The book cover features a stylized landscape. The top half is a light blue sky with a vertical green stripe on the right. A large orange rectangle is centered in the sky, containing the title. Below the sky is a brown, curved horizon line. On the left, there is a patch of green grass. On the right, there is a dark brown, circular shape representing a well or a depression in the ground.

Biomasa en el Desierto de Chile

Editado por
Manuel Paneque

Biomasa en el Desierto de Chile

Autores

Marcela Zulantay

Celián Román-Figueroa

Juan Manuel Uribe

Christian Celis

Ricardo Moyano

Manuel Paneque

Editado por

Manuel Paneque

Santiago de Chile, 2013



PANEQUE, Manuel

BIOMASA EN EL DESIERTO DE CHILE

Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile

128 páginas

Autores

Marcela Zulantay; Celián Román-Figueroa; Juan Manuel Uribe;

Christian Celis; Ricardo Moyano; Manuel Paneque

Derechos reservados

© 2013 Inscripción N°: 228.210 del 24 de abril 2013 del Registro de Propiedad Intelectual

ISBN: 978-956-19-0817-8

Autorizada su circulación por Resolución N° 164 del 24 de abril de 2013 de la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado.

La edición de mapas, cartas geográficas u otros impresos y documentos que se refieran o relacionen con los límites y fronteras de Chile, no compromete en modo alguno, al Estado de Chile, de acuerdo con el Art. 2°, letra g) del DFL N° 83 de 1979 del Ministerio de Relaciones Exteriores.

Laboratorio de Bioenergía y Biotecnología Ambiental
Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables
Facultad de Ciencias Agronómicas
Universidad de Chile
Av. Santa Rosa 11315, La Pintana
Casilla 1004, Santiago de Chile
e-mail: mpaneque@uchile.cl

Edición 500 ejemplares

Producción y Distribución: Agroenergía SA

Diseño y Diagramación: Sebastián Alvear Chahuán

Soporte SIG: Ignacio Yañez y Carla Reveco

Impreso por Alfabetas Artes Gráficas

No se permite la reproducción total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

Santiago de Chile, 2013

Biomasa en el Desierto de Chile





Presentación

Barrick Zaldívar presenta el libro **“Biomasa en el Desierto de Chile”** obra de carácter científico que describe los recursos naturales del Norte Grande y pone en valor sus suelos, a través de un exhaustivo análisis y propuesta de especies nativas o exóticas, con potencial para la producción de bioenergía en Chile.

La degradación de las tierras áridas, semiáridas y zonas subhúmedas secas por los efectos de las variaciones climáticas y las actividades humanas como el cultivo y el pastoreo excesivo, la deforestación y la falta de riego es un fenómeno que avanza en el mundo, y es conocido como desertificación. Un proceso paulatino que alerta sobre la vulnerabilidad de los ecosistemas a la sobreexplotación y al uso inapropiado de los suelos. La desertificación en nuestro país es uno de los problemas medio ambientales más graves, pues afecta una gran proporción del territorio del Norte Grande.

La desertificación reduce la diversidad biológica, que contribuye a muchos de los servicios que los ecosistemas de las tierras secas proporcionan al hombre. La flora y su diversidad tienen un papel decisivo en la conservación del suelo y en la regulación de las aguas superficiales y el clima local. La alteración del suministro de los servicios interrelacionados que proporciona la biodiversidad vegetal en las tierras secas es uno de los desencadenantes clave de la desertificación y sus múltiples consecuencias, incluyendo la pérdida de hábitat para otras especies.

El Norte Grande cuenta con un gran potencial para el desarrollo de cultivos energéticos. Se estima que existen entre 0,5 y 1 millones de hectáreas de suelo susceptible de ser puesto en valor mediante estos cultivos, lo que permitirá la ampliación de la frontera agroforestal. La recuperación de áreas degradadas es posible con una visión integrada de toda la I+D+i asociada a los cultivos energéticos, y buscando soluciones innovadoras que afiancen el futuro de los mismos en áreas extremas, lo que contribuye a preservar nuestro entorno y el medio ambiente.

La forestación de zonas áridas como sumideros de CO₂, contrarresta los efectos que genera el calentamiento global en nuestro planeta, y mantienen, a su vez, la biodiversidad, al permitir la subsistencia de numerosas especies de flora y fauna que en muchos casos son de carácter endémico. Al mismo tiempo, protegen el suelo de la erosión, mejora la capacidad de almacenamiento de los embalses y la recarga de los acuíferos, y sirven de espacio para la indispensable recreación. La conservación de los recursos naturales y la adaptación al cambio climático, es una apuesta que nos permite la prevención y combate a la desertificación, degradación de tierras y sequía.

En línea con nuestra política de Sostenibilidad, la que entendemos como crecimiento económico, equilibrio ecológico y progreso social, queremos a través de estas páginas mostrar nuestro compromiso con el potencial de desarrollo del sector agroforestal en Chile como motor de desarrollo social y que permita diversificar la matriz energética y a un Desarrollo Sostenible, y en especial, contribuir al equilibrio ecológico de nuestro entorno y a la preservación del medio ambiente.

Leonardo González Alcayaga

Gerente General de Operaciones
Barrick Zaldívar.





Prólogo

La diversidad biológica conforma un componente de los recursos naturales de nuestra Nación, resulta indispensable para la integridad de los medios de vida de la población y la supervivencia de las generaciones actuales y venideras. Su utilización adecuada es una necesidad, y decisiva para el desarrollo sostenible del país. Es por ello, que su cuidado debe estar en directa relación con la presión que ejerce la actividad humana.

En términos de la contribución al desarrollo, su importancia para el país se ve reflejada en los aportes a la economía nacional, donde el 20% del PIB corresponde a los sectores primarios de minería, agricultura y pesca. Las exportaciones aportan un 30% del PIB, donde un gran porcentaje son recursos naturales o derivados de ellos. A su vez, los diez principales productos de exportación son derivados directos de recursos naturales, alcanzando la cifra de US\$9.000 millones.

Chile a lo largo de su historia y en la búsqueda de desarrollo para su pueblo ha producido una fuerte presión al patrimonio natural del país. Hace ya décadas tomamos conciencia que nuestro país cuenta con un pasivo ambiental que ha incrementado la vulnerabilidad de ecosistemas y especies, de flora y fauna. Una cantidad importante de suelos están erosionados por prácticas históricas, existe una creciente desertificación y escasez de recursos hídricos para disponer de caudales ecológicos producto de fenómenos globales y regionales, que nos plantea un desafío que tenemos que saber abordar con las nuevas tecnologías.

El libro **“Biomasa en el Desierto de Chile”** hace un aporte al conocimiento de la dinámica de los recursos naturales del Norte Grande, su degradación, y abre la oportunidad a una nueva economía que permita su uso y valorización. Se resalta el potencial de los suelos áridos y semiáridos, para el desarrollo de cultivos energéticos y valorización mediante una nueva industria agroforestal. Propone la recuperación de áreas degradadas y el uso de aguas residuales o de fuentes alternativas con una visión integrada a este propósito.

Así es como promueve la forestación de zonas áridas con especies adaptadas a esta condición, ayudando a neutralizar de forma directa la emisión de gases efecto invernadero y promoviendo la apertura de mercados de carbono, en línea con la tramitación de una nueva ley de fomento a la forestación que se encuentra en trámite en nuestro Congreso, dónde se abre una oportunidad para estas regiones áridas.

Esta edición propone el crecimiento económico maximizando el uso de los recursos primarios del Norte Grande, reutilizando aquellos existentes o subutilizados y manteniendo la armonía ambiental a través de la actividad agroforestal para fines de conservación, producción de energía limpia y desarrollo.

Finalmente, incorpora los desafíos planteados por el Gobierno de Chile en materia medioambiental como las Estrategias Nacionales de Energía y de Recursos Hídricos, destacando los compromisos asumidos por el país a nivel internacional sobre la conservación y sustentabilidad de nuestros recursos naturales.

Eduardo Vial Ruiz-Tagle

Director Ejecutivo

Corporación Nacional Forestal.





Índice



Presentación

Prólogo

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Introducción 10

Capítulo 1.

Recursos Naturales del Desierto 14

1.1. Recurso Clima Norte Grande 17

1.2. Recurso Suelo Norte Grande 34

1.3. Recurso Hídrico Norte Grande 45

1.4. Desafíos en el Uso de los Recursos Naturales 57

Capítulo 2.

Forestación y Vegetación del Norte Grande de Chile 62

2.1. Cultivos con Potencial Adaptación a Zonas Áridas (Algarrobo; Atriplex; Chañar; Guindilla; Higuera; Jatropha; Jojoba; Pimiento; Tamarugo; Tara) 65

2.2. Principales Estreses Abióticos 87

Capítulo 3.

Ampliación de la Frontera Agrícola 90

3.1. Disponibilidad de Agua para Riego 95

3.2. Potencialidad Agrícola de Zonas Áridas 97

3.3. Área Potencial de Cultivo de la Macrozona Norte de Chile 100

3.4. Potencial de Mitigación y Zonificación de Cultivos Energéticos 100

Bibliografía 110

Anexos 120

Anexo 1. Taxonomía. Grandes Grupos de Suelo

Anexo 2. Criterios para Analizar Calidad del Suelo

Anexo 3. Criterios de Análisis de Calidad del Agua de Riego

Índice

Índice de Figuras

Capítulo 1.

- Figura 1. Generación de SIC + SING 2000-2011
- Figura 2. Distribución espacial de la Temperatura Máxima Media Mensual de Enero
- Figura 3. Distribución espacial de la Temperatura Mínima Media Mensual de Julio
- Figura 4. Distribución espacial de la Precipitación Media Anual
- Figura 5. Distribución espacial del Periodo Libre de Heladas
- Figura 6. Distribución espacial de la disponibilidad de calor en días-grado anuales
- Figura 7. Distribución espacial del Déficit Hídrico Anual
- Figura 8. Distribución de los Usos Consuntivos del Agua
- Figura 9. Disponibilidad de Agua en Chile por Habitante
- Figura 10. Oferta y Demanda de Agua en Chile
- Figura 11. Mapa de Sobreexplotación Regiones Arica y Parinacota-Atacama
- Figura 12. Cuencas del Norte Grande
- Figura 13. Disponibilidad y demanda de aguas subterráneas
- Figura 14. Demanda de Agua a Nivel Regional
- Figura 15. Radiación Global Horizontal para los años 2010 y 2011
- Figura 16. Superficie Forestada a Nivel Nacional, año 2010

Capítulo 2.

