satisfacer sus necesidades básicas diarias.

Escenario para sitios deficientes para plantación de tunales

Las condiciones de este escenario se refieren a suelo con textura arcillosa, con napas freáticas a 50cm, extremadamente pedregoso (> 60% de piedras), de pH 5 y riego por surco esporádico (CIREN, 1989). En este caso se tomarán los datos obtenidos por Acevedo y Doussoulin (1984), quienes indican que una plantación de tunas puede llegar a producir 13,65 toneladas al año de materia seca en tunas de 5 años de edad aproximadamente. Por consiguiente, se estimará el potencial de producción de biogás para plantaciones que producen 10ton/há anuales.

Por lo tanto, la Región de Atacama posee 3,1 hectáreas destinadas a la producción de tunas y la Región de Coquimbo presenta 450,3 hectáreas, en consecuencia cada una produciría 31 y 4.503 toneladas al año, respectivamente. Por consiguiente se obtiene como resultado 4.534 toneladas al año equivalente a 12,42 toneladas diarias producidas por el norte chico de Chile para la producción de biogás.

Así pues, la estimación de potencial de biogás para el norte chico de Chile sería la siguiente:

$$12.420 * 0,360 = 4.471,2 \text{ m}^3/\text{día de biogás.}$$

Este valor, 4.471,2m³/día de potencial de biogás estimado para el norte chico de Chile, alcanza a alimentar a 1.238 familias conformadas por 5 personas.

Con estos dos escenarios se puede observar que la diferencia en la producción de biogás entre el escenario regular y el escenario deficiente alcanza a ser casi el doble debido a las diferentes restricciones que presenta cada uno. Sin embargo, esta estimación de biogás producido puede llegar a solventar y ser una alternativa para muchas familias en el sector rural del norte chico de Chile.

CAPÍTULO IV. OTROS RESIDUOS UTILIZABLES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La producción de biogás es posible a través de diferentes tipos de residuos agrícola y animal, modificando el nivel de producción y las respectivas limitantes que presenta cada materia prima. Si bien la tuna es un cultivo que genera grandes cantidades de biogás, se debe considerar las limitantes que presenta ésta en la producción de biogás debido a su pH, el cual puede ser muy ácido, disminuyendo la producción de metano hasta llegar a neutralizarla. Por esta razón, en este capítulo se describirá otros tipos de residuos disponibles en el norte chico de Chile que puedan ayudar a mejorar la cantidad y calidad de biogás generado en conjunto con *Opuntia ficus indica*.

Residuos vegetales

Los residuos presente en el norte chico provienen principalmente de los grupos de cereales, leguminosas y tubérculos, cultivos industriales, hortalizas, flores, plantas forrajeras, frutales, viñas y parronales, viveros, semilleros y finalmente plantaciones forestales. En la Región de Atacama el grupo que posee mayor cantidad de hectáreas plantadas son los

frutales, seguido de las plantas forrajeras y como tercer grupo importante son las hortalizas. En la Región de Coquimbo, las plantas forrajeras son las más plantadas, seguidas de los frutales y finalmente se encuentran las viñas y parronales. En resumen, los grupos con mayores hectáreas en el norte chico son: plantas forrajeras, frutales y hortalizas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Superficie de cultivos más plantado en el norte chico de Chile.

Región	Plantas forrajeras (Há)	Frutales (Há)	Hortalizas (Há)
Atacama	2.271,03	13.599	1.651,95
Coquimbo	82.749,06	31.740,13	11.399,35
Total	85.020,09	45.339,13	13.051,3

Las hortalizas con mayor plantación de hectáreas y que por consecuencia generan mayor cantidad de residuos en la Región de Atacama son las arvejas, los tomates y las habas, en cambio, en la Región de Coquimbo, las más cultivadas son las alcachofas, las lechugas y por último el ají. En las plantaciones de frutales, el frutal más cultivado en ambas regiones es la uva de mesa con 19.515,65 hectáreas.