- Figura 17. Distribución vegetacional en la macrozona norte
- Figura 18. Hojas y corteza de algarrobo
- Figura 19. Arbusto de atriplex
- Figura 20. Flor de chañar
- Figura 21. Fruto en formación de guindilla
- Figura 22. Fruto en formación de higuera
- Figura 23. Planta en desarrollo con flores senescentes de jatropha
- Figura 24. Flor femenina de jojoba
- Figura 25. Árbol de pimienta
- Figura 26. Tronco y corteza de tamarugo
- Figura 27. Fruto de tara

Capítulo 3.

- Figura 28. Categorías de desertificación para la macrozona norte de Chile
- Figura 29. Déficit hídrico (%) según balances hídricos estimados para 1996, 2010 y 2025
- Figura 30. Planificación de una forestación en zonas áridas
- Figura 31. Proporción regional según uso de suelo (% superficie regional)
- Figura 32. Área potencial de cultivo de la macrozona norte de Chile

Figura 33. Evaluación de Aptitud de Tierras

Figura 34. Zonificación bioclimática de cultivos para biocombustibles líquidos

Figura 35. Zonificación bioclimática de cultivos para biocombustibles sólidos

Figura 36. Proporción de la superficie de la macrozona norte según aptitud de tierra para biocombustibles líquidos y sólidos

Anexos

Figura 37. Grandes Grupos de Suelos. Regiones Arica y Parinacota-Atacama

Figura 38. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego

Índice de Tablas

Capítulo 1.

Tabla 1. Territorio Fiscal Disponible por Regiones

Tabla 2. Constitución química de aguas superficiales

Tabla 3. Bonificaciones de acuerdo a la aplicación del DL N° 701

Capítulo 2.

Tabla 4. Niveles de salinidad y sus características

Capítulo 3.

Tabla 5. Categorías de desertificación y superficies según región de la macrozona norte

Tabla 6. Balance hídrico según macrozonas

Tabla 7. Biomasa para combustible líquido

Tabla 8. Biomasa para combustible sólido

Tabla 9. Usos de suelo de la macrozona norte

Tabla 10. Parámetros de zonificación de biocombustibles líquidos

Tabla 11. Parámetros de zonificación de biocombustibles sólidos

Anexos

Tabla 12. Clasificación de suelos respecto al pH

Tabla 13. Clasificación de Suelos respecto a la Salinidad y Sodicidad

Tabla 14. Contenido de elementos Boro, Cobre, Manganeso y Molibdeno esperados para el norte del país.

Tabla 15. Estándar para agua de riego según la norma nacional NCh1333 Of.78

Tabla 16. Clasificación de calidad de agua de acuerdo a su CE según la norma nacional NCh1333 Of.78

Tabla 17. Límites permisibles de boro para aguas de riego

Tabla 18. Estimación de problemas potenciales por salinidad e infiltración



Introducción

La capacidad de los recursos naturales del mundo para mantener la creciente población y sus necesidades, es una cuestión fundamental para la comunidad internacional. La presión ejercida sobre estos recursos y el consecuente agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, hacen necesario buscar nuevas alternativas que sigan satisfaciendo estos requerimientos, y que además cumplan con los objetivos convenidos en los acuerdos internacionales, sobre reducción de gases de efecto invernadero y calentamiento global.

La matriz energética de Chile muestra que el 73,6% del suministro proviene de los combustibles fósiles no renovables, donde el 96,5% del petróleo, el 69,3% del gas natural, y el 99,5% del carbón consumido, son importados, lo que nos deja vulnerables tanto en términos de la oferta como del precio (CNE, 2011). Sin embargo, el paradigma mundial de la energía está cambiando desde una plataforma basada en el petróleo a un escenario potenciado en fuentes energéticas renovables. El nuevo escenario incluye la utilización de la biomasa, provista por los sectores agrícola, forestal y agroindustrial, con potencial de entrega de energía. En Chile sólo el 2,11% del suministro energético proviene de la biomasa (CDEC-SIC, 2010) y para que se considere una alternativa, se deben resolver importantes retos, desde la producción, y sustentabilidad de la biomasa, hasta la cadena del producto en el proceso de generación energético.

Las especies con potencial energético son una herramienta de lucha contra el cambio climático y la dependencia energética, también constituyen un pilar de desarrollo rural (Demirbas y Demirbas, 2007), y pueden generar importantes efectos de expansión en las opciones productivas que presentan áreas vulnerables económicamente e incorporar tierras improductivas o contaminadas al proceso productivo. La utilización de biocombustibles diversifican la economía rural, reducen el estancamiento, atraen capitales y generan actividades de I+D+i en lugares improbables por su limitada accesibilidad o lejanía de los centros económicos y tecnológicos.

El desarrollo de la bioenergía en Chile, tiene un carácter estratégico y responde a la necesidad de diversificar la matriz energética, prioritariamente sobre la base de la ampliación de la frontera agroforestal. El dilema en el desarrollo de especies bioenergéticas, radica en la competencia por el uso del suelo en relación al utilizado por los cultivos para alimentación humana y animal. El desafío es contribuir a la búsqueda de aquellas especies que puedan adaptarse a sitios y terrenos en tierras abandonadas, marginales, secas y semiáridas, no comprometidas con la cadena alimentaria del ser humano.

Los cultivos energéticos son especies de crecimiento rápido destinadas únicamente a la obtención de energía o como materia prima para la obtención de otras sustancias combustibles; su desarrollo suele ir acompañado del crecimiento de la industria de

transformación de la biomasa en combustible. Por eso, la agroenergética constituye una verdadera agroindustria donde la producción y la transformación están estrechamente relacionadas, tanto desde el punto de vista técnico como económico y geográfico.

El territorio del norte de Chile es un espacio para el asentamiento humano y el desarrollo de actividades extractivas de recursos primarios, como la minería metálica y no metálica, debido a la riqueza natural presente en esta zona. Además, tiene un potencial para el desarrollo en ámbitos como la actividad turística y la astronomía. La zona comprendida entre las regiones de Arica y Parinacota y Atacama, si bien tiene áreas definidas para fines de conservación por la naturaleza y fragilidad de sus ecosistemas, puede abrir oportunidades al desarrollo agroforestal del país, permitiendo la convivencia de diversas actividades llamadas a satisfacer las necesidades actuales y del futuro. Esta enorme superficie, con sus diversas condiciones ambientales, tiene atributos que deben ser puestos en valor desde una perspectiva integrada.

Una de las particularidades de esta macrozona corresponde a la superficie disponible para el emprendimiento de proyectos agroforestales, mediante el uso de especies adaptadas a zonas áridas y semiáridas, a periodos de escasez y/o con bajos requerimientos hídricos, ya que existen más de 15 millones de hectáreas (Mha) susceptibles de explotar en este ámbito, permitiendo ampliar la frontera agroforestal del país. Así, este patrimonio se transforma en un recurso que otorga ventajas importantes para el crecimiento y desarrollo nacional.

El clima se constituye en una variable fundamental al momento de realizar estudios de adaptabilidad bioclimática para fines productivos, dando soporte por ejemplo, a la introducción de nuevas especies o la realización de prospecciones con el fin de habilitar suelos marginales para la producción. Ante los impactos de nuevos escenarios climatológicos imprevistos y de cambio climático, se requiere contar con información de alta precisión sobre el clima, por ejemplo, y de valor bioclimático, lo que permitirá planificar y gestionar con mayor eficacia las actuales zonas productivas del Norte Grande, y visualizar áreas potenciales de ser incorporadas a la producción no sólo de alimentos, sino también de biomasa en ese contexto territorial.

Chile puede aplicar soluciones regionales o micro-regionales para permitir el crecimiento de estas alternativas energéticas con una mirada estratégica y sustentable. Se tiene una capacidad técnica instalada importante y, para el desarrollo de esta cadena de valor, es relevante la difusión de las herramientas tecnológicas que son aplicables a esta área con una adecuada política de extensión.



Capítulo 1

Recursos Naturales del Desierto

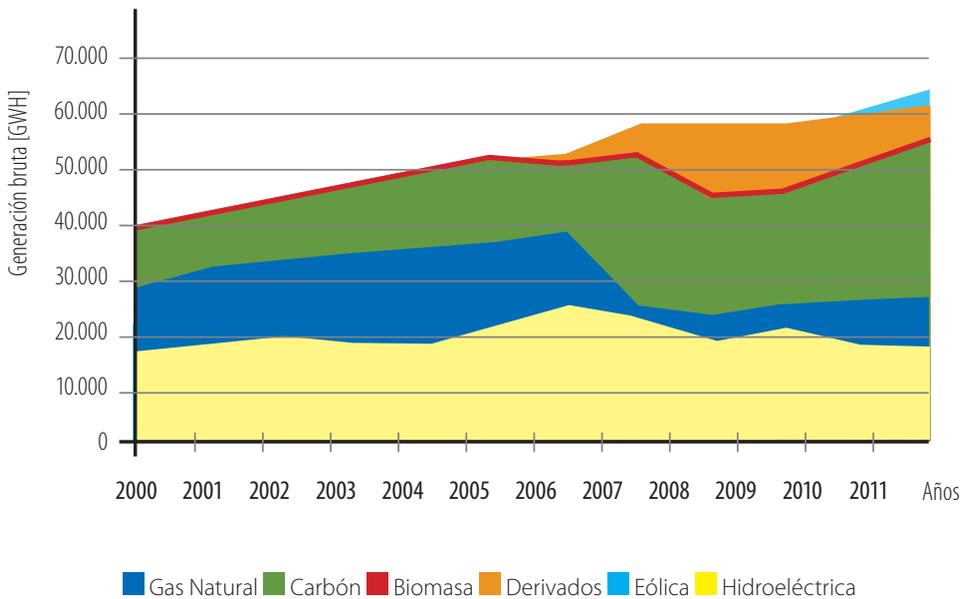


Chile cuenta con una capacidad instalada total de 16.970 MW, de la cual un 73,6% corresponde al Sistema Interconectado Central (SIC), un 25,6% al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y un 0,8% a los sistemas medianos de Aysén y Magallanes (Gobierno de Chile, 2012a).

Al año 2020 se proyectan en nuestro país tasas de crecimiento del consumo eléctrico en torno al 6 ó 7%, lo que requerirá aumentar la oferta a ese año en más de 8.000 MW en nuevos proyectos de generación. A su turno, la Ley N° 20.257 de Fomento a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) establece una meta de un 10% de ERNC al año 2024 (Ministerio de Economía, 2008), pues uno de los compromisos del país es contar con el desarrollo de energías limpias y renovables, entre ellas la biomasa.

Esta mirada de largo plazo requiere avanzar en la generación de las condiciones para contar con una matriz cada vez más diversificada y segura. Actualmente nuestra matriz de energía eléctrica, considerando tanto el SIC como el SING, está compuesta en un 3% de participación de ERNC, 34% de hidroelectricidad y 63% de generación térmica (Figura 1).

Figura 1. Generación de SIC + SING 2000-2011 (Gobierno de Chile, 2012a).



Chile presenta un potencial significativo de recursos primarios que pueden ser aprovechados en generación de electricidad, calor y producción de biocombustibles, sin perjuicio que cada una de las distintas tecnologías de ERNC presente diferentes obstáculos para su desarrollo. Para ello se pretende establecer una estrategia nacional de mediano y largo plazo diferenciada para cada ERNC (solar, eólica, bioenergía, geotermia, mini-hidroeléctricas y mareomotriz; Gobierno de Chile, 2012a).

En el marco de la estrategia nacional se definirán las medidas que aborden los obstáculos de cada una de las tecnologías de ERNC, contemplando de forma concreta aspectos tales como investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), prospección del recurso, instrumentos de fomento, financiamiento y marco regulatorio (Gobierno de Chile, 2012a).

Se consolidará la generación distribuida como una solución efectiva para lograr un sistema eléctrico con mayor oferta y de mayor eficiencia, consolidando el Net Metering de acuerdo a la Ley N° 20.571, que Regula el Pago de las Tarifas Eléctricas de las Generadoras Residenciales (Ministerio de Energía, 2012). Esta iniciativa considera que usuarios finales (e.g. las familias o pequeñas empresas) puedan instalar tecnologías de generación de ERNC en sus casas o empresas. La energía generada por cada uno de estos pequeños productores podrá ser utilizada para autoconsumo o para inyectarla a la red, pudiendo incluso recibir un pago de parte de las distribuidoras conforme la electricidad que aporten al sistema.

Sin perjuicio de la utilización de los recursos primarios del país para promover el desarrollo productivo y social en un marco de sostenibilidad, e.g. mediante la producción de biomasa para fines energéticos o de prestación de servicios ambientales, es dable tener presente que las iniciativas en este sentido deben cumplir con los compromisos internacionales suscritos por el Estado de Chile en relación a los Convenios en materia de protección ambiental (Objetivos del Milenio, Lucha contra la Desertificación, Mitigación de Gases efecto Invernadero y otros atinentes).

En este Capítulo se presenta el estado del arte de los recursos naturales de la macrozona norte (clima, suelo y agua) para el área geográfica comprendida entre las regiones de Arica y Parinacota, y Atacama, sus principales limitaciones y los desafíos para enfrentar la producción de biomasa, poniendo en valor este territorio y respondiendo de esta forma a las necesidades y demandas actuales y futuras del país.

1.1. Recurso Clima Norte Grande

Chile se extiende a lo largo de 38 paralelos, aproximadamente 4.500 Km.. Esta enorme extensión longitudinal tiene como consecuencia una gran diversificación de los climas. Así por ejemplo, el Norte se caracteriza por los climas áridos, la región central, por los climas mediterráneos, y el extremo Sur por los climas húmedos y lluviosos. El clima chileno está determinado por el anticiclón del Pacífico, la influencia marina y el relieve, en especial las cordilleras de la Costa y de los Andes (Donoso, 2008).

El Anticiclón del Pacífico, ubicado en la longitud 90° O y latitud 20°-30° S, genera una zona de altas presiones máximas que se detecta cerca del paralelo 30, a la altura de la ciudad de La Serena, mientras que en invierno se desplaza al norte, ubicándose entre las ciudades de Taltal y Tocopilla, cercano a los paralelos 20 y 25. Su influencia alcanza hasta la latitud 38° S en invierno, y a los 42° S en verano. Por efecto del Anticiclón, de las diferencias de temperatura mar-tierra y de la rotación terrestre, los vientos dominantes son del S o SW, del paralelo 45 al norte en verano y, del 38 al norte, en invierno. El encuentro de masas de aire de origen tropical con masas de aire frío polar, se produce entre los grados 40° a 45° S, en verano y entre los 30° a 35° en invierno. Esta situación hace que en verano se produzcan muy pocas lluvias en las zonas de altas presiones, donde masas de aire descienden en espiral calentándose, y permite que haya una gradiente de lluvias muy importante entre el extremo norte y sur del país.

En el sentido transversal, este-oeste, el movimiento de las masas de aire y lluvias es influenciado por el relieve. Así, la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa es más lluviosa que la oriental; el Llano Central algo más lluvioso que el sector oriental de la Cordillera de la Costa, y menos que el Piedmont de la Cordillera de los Andes. Las isoyetas (líneas de igual precipitación), se orientan paralelas a la Cordillera de los Andes, en todo el sector andino sobre los 500 metros. Estas variaciones se deben al enfriamiento de las masas de aire al ascender, lo que provoca lluvias, y a su calentamiento al descender, lo que seca el aire (Santibañez y Uribe, 1991).

La cercanía del océano se hace sentir a lo largo de todo el país suavizando las variaciones estacionales de la temperatura a la vez que genera climas con un alto contenido de humedad atmosférica y nubosidad en la costa.

Regiones Climáticas del Norte de Chile

Los climas de la zona norte están dentro de la categoría de Climas Áridos Subtropicales. Estos se explican por el marcado efecto que causa la acción del Anticiclón del Pacífico Sur Oriental. Este anula los procesos de convección y genera climas secos y cálidos.

Climas áridos subtropicales

Se caracterizan por una extrema aridez. La estación seca dura 10 a 12 meses. Dentro de estos climas pueden distinguirse varios matices: en la costa, un clima desértico con nublados abundantes; hacia el centro, un desierto absoluto, el cual degenera hacia la cordillera andina por efecto de la altura. El desierto costero se transforma hacia el Sur en una estepa como consecuencia de un ligero aumento de la pluviometría. Por el centro, el desierto absoluto degenera en un desierto marginal bajo y posteriormente en una estepa con gran sequedad atmosférica.

A continuación se caracterizan los principales clima asociados a esta categoría:

a) Clima desierto costero (nublados abundantes)

Constituye una franja costera de 10 a 30 Km de ancho y que va desde el límite Norte hasta la ciudad de Caldera aproximadamente. Las oscilaciones térmicas se ven muy atenuadas por la influencia marina, neblinas muy frecuentes debido a la influencia del anticiclón del Pacífico y la corriente de Humboldt. Abundante nubosidad baja que se retira durante la mañana. La precipitación anual va desde 1 mm en la ciudad de Arica a 30 mm en la ciudad de Caldera.

Las características hídricas del desierto costero, no permiten cultivar sin riego. Es una región muy importante por su aptitud para el cultivo de frutales tropicales y subtropicales como mangos, pomelos, tangelos, mandarinas, guayabas, paltos, chirimoyos y otros, pero los frutales con requerimientos de frío manzanos, ciruelos, peras, no se pueden cultivar. Se caracteriza, además, por su aptitud para la producción de hortalizas tempranas y tardías.

Arica	Precipitación anual: 1,1 mm Temp. Media anual: 19,1 °C
Iquique	Precipitación anual: 2,4 mm Temp. Media anual: 17,6 °C
Antofagasta	Precipitación anual: 10 mm Temp. Media anual: 15,6 °C

b) **Clima desértico interior**

Hacia el interior se desarrolla la Depresión Intermedia, entre los farellones costeros y las primeras estribaciones de la Cordillera de los Andes, donde se expresa el clima perárido chileno, desde la frontera norte hasta la latitud de la ciudad de Copiapó. Cielos muy claros y secos, intensa radiación solar y ausencia de precipitaciones. Debido a la sequedad de la atmósfera se presentan grandes oscilaciones de temperatura entre el día y la noche. Hacia la cordillera andina se va registrando un paulatino aumento de las precipitaciones.

La agricultura se encuentra marginada a los oasis existentes y valles alimentados por los ríos que descienden de la cordillera.

Refresco Precipitación anual: 9,0 mm
Temp. Media anual: 15,8 °C.

c) **Desierto marginal de altura**

El desierto se suaviza por efecto de la altura. La precipitación aumenta alcanzando valores cercanos a 50 mm, lo que permite el desarrollo de algunos pastos estacionales, sin llegar a ser una estepa. Sobre los 3.000 m de altura la nubosidad se hace frecuente. La temperatura es baja por efecto de la altura.

Potrerosillos Precipitación anual: 61,8 mm
Temp. Media anual: 11,2 °C.

d) **Estepa de altura**

Al continuar subiendo la cordillera andina, la precipitación aumenta y la temperatura desciende. Sobre los 4.000 m la precipitación se hace superior a los 300 mm, lo que permite el desarrollo de una estepa fría semejante a la encontrada en Magallanes, con vegetación muy resistente al frío, como champas, stipas, festucas y coirones, de baja calidad nutritiva y que alcanzan un bajo desarrollo.

Parinacota Precipitación anual: 339,6 mm
Temp. Media anual: 1,4 °C.

e) Desierto marginal bajo

Al Sur de la ciudad de Copiapó el desierto se suaviza al aumentar ligeramente las precipitaciones. La existencia de los primeros valles transversales permite la entrada de la influencia marina hacia el interior. Este hecho, unido a la escasa precipitación, permite la existencia de un matorral rastrero en quebradas y terrenos bajos. Copiapó registra una precipitación de 22 mm anuales y Vallenar 65 mm. Este clima se extiende a los alrededores de Ovalle por el centro.

Considerando las características de esta zona agroclimática, no es posible cultivar sin riego. Bajo riego, esta zona es muy favorable para la producción de frutas y vides, en razón de que las temperaturas máximas son mucho más altas y la amplitud diurna mucho más grande, con lo cual se favorece la maduración de los cultivos y se reduce el peligro de muchas enfermedades de tipo fungoso. Existen lugares en que las heladas son tan excepcionales que pueden cultivarse en pleno invierno, con poco peligro, tomates, zapallitos, pimientos o maíz. También es apta para el cultivo de cereales de invierno, leguminosas de grano, papas, alfalfa, ballicas, tréboles.

Vallenar Precipitación anual: 65 mm

Temp. Media anual: 14,9 °C.

f) Estepa con nubosidad abundante

Por la costa el desierto cede paso a la estepa algo al Sur de la ciudad de Coquimbo y hasta la ciudad de Zapallar aproximadamente. La precipitación va de 150 a 200 mm anuales. Alta frecuencia de nublados y neblinas. La vegetación es una típica estepa con crecimiento de pastos anuales durante la estación húmeda.

La Serena Precipitación anual: 118 mm

Temp. Media anual: 14,9 °C.

g) Estepa con gran sequedad atmosférica

Desde la ciudad de Ovalle hasta algo al Norte de la ciudad de Santiago, cielos muy luminosos y secos. Humedad del aire muy baja. Debido a la luminosidad son climas muy aptos para la producción frutícola cuando existe agua de riego.