El censo agropecuario del año 2007 arrojó que las plantaciones forestales presentes en el norte chico sólo alcanzan 6.668,51 hectáreas de 171.541,09 total de hectáreas plantadas por los diferentes grupos antes mencionados. Sin embargo, en las comunas donde actualmente se encuentran plantaciones de tunas, existen 3.799,52 hectáreas de plantaciones forestales. Este grupo es utilizado para la producción de bioenergía, pero presenta algunas limitantes debido a la dispersión y difícil acceso, donde se deben tomar en cuenta varios factores antes de utilizar la biomasa forestal para la generación de energía. Además, la generación de biogás con biomasa forestal por sí sola es de alto costo de producción, ya que tiene una baja conversión en comparación con otros tipos de cultivos y porque la lignina presente en ella no permite realizar una metanización positiva. Es por esto que se utiliza mayormente en la generación de biodiesel.

Los residuos provenientes de las viñas y parronales pueden ser usados para la producción de biogás, cuya cantidad estimada es de 194 toneladas anuales sólo para la Región de Coquimbo (Chamy y Vivanco, 2007). Para la Región de Atacama no está estimado. Sin embargo, las hectáreas plantadas por viñas y parronales en las comunas donde existen plantaciones de tunas en el norte chico alcanzan las 9.555,37, permitiendo de este modo mayor facilidad para la obtención de estos residuos. El potencial estimado de biogás con este tipo de residuo para la Región de Coquimbo es de 135 mil metros cúbicos al año. Otro tipo de residuo disponible en la IV Región, es aquel que proviene de los restos de frutas y verduras destinadas para las conservas, el cual genera 2.627 toneladas de materia orgánica al año para la producción de energía (Chamy y Vivanco, 2007). Asimismo, los residuos provenientes de este sector son un buen elemento para mezclarlos con tunas, debido a que ellos se cultivan en suelos de pH entre 5,3 a 6,7(Infoagro, 2010).

Uno de los cultivos frutales más comunes en el norte chico es el cultivo de olivos, cuyo residuo (orujo seco, orujo húmedo, hueso y orujillo) puede ser utilizado en la producción de biogás. Este cultivo tiene un pH óptimo de 6 a 7,8 (Infoagro, 2010). Las hectáreas disponibles de olivos son de 4.930,65 en el norte chico de Chile, los cuales producen aproximadamente 1,7 ton/há de residuos.

Residuos provenientes de cultivos tradicionales presente en el norte chico como trigo (pH 5,5-7,2), maíz (pH 5,5-7,5), papa (pH 5,0-5,8) y porotos, produjeron anualmente en la temporada 2003-2004, 15.694, 7.250, 754 y 112.389 toneladas respectivamente. En Chile estos cultivos tienen un gran potencial de producción de biogás.

Un cultivo que está presente en la mayoría de las comunas de la Región de Atacama es la Jojoba con un total de 316,6 hectáreas en toda la región y en Vallenar específicamente presenta 67,5 hectáreas plantadas, cuyo rendimiento promedio es de 7,33 qqm/há, equivalente a 733 kg/há. Este tipo de cultivo es posible de utilizar para la producción de bioenergía a través del biodiesel y de biogás. En la generación de biogás, tiene un rendimiento bueno a una temperatura mayor a los 37°C, produciendo 600mL por 400g de jojoba (Al-Wyidian y Al-Muhtaseb, 2009).

Actualmente, se investiga en distintas universidades de Chile sobre la generación de energía a través del cultivo de las algas, las cuales pueden ser apiladas en zonas semiáridas y áridas de la costa del norte chico, ocupando menor espacio que las tunas en el cultivo. En un estudio realizado por la Universidad Católica de Temuco se pudo apreciar que al utilizar dos tipos de algas, huiro y cochayuyo, se produjo 16,9L y 16,8L respectivamente, de biogás en un período de 31 días, con un porcentaje de metano de 65% para ambas (Vargas, 2005). Por lo tanto, es posible utilizar cultivos de algas para la producción de biogás, además de ser utilizada para la producción de biodiesel y etanol.

Finalmente, otro cultivo que se encuentra en estudio por la Universidad de Chile es la jatropha, la cual también es apropiada para sectores con suelos marginales, como los del norte chico y grande de Chile, evitando la competencia con cultivos destinados para la alimentación del ser humano. En general, la jatropha es utilizada para la producción de aceite para biocombustible, sin embargo la cáscara de la jatropha puede ser utilizada para la generación de biogás (Paneque, 2009). Un experimento de generación de biogás con cáscara del fruto de la jatropha dio como resultado 2,5L de biogás por día, con un 70% de metano (López, *et al*, 2007).