Los Andes Precipitación anual: 305 mm

Temp. Media anual: 15,2 °C.

Comportamiento Espacial de las Principales Variables Climáticas de la Zona Norte de Chile

El clima en la tierra ha presentado un incremento de la temperatura media cercano a los 0,6 °C a lo largo de los últimos 100 años (IPCC, 2002; Walther *et al.*, 2002) y los modelos climáticos predicen que las temperaturas continuarán incrementándose como resultado del aumento de la concentración de gases como CO₂ y metano que provocan un efecto invernadero (IPCC 2002).

Esto ha provocado un renovado interés en el clima, en su funcionamiento, variabilidad y distribución espacial, y hace especialmente deseable el ser capaz de estimar el comportamiento en el espacio de las variables climáticas. Los procesos ecosistémicos y la distribución de los organismos son algunos de los muchos aspectos que se sabe están afectados por el clima en la tierra, y, consecuentemente se verán afectados por las variaciones asociadas a la modificación de los patrones climáticos.

Ante un escenario de inminente cambio climático tanto para la agricultura como para la los sistemas naturales resulta de gran interés la estimación con altos niveles de precisión de las variables climáticas en lugares donde no existen estaciones que las registren. Bajo un escenario de cambio climático, la capacidad de adaptación de todo el sistema agronómico será fundamental.

El carácter puntual de la información climática dificulta la elaboración de mapas, frente a la cartografía de otro tipo de variables ambientales de las que sí se dispone de información en todo el territorio. Aunque las variables climáticas sean continuas en el espacio, solamente conocemos los registros en pocos puntos y es a partir de esos pocos puntos, mediante Trazado Experto, Fotos Satelitales y Geoformas, que se han establecido las cartografías al resto del territorio. Así, en los puntos en los que no se dispone de información se ha estimado el valor de la variable climática a cartografiar, siendo en definitiva las cartografías climáticas predicciones que se pretende tengan un elevado grado de ajuste con la realidad.

Las variables climáticas integran factores ambientales y locales que condicionan la distribución y el comportamiento de las especies. La posibilidad de contar con cartografía climática del Norte Grande permitirá tener una visión global del comportamiento de las variables a lo largo de esta área geográfica. Por lo que resulta relevante, generar cartografía temática sobre el comportamiento espacial de las principales variables asociadas a la adaptabilidad bioclimática de la especies vegetales , como: temperatura máxima media mensual de enero, temperatura mínima media mensual de julio, precipitación media anual, periodo libre de heladas anual, suma térmica anual -días-grado- y déficit hídrico anual.

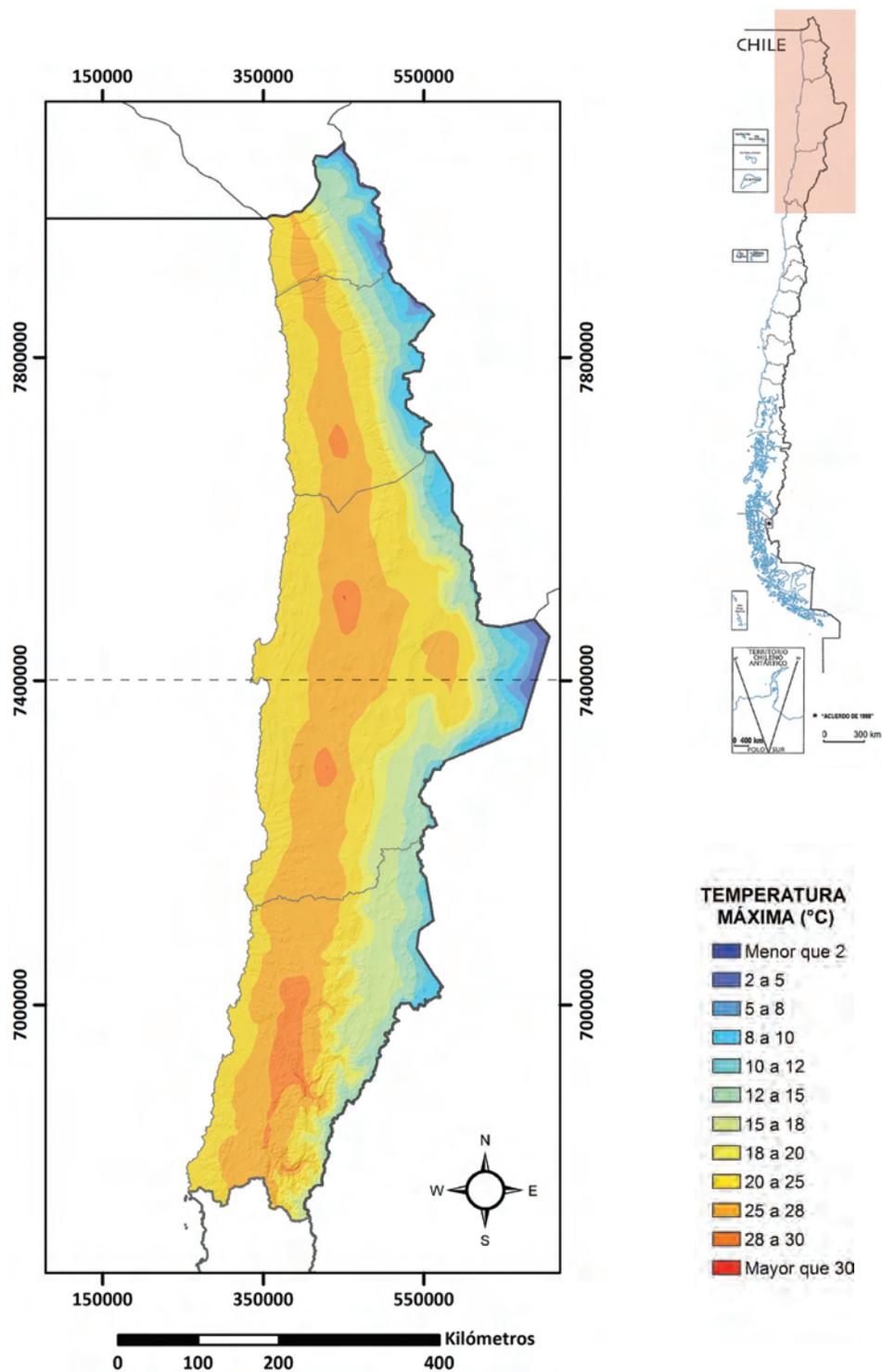
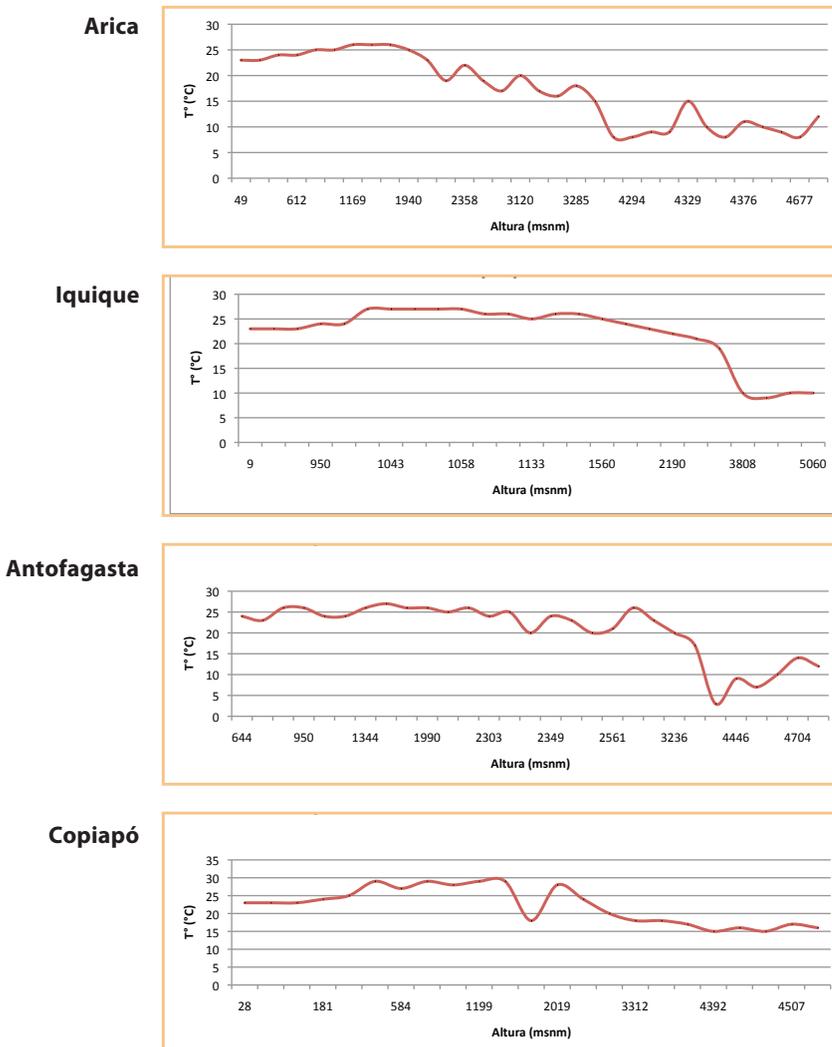


Figura 2. Distribución espacial de la Temperatura Máxima Media Mensual de Enero (Uribe et al, 2012).

El comportamiento espacial de la temperatura máxima media de enero (Figura 2), permite identificar el efecto altitudinal que se manifiesta en la zona, donde se desarrolla un patrón térmico que incide en el incremento de las temperaturas en la zona de interior, alcanzando sobre los 32 °C, lo que se ve favorecido por la baja humedad ambiental y alta transparencia de la atmósfera. Por otra parte, la temperatura disminuye hacia los pisos altitudinales mayores, donde por efecto de altura la energía disponible es menor haciendo descender las máximas. En la zona de la costa, por el efecto moderador térmico del mar, las temperaturas son más bajas o con una menor variabilidad estacional.