Residuos provenientes de animales

Las especies de ganado más comunes presentes en el norte chico de Chile, según el censo agropecuario 2007 son: los caprinos, ovinos, bovinos y caballares. Aunque en la Región de Coquimbo los grupos más importantes, en orden decreciente, son los caprinos, asnales,

ovinos y bovinos. La región de Atacama coincide en el orden de importancia con el total del norte chico (Cuadro 10).

Cuadro 10. Número de cabezas de ganado más frecuentes del norte chico de Chile.

Región	Bovinos	Ovinos	Caballares	Caprinos
Atacama	7.148	5.229	3.941	39.187
Coquimbo	41.276	84.215	25.661	404.562
Total	48.424	89.444	29.602	443.749

Por otro lado, en las comunas donde existen plantaciones de tunas, el ganado más habitual es también el bovino, el ovino, el caballo y el caprino. Siendo este último el que se encuentra en mayor número (Cuadro 11).

Cuadro 11. Número de cabezas de ganado en comunas donde existen plantaciones de tunas.

Región	Comuna	Bovinos	Ovinos	Caballares	Caprinos
Atacama	Vallenar	4.972	241	963	16.244
Coquimbo	La Serena	870	616	1.210	30.963
	Vicuña	313	395	627	18.548
	Canela	3.157	14.136	2.917	43.118
	Ovalle	4.401	16.335	3.061	47.158
	Combarbalá	2.382	6.634	1.475	47.986
	Monte Patria	2.075	8.241	1.398	40.790
	Punitaqui	560	4.825	1.229	37.754
Total		18.730	51.423	12.880	282.561

Residuos como el estiércol procedente del grupo bovino presentan favorables propiedades para la generación de biogás y más aún en combinación con residuos provenientes de las plantaciones de tunas, ya que según Uribe (1993) la producción diaria de biogás con guano bovino es de 57,14mL/día y al incluir residuos de tuna en un 75%, la producción diaria se optimiza, llegando a producir 69,3mL/día. El porcentaje de metano con esta producción óptima es sobre 65% y el tiempo de inicio del proceso metanogénico junto con el tiempo de retención hidráulica disminuye en comparación con una producción de biogás con 100% de guano bovino, siempre y cuando se mantenga un pH neutro a levemente ácido. Otro estudio relaciona la edad del cladodio de tuna con el guano bovino y la producción de biogás, en el cual se concluye que el cladodio de 1 año de edad permite la inclusión de un mayor porcentaje de tuna en la mezcla con guano bovino sin que afecte la fermentación metanogénica, pero el bioabono presentará menor contenido de nitrógeno y fósforo (Varnero y López, 1996).

Los residuos provenientes del estiércol caprino también posibilitan la producción de biogás, llegando a producir 21m³ de biogás por tonelada de masa seca, permitiendo satisfacer las necesidades de una familia de 5 personas. Al mezclar este tipo de guano con tunas se obtiene que la producción de biogás se mantiene al agregar 25% de tunas, pero no ocurre lo

mismo cuando el porcentaje es mayor a éste, ya que el pH disminuye, la producción de biogás también lo hace (Varnero, *et al*, 1992).

El estiércol de equino también es posible de utilizar para la producción de biogás, se calcula que un equino genera 10kg/día de estiércol lo cual permite generar un volumen de 0,4m³/día de biogás. Por otro lado, el estiércol proveniente de un ovino es otro tipo de materia prima que permitiría la generación de biogás eso sí en menor cantidad, ya que un ovino genera 1,5kg/día de estiércol equivalente a 0,075m³/día/año (Varnero, 1992). Un estudio determinó que la producción de biogás con guano ovino en un biodigestor de carga fija generó 1,47mL biogás/g/día (Saico, 2005).

Finalmente, los residuos provenientes de los cerdos en el norte chico son menores en comparación al caprino, ovino, bovino y equino, ya que sólo hay 5.170 cerdos, de los cuales 2.609 cerdos se encuentran en las comunas donde se encuentran las plantaciones de tunas. Sin embargo también son una materia prima interesante para la producción de biogás, ya que un cerdo genera 2,25kg/día de estiércol equivalente a 0,11m³/cabeza/día (García, 2006).