Temperatura Máxima Media Mensual



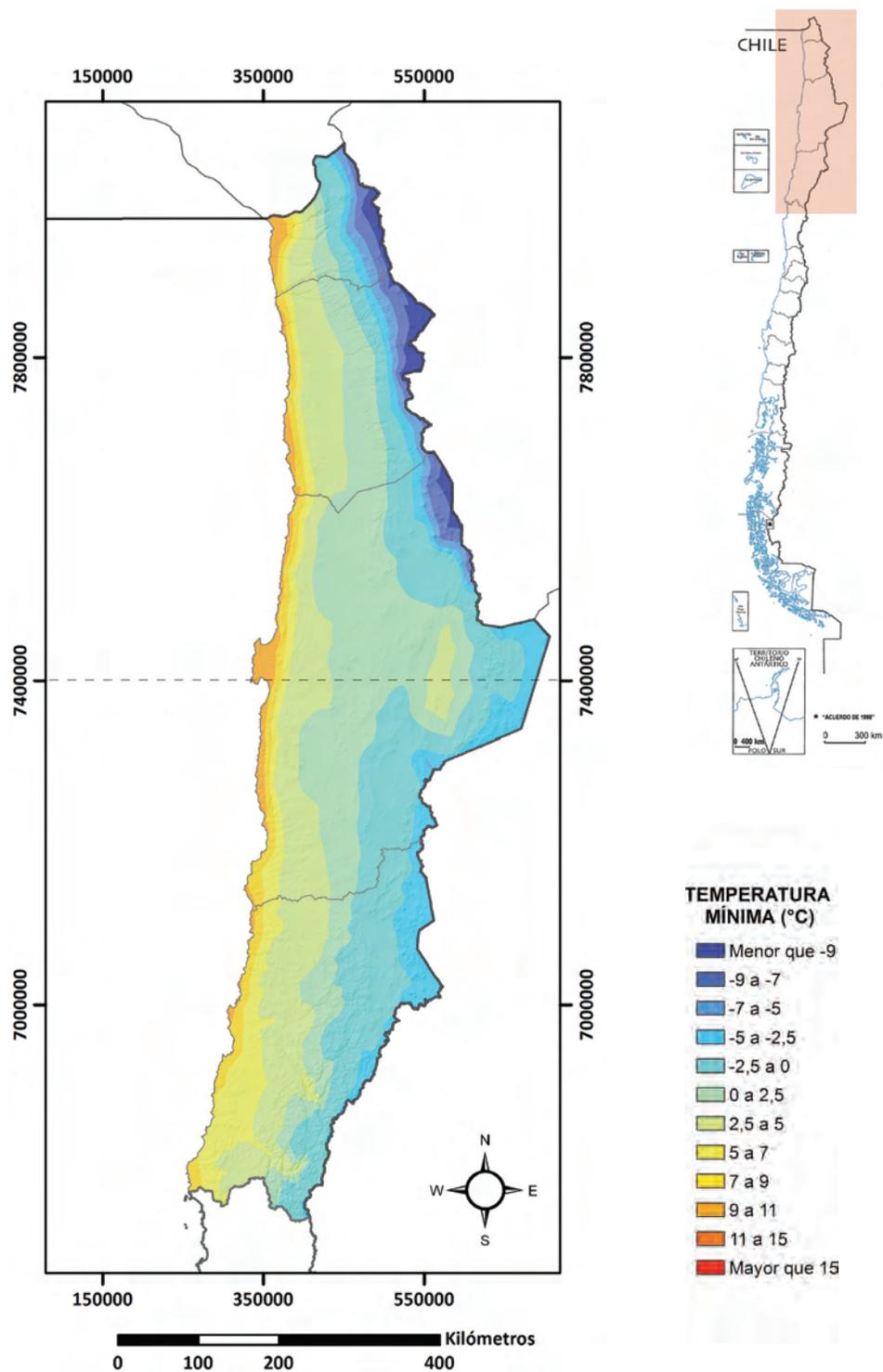
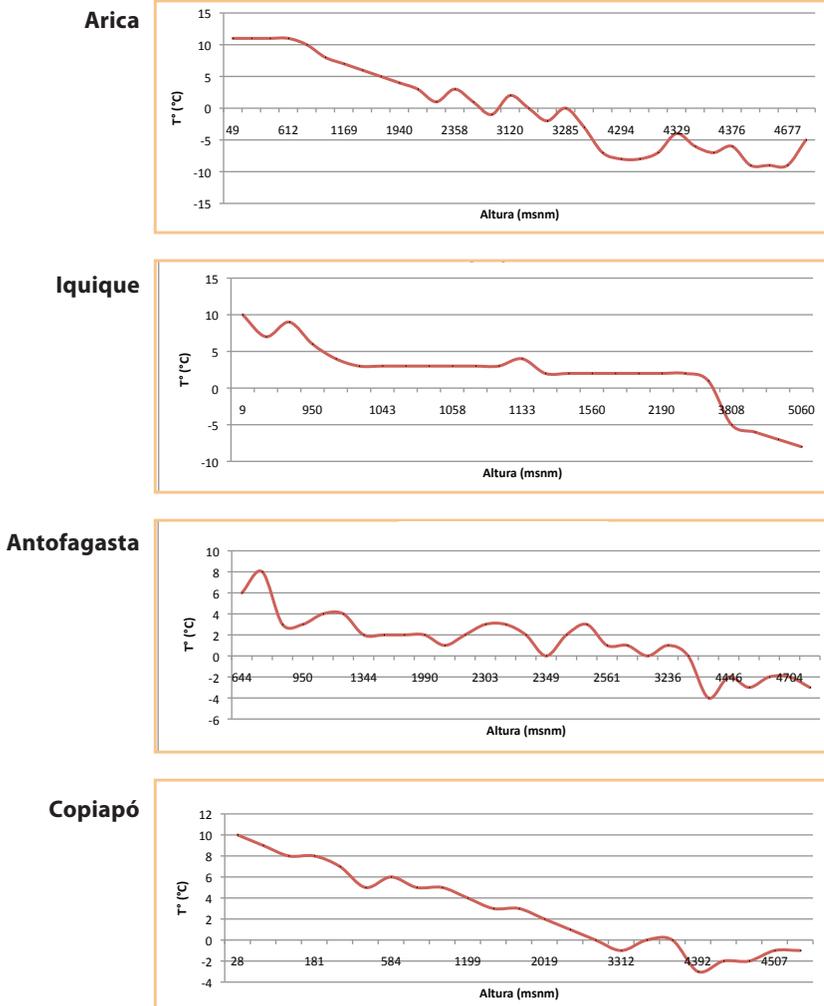


Figura 3. Distribución espacial de la Temperatura Mínima Media Mensual de Julio (*Uribe et al, 2012*).

El comportamiento de la Temperatura mínima media mensual del mes más frío (julio; Figura 3), muestra una variabilidad extrema en relación a los pisos altitudinales. Así, en la zona de la costa se encuentran moderadas por efecto del mar, que aporta calor, elevando los valores mínimos. Hacia el interior se extrema la pérdida radiativa, con cielos muy luminosos y secos y una humedad del aire muy baja, lo que genera regímenes térmicos más fríos en la zonas bajas y protegidas, donde se potencian los procesos de inversión térmica. Por efecto del incremento del piso altitudinal, los regímenes de temperatura descienden por debajo de los 0 °C debido a la pérdida radiativa extrema durante la noche y el menor aporte de calor del suelo. La temperatura mínima es relevante para identificar las áreas más frías y relacionarlas con el fenómeno de heladas, parámetro altamente restrictivo en la adaptabilidad agrobioclimática de un cultivo.

Temperatura Mínima Media Mensual



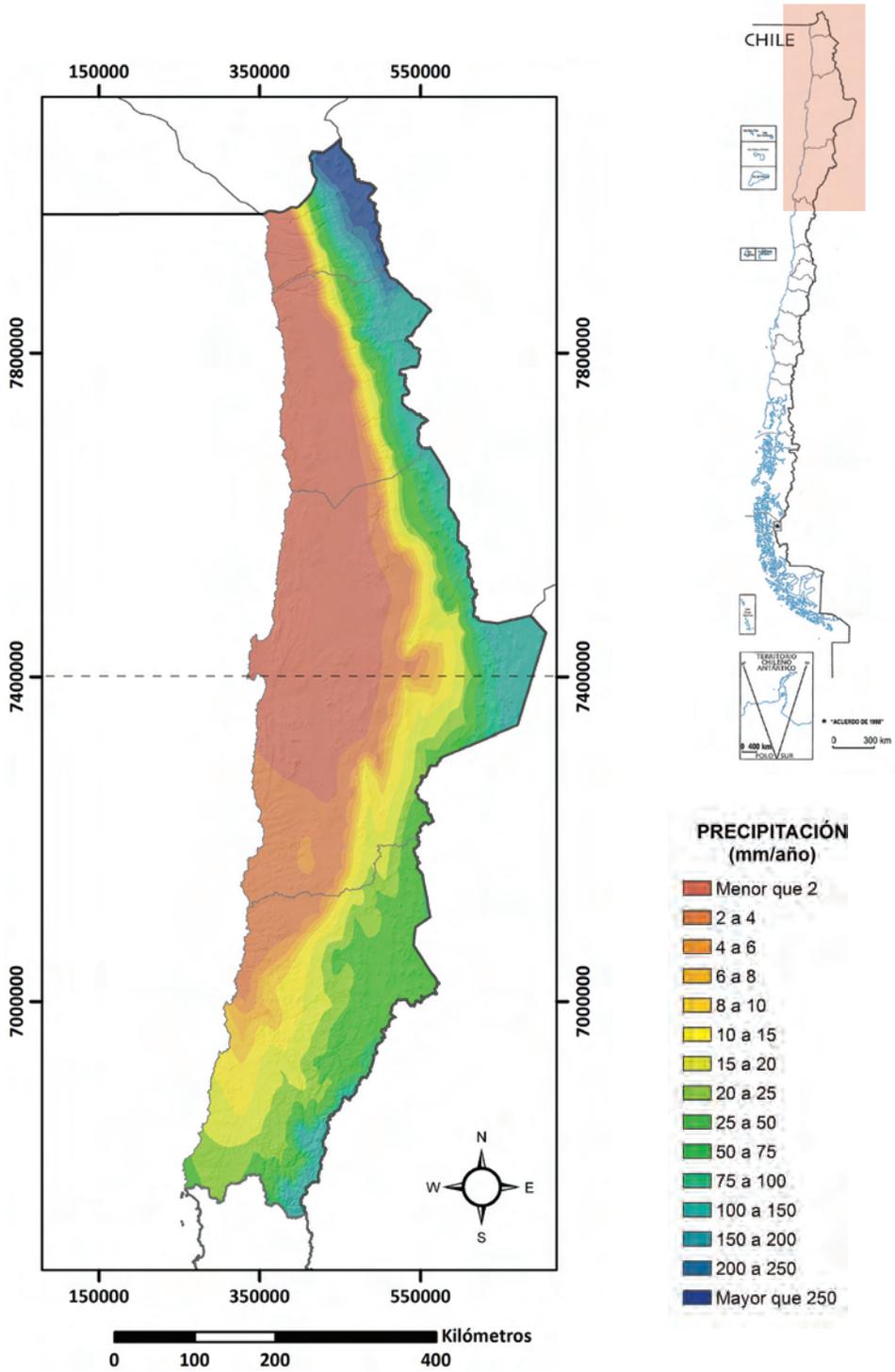
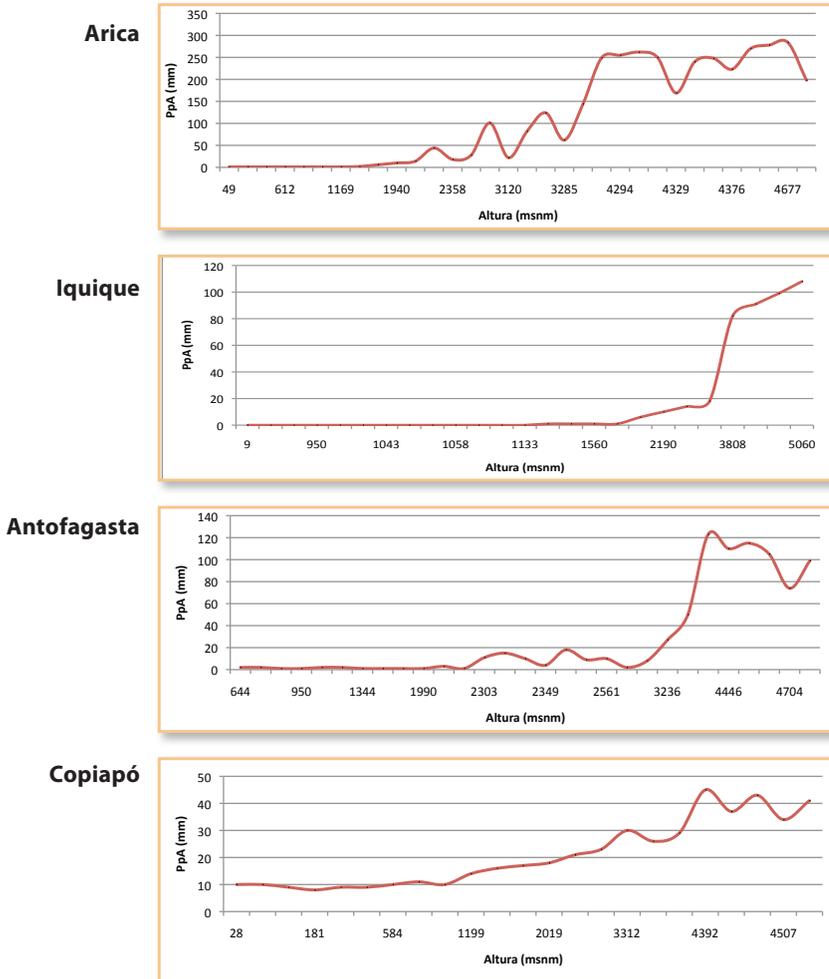