CONCLUSIONES

- ✓ Se puede concluir que *Opuntia ficus indica* es una especie que se puede adaptar fácilmente a diferentes tipos de terrenos y de climas presentes en Chile. Asimismo, gracias a las características que presenta su metabolismo CAM, las tunas pueden desarrollarse en zonas áridas y semiáridas de cualquier parte del mundo, así como también en lugares donde los suelos se encuentran muy deteriorados, como por ejemplo, terrenos erosionados y/o abandonados en el norte chico de Chile. Para utilizarlos es necesario que se apliquen prácticas agrícolas que mejoren su composición físico-química, drenaje y riego.
- ✓ Actualmente, los cultivos de tunas no sólo se emplean para la producción de frutas, mermeladas, verduras, sino también es posible producir energía renovable y limpia, mediante la fermentación metanogénica de los cladodios.
- ✓ Según los agroclimas presentes en el norte chico la gran mayoría son aptos para la producción de tunas, debido a sus temperaturas. A excepción del agroclima Cordillera central, ya que sus temperaturas no permiten el desarrollo de ningún tipo de cultivo. Sin embargo, un lugar propicio para el cultivo de las tunas es el valle debido a que presenta estabilidad térmica, además de tener mayor precipitación que en la zona costera y cordillerana.
- ✓ En términos generales, la generación de biogás depende estrictamente de factores como la temperatura, TRH, relación C/N y el pH. La generación de biogás utilizando exclusivamente cladodios, presenta limitaciones por los valores de pH ácidos observados en la digestión anaeróbica, sobre todo cuando son cladodios jóvenes. Este problema se puede neutralizar mezclando los cladodios con otros residuos vegetales o animales, en proporciones que las mezclas alcancen rangos de pH cercanos a la neutralidad. Otro producto de interés, obtenido de esta fermentación lo constituye el bioabono. Este material orgánico estabilizado y sanitizado se puede aplicar al suelo, mejorando propiedades físicas, químicas y biológicas de éste, con lo cual, beneficia las plantaciones de tunas, otorgándoles un mayor rendimiento. El rendimiento de una plantación de tunas varía entre 10ton/há a 30 ton/há aproximadamente, dependiendo de las condiciones del sitio, clima, manejo cultural y la disponibilidad de recursos económicos.
- ✓ Los rendimientos de biomasa más altos se obtienen en plantaciones comerciales de tunales destinadas a la agroindustria, por lo tanto, constituye el escenario más favorable para la producción potencial de biogás, estimándose valores del orden de 13.406,4m³ de biogás/día. En cambio, cuando se seleccionan sitios con limitaciones moderadas a

severas, destinados a plantaciones de tunales sólo con fines energéticos, los escenarios de producción potencial de biogás disminuyen, estimándose valores que oscilan de 8.049,6m³ /día a 4.471,2m³/día respectivamente. Además, se puede concluir que si varias familias se unen para producir biogás, podrían abastecerse de energía por un año.

- ✓ La elección del tipo de biodigestor dependerá de la disponibilidad de materia prima, la disponibilidad de agua que presente el sitio y del uso que se quiera priorizar, si es para biogás o para producir bioabono. En el caso de zonas rurales, el digestor más utilizado es el de tipo continuo o semi continuo debido a que genera biogás de forma casi permanente y su carga se realiza en pequeñas cantidades diariamente, siempre que no sea una limitante la disponibilidad de agua. El digestor horizontal se recomienda para zonas con napas a poca profundidad, o que requieran digestores de tamaño superior a 15m³ y cuyos residuos necesiten tratamiento prolongado. El digestor de tipo estacionario o discontinuo se recomienda utilizar en zonas donde la disponibilidad de materia prima y de agua es baja. Finalmente, el digestor tipo continuo se utiliza cuando la materia prima está disponible en grandes cantidades constantemente y generalmente se encuentra en estado líquido.
- ✓ Finalmente, se puede decir que la tuna es un cultivo muy interesante de analizar para la producción de biogás, sobre todo en suelos donde no competiría con ningún otro cultivo, suelos pobres, erosionados y abandonados, pudiendo ser una gran alternativa para las zonas rurales y para la agricultura de subsistencia. Sin duda, las hectáreas plantadas en ambas regiones podrían ser muchas más, por lo cual sería beneficioso potenciar este cultivo mediante planes y charlas educativas sobre el cultivo de la tuna, sus alternativas en el mercado y como fuente de energía renovable.

GLOSARIO

Anaeróbico: Medio en ausencia de oxígeno.

Anhídrido carbónico (CO₂): Gas pesado incoloro, incombustible presente en la atmósfera. Se libera en compañía de otros gases en el proceso de biodigestión anaeróbica.

Aréolas: Son yemas axilares características de las cactáceas. En ellas crecen las espinas. Físicamente, son pequeñas protuberancias claras u oscuras.

Bacterias acetogénicas: Son microorganismos encargados de transformar los compuestos solubles en ácidos orgánicos.

Bacterias metanogénicas: Son microorganismos encargados de la fase de formación de metano. Convierten los ácidos orgánicos en biogás.

Bacterias no metanogénicas: Son aquellas que están presentes en las dos primeras etapas del proceso de producción de biogás.

Bioabono: Residuo estabilizado, libre de microorganismos patógenos e inodoro.

Biocombustible: Combustible de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos, materias primas provenientes del sector agropecuario y agroindustrial.

Biodiesel: Es un biocombustible líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales.

Biodigestor: Depósito cerrado donde se desarrolla la digestión anaeróbica. También llamado digestor.

Biogás: Mezcla gaseosa proveniente de la digestión anaeróbica compuesta principalmente por metano y anhídrido carbónico.

Cladodio: Estructura morfológica de las tunas. También se le llama tallo o penca. Tiene forma ovoide y a medida que crece, se va lignificando. Posee hojas reducidas temporales, gloquídeos y espinas.

Conductividad eléctrica: Es la capacidad de una solución para conducir electricidad, la que aumenta proporcionalmente a medida que la concentración de sales aumenta.

Conductividad hidráulica: Expresa la capacidad de un suelo para transmitir agua.

Degradación del suelo: Reducción de potencial del recurso suelo por factores como erosión hídrica, erosión eólica y sedimentación; impidiendo el desarrollo de vegetación.

Desertificación: Degradación del recurso suelo en regiones áridas, semiáridas, y sub-húmedas secas como resultado principalmente del impacto negativo generado por el hombre y/o también por variaciones climáticas.

Digestión anaeróbica: Proceso de degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y bioabono.

Drenaje: Remoción por medios naturales y/o artificiales del exceso de agua a través del escurrimiento superficial y subterráneo.

Efluente: Residuo líquido proveniente de la digestión anaeróbica.

Epidermis: Parte superficial de una planta. Está formada por una capa de células.

Estiércol: Mezcla de excretas animal y residuos orgánicos.

Fotosíntesis: Mecanismo fisiológico donde las plantas transforman la energía lumínica en energía química, liberando oxígeno.

Gloquídeos: Agrupación de pequeñas espinas finas.

Manejo cultural: Técnicas agronómicas como fertilización, riego, poda, arado de suelo, entre otras que puedan servir para mejorar la productividad de un cultivo.

Materia orgánica: Material biológico proveniente de plantas, animales y microorganismos, constituida por distintas fracciones orgánicas.

Materia prima orgánica: Son residuos de origen animal, vegetal, humano, agroindustrial y forestal utilizados en la carga del biodigestor.

Materia seca: Está compuesta por los minerales, fracciones orgánicas de un material biológico, al cual se ha eliminado la fracción de agua.

Metabolismo Ácido Cruseláceo (CAM): Consiste en la apertura nocturna de estomas, capturando el anhídrido carbónico (CO₂) cuando la temperatura y el déficit de presión de vapor sean bajos. Único para las cactáceas.

Metano (CH₄): Gas combustible, incoloro e inodoro. Componente principal del biogás.

Microorganismos patógenos: Son pequeños microorganismos que causan enfermedades en el hombre, vegetales y animales.

Nivel freático: nivel al que llega la zona de saturación del suelo por el agua.

Organismos estrictamente anaeróbicos: Sólo crecen en un ambiente con ausencia de oxígeno. También llamados anaeróbicos obligados.

Organismos facultativos: Son aquellos que pueden pasar de un tipo de metabolismo aeróbico a uno anaeróbico, y viceversa.

pH: Es una medida de acidez o basicidad. Está definido en una escala logarítmica del 0 al 14, donde el valor del pH igual a 7 es neutro. Mayor a este número se considera básico o alcalino y menor a él es ácido.

Poder calorífico: Cantidad total de calor desprendido de una unidad de masa de materia, al producirse una reacción de oxidación.