Figura 4. Distribución espacial de la Precipitación Media Anual (Uribe *et al*, 2012).

El comportamiento espacial de la precipitación en la zona (Figura 4), responde claramente a la acción del Anticiclón del Pacífico Sur Oriental, sumado al efecto de las temperaturas más bajas en el mar, que contribuyen a una menor evaporación y consiguientemente un menor aporte a la humedad atmosférica hacia el interior, lo que potencia el efecto secante del Centro de Altas Presiones. Esta variable es relevante para la caracterización del régimen hídrico, pues determina el patrón de la disponibilidad de agua lo que configura, en conjunto con la evapotranspiración de referencia, el grado de aridez o humedad que presenta el clima. El comportamiento de la precipitación recoge la influencia latitudinal y el efecto altitudinal presente en la zona, caracterizado por una nula o escasa precipitación en la costa e interior, incrementando su monto hacia los pisos altitudinales mayores. En particular, se observa un incremento de los montos anuales, por efecto de las precipitaciones estivales, asociadas al llamado fenómeno “Invierno Boliviano” en el altiplano.

Precipitación Media Anual



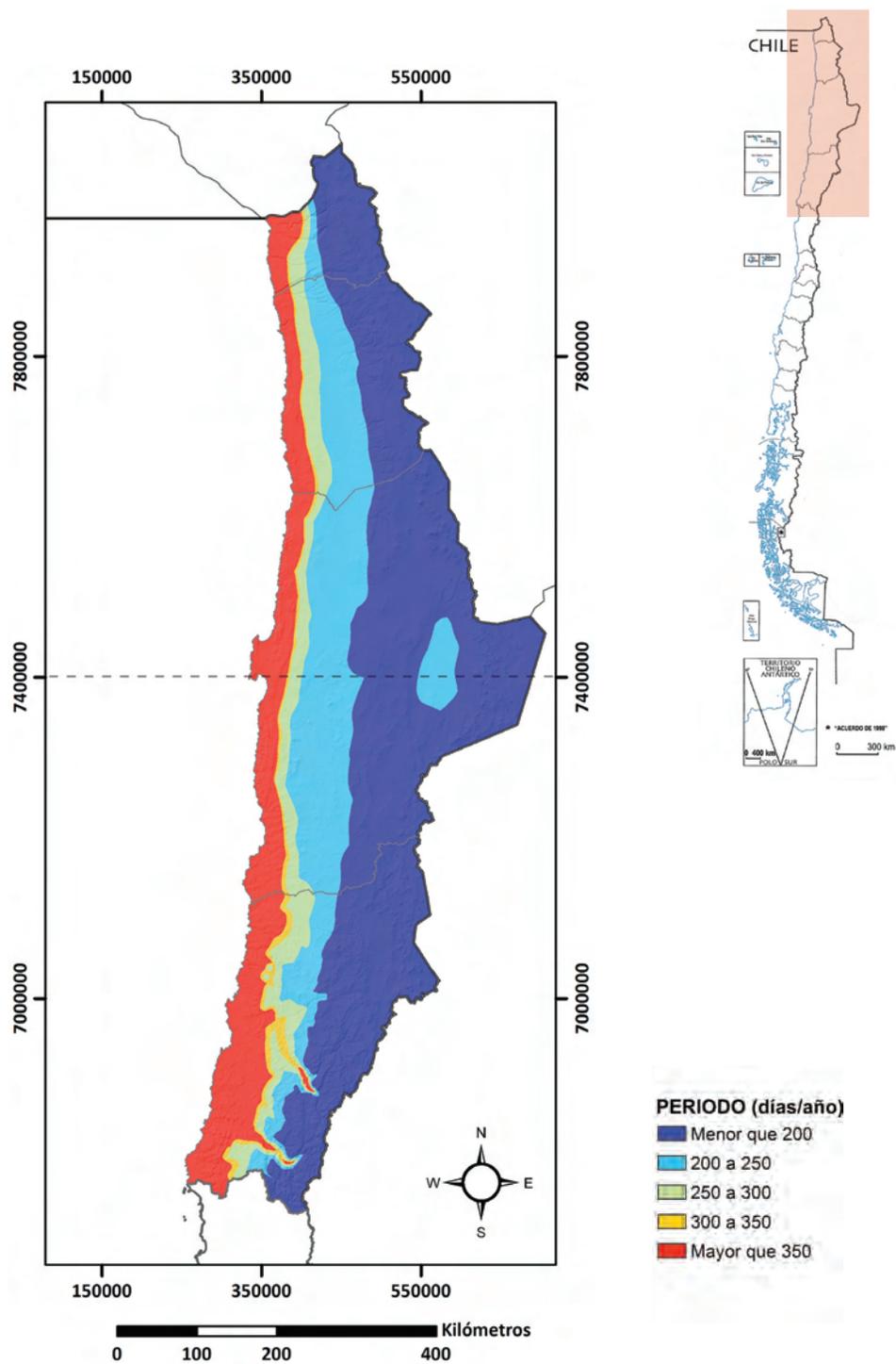
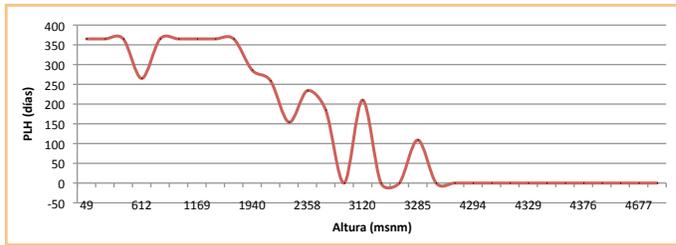


Figura 5. Distribución espacial del Periodo Libre de Heladas (*Uribe et al, 2012*).

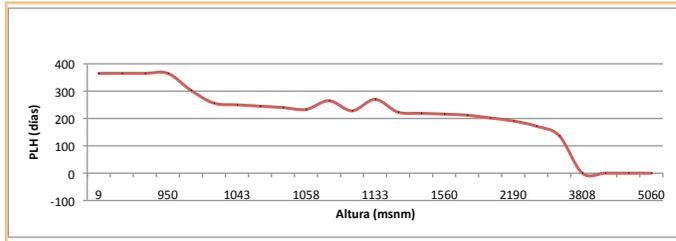
El Periodo Libre de Heladas (Figura 5) representa el número de días al año donde no ocurre un fenómeno de heladas, es decir que la temperatura media del aire no sea de 0 °C. Es una variable dependiente del comportamiento de la temperatura mínima media, por consiguiente se manifiesta en un patrón similar a la variabilidad que este presenta. Por consiguiente, su número se incrementa en la medida que aumenta el piso altitudinal y se generen condiciones que favorezcan la pérdida radiativa durante la noche, se presenta calma ambiental, baja humedad del aire y alta irradiación diurna. Es una variable que determina restricción en los procesos de adaptabilidad climática.