Propagación: Técnicas agronómicas utilizadas para la reproducción asexual de vegetales.

Quintal métrico (Qqm): Unidad de medida de peso donde 1qqm equivale a 100Kg.

Relación C/N: Es el cociente entre el carbono y el nitrógeno que está en la materia orgánica.

Régimen térmico: Cantidad de calor disponible para el crecimiento y desarrollo de la planta durante el período de crecimiento.

Residuo: Sustancia, objeto o material al cual se le puede otorgar un valor agregado.

Salinidad: Excesiva cantidad de sales en el suelo.

Sodicidad: Excesiva cantidad de sodio respecto del calcio y el magnesio adsorbido en el complejo de intercambio del suelo.

Sólidos fijos: También llamados cenizas. Son los residuos de sólidos totales que quedan luego de una ignición a una temperatura determinada.

Sólidos totales: Porción orgánica que queda después de remover toda su humedad a una temperatura determinada.

Sólidos volátiles: Porción de sólidos totales que se libera de una muestra al ser calcinada por dos horas a una temperatura de 600°C.

Suelos marginales: Son suelos erosionados y pobres en propiedades físicas, químicas y biológicas. Generalmente son los suelos presentes en zonas áridas y semiáridas de Chile.

Suelos salinos: Son aquellos que contienen sales en concentraciones mayores a 0,15% y pH menor a 8,5, limitando el desarrollo normal de las plantas.

Suelos sódicos: Presentan más del 15% de sodio intercambiable, pH mayor a 8,5, reduciendo la permeabilidad y el movimiento del agua.

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH): Intervalo de tiempo que un residuo permanece dentro de un sistema de tratamiento. En un tratamiento de lodo activado el tiempo mínimo debe ser igual al necesario para la reproducción de los microorganismos adecuados. En un digester discontinuo o Batch, corresponde al tiempo entre la carga y descarga del digester. En un digester continuo o semi continuo, el tiempo de retención hidráulica determina el volumen de carga diaria ($\text{Volumen digester/TRH}$).

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, E. y E. Doussoulin. 1984. Productividad de la tuna en el área de Til Til. Tecnología y agricultura. 29 (jun-jul): 18 – 22.

Al-Wydian, M. y M. Al-Muhtaseb. 2009. Experimental investigation of jojoba as a renewable energy source. University of Jordan, Faculty of Engineering. Jordania. Disponible en WWW: <http://gcreader2008.ju.edu.jo/PDF/401-j.pdf> . Leído el 4 de marzo de 2010

Anónimo. 2009. ¿Qué es el biogás? Digestión anaeróbica, características y usos del biogás. Biodisol (12/03/2009). Disponible en WWW: <http://www.biodisol.com/biocombustibles/biogas-que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas-energias-renovables-biocombustibles/> . Leído el 21 de septiembre de 2009

Anónimo. 2005. Biogás. Disponible en WWW: <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas> . Leído el 21 de septiembre de 2009

Baeza, F. 1995. Aprovechamiento del desecho del cultivo de cactáceas *Opuntia cacti* (tunales) para producción de biogás. Tesis Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile. 132p

Barbera, G. 1999. Historia e importancia económica y agroecológica. Pp 1 - 12. In: Barbera, G., P. Inglese y E. Pimienta. Agroecología, cultivo y usos del nopal. FAO. Roma, Italia. 222p.

Berger, H. 2006. Operaciones de campo para la utilización de nopales. Pp 23 - 33. In: Cadmo Rosell. Utilización agroindustrial del nopal. FAO. Roma, Italia. 164p.

Berger, H., C. Muñoz y F. Sudzuki. 1993. El cultivo de la tuna: cactus pear. 1^{era} Edición. Facultad de ciencias agrarias y forestales. Universidad de Chile. 88p

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL. 2009. Establece normas para la adecuada implementación de la Ley N° 20.257, que introdujo modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energías renovables no convencionales. Santiago, Chile. 7p

CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES. 1990. Atlas agroclimático de Chile: Regiones IV a IX. CORFO. Santiago, Chile. 67p.

CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES. 1989. Frutales menores y de hoja persistente. Requerimiento de clima y suelo. 4p.

Chamy, R. y E. Vivanco. 2007. Potencial de biogás. Comisión Nacional de Energía. Santiago, Chile. 80p.