Periodo Libre de Heladas

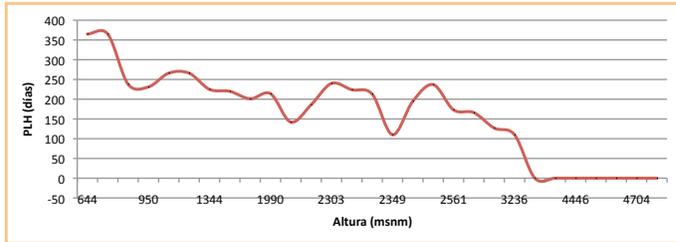
Arica



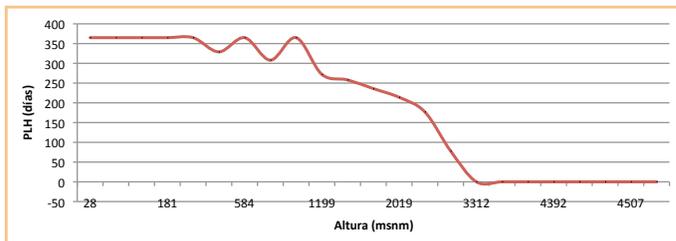
Iquique



Antofagasta



Copiapó



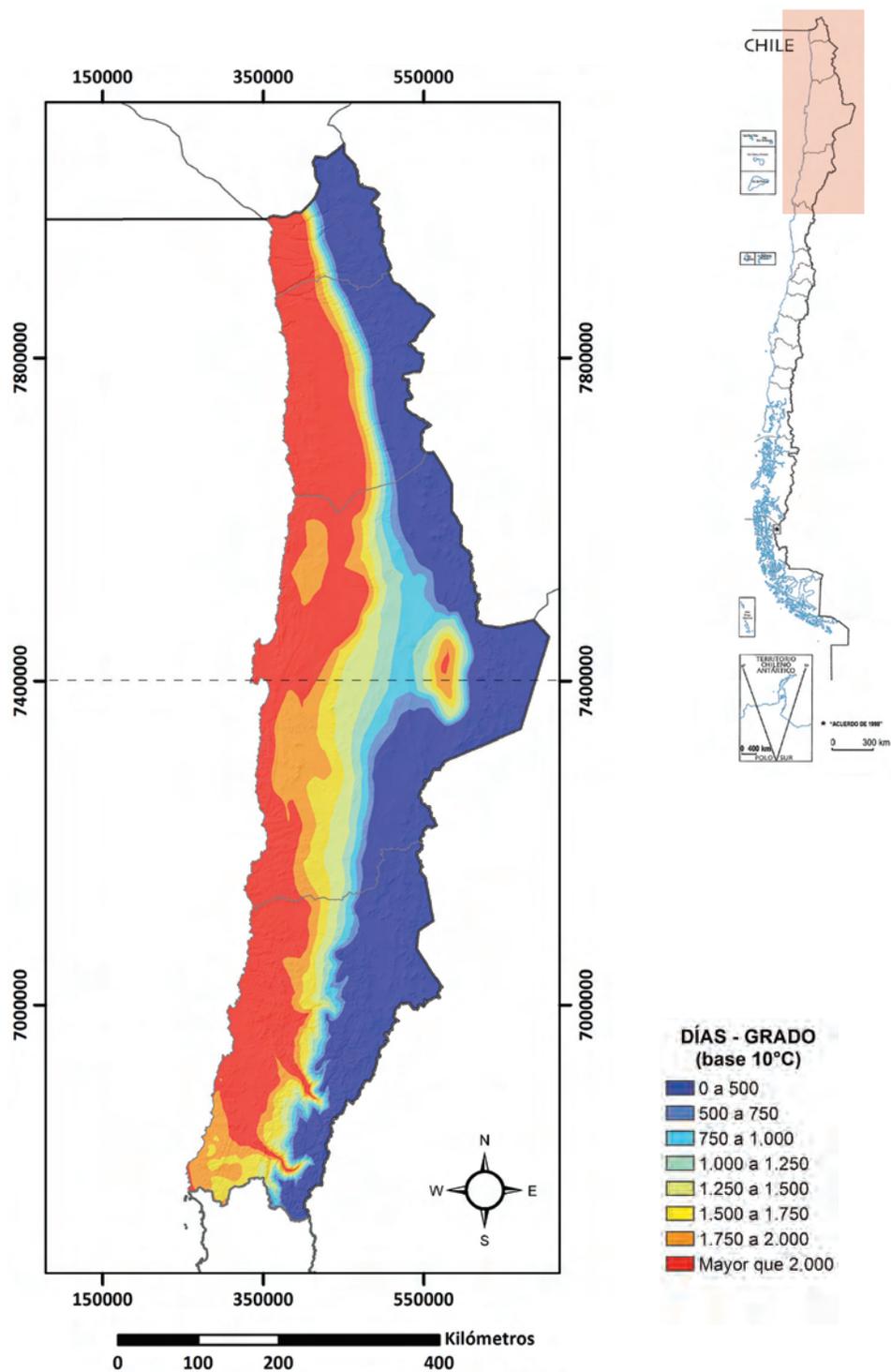
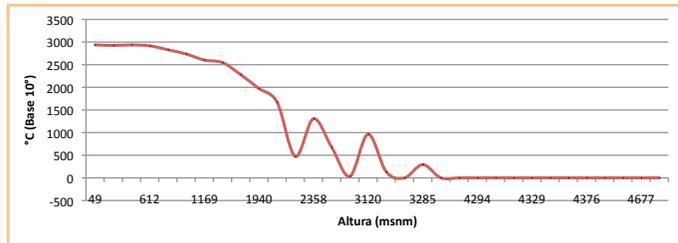


Figura 6. Distribución espacial de la Disponibilidad de Calor en días-grado anuales (Uribe et al, 2012).

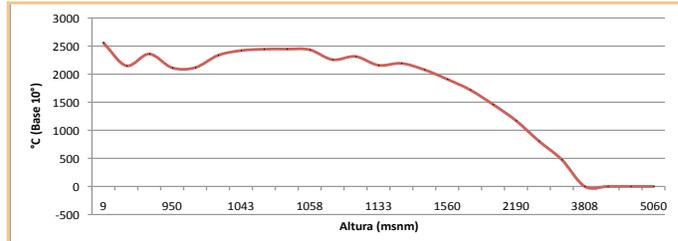
La disponibilidad de calor (Figura 6) está asociada al comportamiento de la temperatura media mensual, y refleja las condiciones que alcanza la temperatura máxima durante el periodo. El comportamiento espacial determina que las zonas de interior que manifiestan condiciones de mayor radiación solar, generan núcleos más cálidos y consecuentemente áreas con disponibilidad térmica en la temporada de primavera-verano. Esta información permite identificar las singularidades térmicas de la zona, reconociendo las áreas de mayor potencial de precocidad o bien de falta de calor para el cumplimiento de los requerimientos térmicos que presentan las diversas especies cultivadas.

Disponibilidad de Calor en días-grado anuales

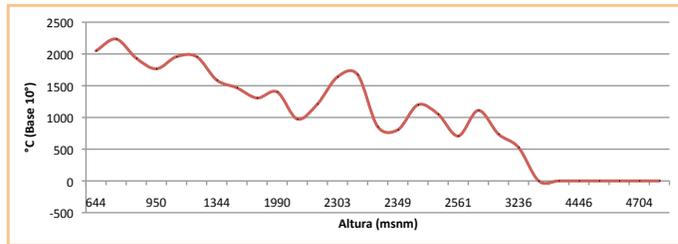
Arica



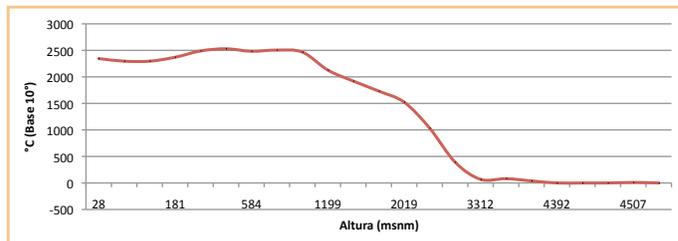
Iquique



Antofagasta



Copiapó



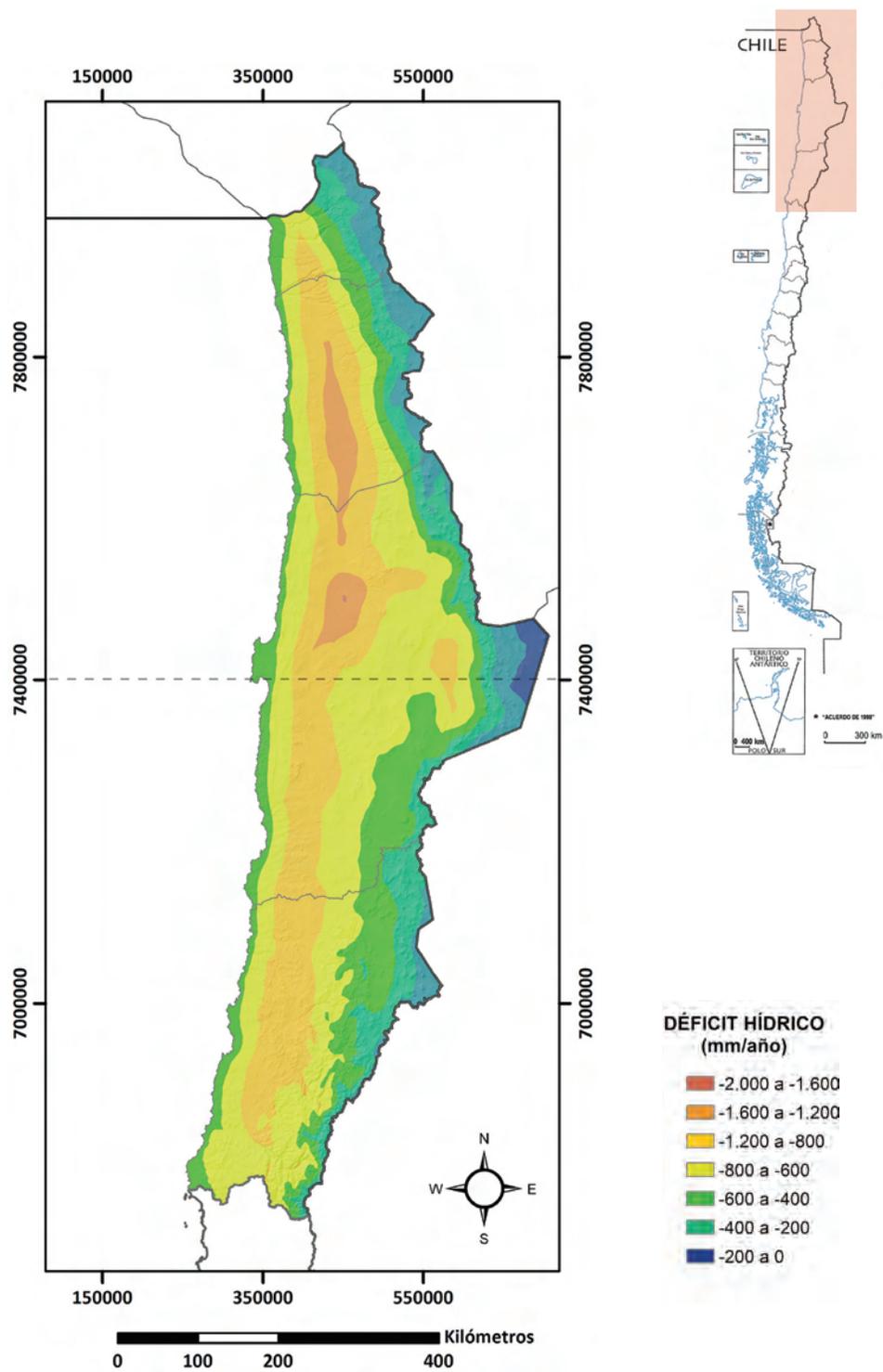
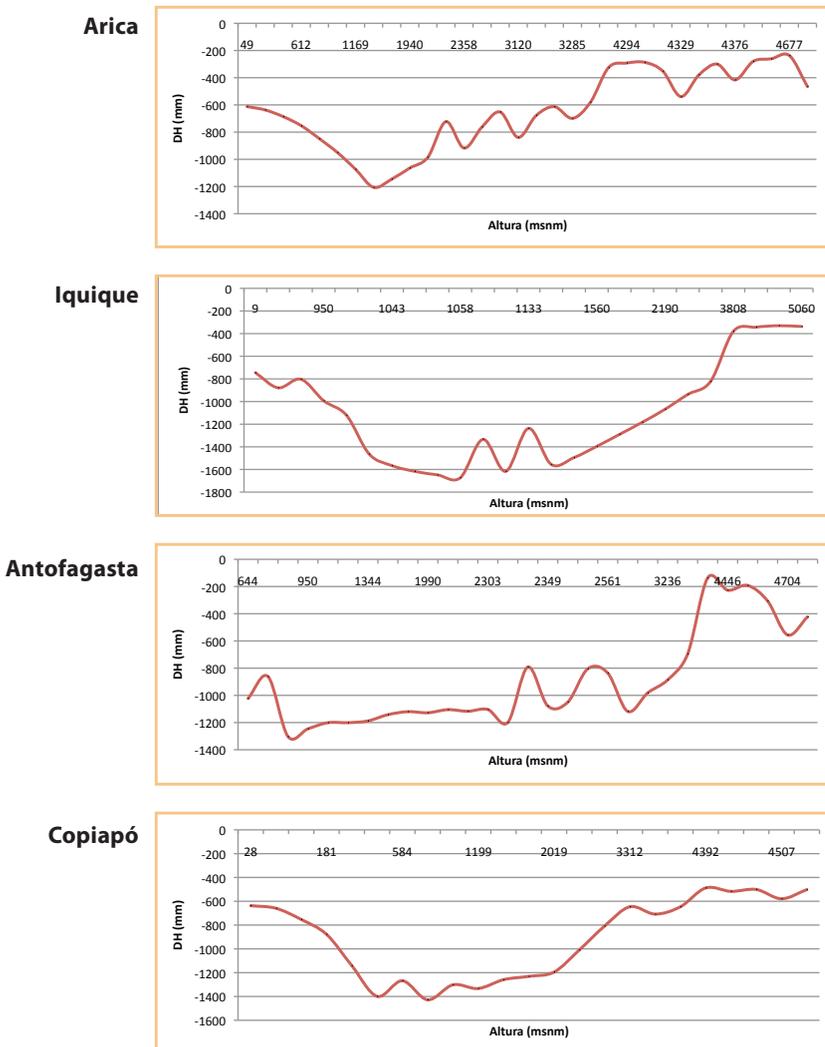