Doussolin, E. y C. Quezada. 2006. Introducción al problema de los suelos de las zonas áridas. Primera edición. Departamento de suelos y recursos naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Manejo zonas áridas. Concepción, Chile. 119p.

FUNDACIÓN PARA LA INNOVACIÓN AGRARIA. 2010. Informes climáticos regionales. Disponible en WWW: <http://www.agroclima.cl/InformesRegionales/Temperaturas.aspx?IdReg=3> . Leído 13 de septiembre de 2010

FUNDACIÓN CHILE. 1992. Cultivo de tunas, una alternativa para zonas semiáridas. Agroeconómico. Vol. 7 (Febrero): 42 - 48.

García, C. 2006. Pequeños medios de generación distribuida: caso aplicación de purines de cerdos. Tesis Ingeniero civil eléctrico. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Santiago, Chile. 107p

García de Cortázar, V. y M. Varnero. 2006. Producción de bioenergía y fertilizantes a partir de los nopales. Pp 113- 119. *In:* Cadmo Rosell. Utilización agroindustrial del nopal. Chile.

García de Cortázar, V. y M. Varnero 1999. Producción de energía. Pp 194 - 200. *In:* Barbera, G., P. Inglese y E. Pimienta. Agroecología, cultivo y usos del nopal. FAO. Roma, Italia. 222p.

Hilbert, J. 2009. Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural.

Infoagro. 2010. Concepto de pH e importancia en fertirrigación. Disponible en WWW: http://www.infoagro.com/abonos/pH_suelo.htm . Leído 27 de Marzo de 2010

Inglese, P. 1999. Plantación y manejo de huertos. Pp 82 - 96. *In:* Barbera, G., P. Inglese y E. Pimienta. Agroecología, cultivo y usos del nopal. FAO. Roma, Italia. 222p.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES PORCINAS DE CUBA. 2007. Biodigestores. Boletín técnico porcino N°5 (Mayo). Disponible en WWW: <http://www.iip.co.cu/BTP/BTP5%20BIODIGESTOR.pdf> . Leído el 23 de Septiembre de 2009

López, C. 1995. El cultivo de la tuna. El Campesino Vol. CXXVI (12): 14 - 23.

López, O., G. Foidl y N. Foidl. 2007. Producción de biogás con cascarilla de frutos. Pp 8. In: De La Vega, J. *Jatropha Curcas* L. México D.F., México. 21p

Morales, L., F. Canessa, C. Mattar, R. Orrego y F. Matus. 2006. Caracterización y zonificación edáfica y climática de la Región de Coquimbo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*. 6 (3): 52 - 74.

Neuenschwander, A. 2008. Investigación, Desarrollo e Innovación en Bioenergía. Fundación para la Innovación Agraria, Ministerio de Agricultura. Disponible en WWW: <http://ardp.atacama.googlepages.com/AquilesNeuenschwander-FIA.pdf> Leído el 31 de marzo de 2010

Nobel, P.S. 1999. Biología ambiental. Pp 37 - 50. In: Barbera, G., P. Inglese y E. Pimienta. *Agroecología, cultivo y usos del nopal*. FAO. Roma, Italia. 222p.

Novoa, R. y S. Villaseca. 1989. Mapa agroclimático de Chile. Instituto de Investigación Agropecuaria. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. 221p.

Ochoa, M.J. 2009. Manejo de los tunales hacia un sistema de aprovechamiento integral. Instituto de Desarrollo Agropecuario del Semiárido. Facultad de Agronomía y Agroindustria. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina. Pp 64 - 72.

OFICINA DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS AGRARIAS. 2007. Censo Agropecuario y Forestal. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile.

Paneque, M. 2009. Puesta en valor de terrenos fiscales y suelos marginales mediante el desarrollo de cultivos energéticos. In: Seminario internacional de biocombustibles y su futuro en la matriz energética. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 3, 4 y 5 de Noviembre de 2009

Pearson, C. 2009. Clasificación de biodigestores. Energía casera. Disponible en WWW: <http://energiacasera.wordpress.com/2009/09/17/clasificacion-de-biodigestores/> . Leído 23 de Septiembre de 2009

Pimienta, E. 1990. El nopal tunero. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México. 246p.

Quezada, C. 2006. Estrategia para el manejo de suelos salinos. Primera edición. Departamento de suelos y recursos naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Manejo zonas áridas. Concepción, Chile. 119p.

Ríos, J. y V. Quintana. 2004. Manejo general del cultivo del nopal. Colegio de Postgraduados. Secretaria de la Reforma Agraria. México D.F., México. 81p.

- Robles, V. 2001. La chumbera, idónea para producir biogás. *Revista Energías Renovables*.
- Ruiz, F., J. Alvarado, B. Murillo, J.L. García, R. Pargas, J. Duarte. F. Beltran y L. Fenech. 2008. Rendimiento y crecimiento de nopalitos de cultivares de nopal (*Opuntia ficus-indica*) bajo diferentes densidades de plantación. Universidad Autónoma de Baja California Sur y Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, México. Disponible en WWW: <http://www.jpacd.org/V10/V10P22-35.pdf> . Leído el 14 de Diciembre de 2009
- Ruiz, G. 2006. El sistema de incentivos para la recuperación de suelos en la zona norte. Primera edición. Departamento de suelos y recursos naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Manejo zonas áridas. Concepción, Chile. 119p.
- Sáenz, C. 2006a. Los nopales como recurso natural. Pp 1 - 6. *In: Cadmo Rosell. Utilización agroindustrial del nopal. FAO. Roma, Italia. 164p.*
- Sáenz, C. 2006b. Características y composición química de los nopales. Pp 7 - 22. *In: Cadmo Rosell. Utilización agroindustrial del nopal. FAO. Roma, Italia. 164p.*
- Saico, L. 2005. Determinación de sustratos óptimos para la producción de biogás a partir de estiércol de ganado ovino, vacuno y porcino de los corrales de crianza de la UNALM. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de ingeniería agrícola.
- Scheinvar, L. 1999. Taxonomía de las Opuntias utilizadas. Pp 21 - 28. *In: Barbera, G., P. Inglese y E. Pimienta. Agroecología, cultivo y usos del nopal. FAO. Roma, Italia. 222p.*
- Sierra, C. 2009. Salinidad de los suelos del norte chico. Disponible en WWW: <http://www.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR25770.pdf> . Leído 22 de Noviembre 2009.
- Sudzuki, F. 1999. Anatomía y morfología. Pp 29 - 36. *In: Barbera, G., Barbera, G., P. Inglese y E. Pimienta. Agroecología, cultivo y usos del nopal. FAO. Roma, Italia. 222p.*
- Sudzuki, F., C. Muñoz y H. Berger. 1993. El cultivo de la tuna. Departamento de producción agrícola. Facultad de ciencias agrarias y forestales. Universidad de Chile. 85p
- Tohá, J. 1999. La tuna como fuente de energía. *Revista Bioplanet. Santiago, Chile.*
- Uribe, J. 1993. Evaluación de la producción de biogás en material vegetativo de tuna, sometido a un proceso de fermentación metánica. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 47p
- Vargas, G. 2005. Estudio de la generación de biogás, a partir de la sinergia en mezclas de algas marinas, biodegradadas en un sistema de bioconversión anaerobia en dos etapas. Tesis Ingeniera Ambiental. Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ciencias. Temuco, Chile. 85p

Varnero, M. 2006a. Factores físicos y ambientales que regulan el crecimiento microbiano. Cátedra de Microbiología Ambiental. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 6p

Varnero, M. 2006b. Producción de bioenergía y fertilizantes a partir de los nopales. Pp 113 - 119. *In:* Cadmo Rosell. Utilización agroindustrial del nopal. FAO. Roma, Italia. 164p.

Varnero, M. y X. López. 1996. Efecto del tamaño y edad de cladodio de tuna en la fermentación metanogénica de guano bovino. Sociedad chilena de la ciencia del suelo 11: 80 – 89.

Varnero, M. 1992. Manual de reciclaje orgánico y biogás. Aprovechamiento racional de residuos agropecuarios. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Reciclaje Orgánico. 48p

Varnero, M., J. Uribe y X. López. 1992. Factibilidad de una biodigestión anaeróbica con mezclas de guano caprino y cladodios de tuna (*Opuntia ficus indica* L. Mill). Terra árida 11: 166 – 172.

Vega, A. 2010. Propagación y plantación de tuna (*Opuntia ficus-indica* Mill.). Centro de estudios tecnológicos para la agricultura. Universidad Mayor, Facultad de Agronomía. Santiago, Chile. 49p.