Figura 7. Distribución espacial del Déficit Hídrico Anual (*Uribe et al, 2012*).

El Déficit Hídrico Anual (Figura 7) recoge la información sobre el balance entre la precipitación y evapotranspiración anual, mostrando el comportamiento cuando la precipitación es inferior a la tasa de evapotranspiración. Es un indicador de satisfacción hídrica del clima, permitiendo identificar zonas con marcado déficit de agua donde es necesario almacenar o recurrir a sistemas externos para suplir las necesidades hídricas. Las mayores tasas de déficit de agua se encuentran en las zonas de interior, donde por efecto de las altas temperaturas y altos niveles de radiación solar, se presentan niveles de evapotranspiración elevadas. Este régimen disminuye con la altura.

Déficit Hídrico Anual



1.2. Recurso Suelo Norte Grande

El suelo cumple importantes funciones a nivel ecosistémico y silvoagropecuario, constituyéndose en un patrimonio ambiental necesario de proteger y conservar. Uno de los problemas más importantes que afectan a los suelos chilenos es la erosión, que si bien tiene causas naturales, también es generada y acelerada por la intervención humana. Actualmente, Chile no cuenta con un marco jurídico de protección específico para el suelo, sólo existen funciones, facultades y diversas regulaciones sectoriales que contribuyen indirectamente a su protección (Ministerio del Medio Ambiente, 2011a).

En la macrozona comprendida entre las Regiones de Arica y Parinacota y Atacama existen una serie de aspectos a tener presente para planificar un potencial desarrollo agroforestal, dentro de los cuales se pueden considerar las aptitudes y usos del suelo, asociando fenómenos tales como erosión, desertificación, etc.; las fuentes de abastecimiento hídrico (calidad y cantidad); la ocupación existente y los instrumentos de planificación territorial, normativos e indicativos, como los Planes Reguladores, Seccionales, Planes de Uso del Borde Costero, etc.; las áreas de protección y/o restricción del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) como Parques y Reservas Nacionales, sitios arqueológicos, territorios indígenas, zonas declaradas como Lugares de Interés Científico, Turístico, etc.

Así también se deben tener presente las áreas de exploración y explotación minera; las áreas de peligro vulcanológico, considerando que el Estado se encuentra implementando recientemente una Red de Vigilancia Volcánica a nivel nacional que considera los 43 volcanes más activos del país, dentro de los cuales algunos se encuentran en el Norte Grande (SERNAGEOMIN, 2011); y las áreas fiscales disponibles, reservadas (con fines energéticos, bienes nacionales protegidos, etc.) y administradas (concesiones, arriendos, servidumbres, entre otras figuras de gestión del suelos fiscal; Ministerio de Bienes Nacionales, 2011b).

Actualmente esta macrozona posee una vasta reserva fiscal para acoger diversos emprendimientos; más del 51% del territorio nacional continental, correspondiente a 38,6 Mha está en manos del Fisco y cerca de un 41% de ésta superficie se encuentra disponible (Tabla 1) y ubicada en esta macrozona (Ministerio de Bienes Nacionales, 2011a).

El año 2012, en el marco del denominado "Proyecto Caracterización", ejecutado por el Ministerio de Bienes Nacionales, se ejecutó un Programa Piloto de Caracterización en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama con el propósito de gestionar el patrimonio fiscal con una mirada integrada. Esta planificación territorial, efectuada a través del Instrumento de Análisis Territorial (I-DAT) a escala regional, permitirá viabilizar proyectos -entre otras tantas iniciativas- para la producción de biomasa en el norte del país (Ministerio de Bienes Nacionales, 2011b).

Tabla 1. Territorio Fiscal Disponible por Regiones (Ministerio de Bienes Nacionales, 2011a)

Región	Superficie Total (ha) ⁽¹⁾	Superficie Fiscal (ha)				% Fiscal sobre Superficie Total
		En Administración de Terceros		Disponible	Total	
		SNASPE	Otra administración			
Arica y Parinacota	1.687.330	369.638	98.925	745.604	1.214.167	72
Tarapacá	4.222.580	384.833	353.545	3.113.766	3.852.144	91
Antofagasta	12.604.910	352.498	1.112.387	7.659.692	9.124.577	72
Atacama	7.517.620	150.297	446.567	4.386.092	4.982.956	66
Total	26.032.440	1.257.266	2.011.424	15.905.154	19.173.844	

(1) Incluida Isla de Pascua y Archipiélago Juan Fernández.

En sinergia a lo anterior la Corporación Nacional Forestal (CONAF), en el marco de los compromisos establecidos en los denominados Ocho Objetivos del Milenio, acuerdo suscrito por el país el año 2000 en las Naciones Unidas en orden a Garantizar la Sostenibilidad del Medio Ambiente, ha procurado avanzar decididamente en incrementar la superficie nacional con plantaciones, invirtiendo la pérdida de recursos del medio ambiente y limitando de paso las emisiones de dióxido de carbono a nivel país (Gobierno de Chile, 2010). Como aporte adicional a las acciones de mitigación de los efectos del cambio climático, este organismo también ha evaluado la focalización de los instrumentos de fomento para el sector forestal que contribuyan al combate contra la desertificación.

En los últimos años se tiene una tasa de reforestación de 60.000 ha y se ha desarrollado un sistema para la evaluación física y valoración económica continua de los servicios ecosistémicos proporcionados por las plantaciones bonificadas mediante los instrumentos de fomento aplicados por CONAF (CONAF, 2011).

Además, se evaluaron los indicadores de impacto e indicadores de desempeño de las actividades contempladas en el Programa de Acción Nacional de Combate a la Desertificación para el bienio 2010-2011, donde Chile destaca entre los países de América Latina por el cumplimiento de la implementación de la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (UNCCD).

Descripción de los Suelos

La descripción y clasificación de los suelos, permite identificar el mejor uso de este recurso, estimar su productividad y proporcionar unidades que permitan extrapolar observaciones a partir de su estudio (Luzio, 1997).

Los Suelos de la Cordillera de la Costa, que fisiográficamente ocupan los sectores costeros y las áreas sedimentarias de terrazas marinas de relieve plano (Luzio, 1990; 2010), presentan una gran variabilidad tanto en textura, pedregosidad y profundidad como en color y grado de desarrollo. Una característica común a la mayoría de ellos es su ubicación en pendientes metaestables (Luzio, 2010), a lo que se suma que en la plataforma de abrasión, que se origina en una falla longitudinal de dirección norte-sur, se forma un acantilado que constituye el macizo montañoso costero.

Los suelos que dominan son delgados, muy estratificados, de textura gruesa (arenosa), pudiendo presentar una gran pedregosidad en el perfil debido a su origen coluvial (materiales provenientes de derrumbes). De acuerdo a la clasificación de Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999), estos suelos pertenecen al Gran Grupo Torriorthens y al orden de suelo de los Entisols (Anexo 1).

Se consideran como Suelos de la Depresión Intermedia aquellos comprendidos entre las regiones de Arica y Parinacota y la parte centro norte de la Región de Atacama, y según Rodríguez (1989), corresponden a una enorme llanura desértica entre los 1.000 y 2.500 m.s.n.m.

En las pampas no salinas, presentan un régimen de humedad árido y escaso desarrollo debido precisamente a la aridez, aún cuando es posible encontrar suelos con horizontes cámbico, cálcico y petrocálcico. Son delgados (menores a 50 cm) a moderadamente profundos (51 a 100 cm), de granulometría media a gruesa con estratificación marcada, lo cual determina que pueda existir un incremento de arcilla en el horizonte cámbico que no corresponde a procesos de translocación. Se les clasifica en el Gran Grupo denominado Camborthids (Luzio, 1990; 2010) y en el orden de suelo de los Aridisols.

En el caso de las pampas salinas, constituyen amplias áreas con elevada concentración salina cuyo origen está relacionado con importantes procesos de sedimentación pleistocénicos. En los salares propiamente tales (*e.g.*, Pintados, Bellavista y Zapiga) se encuentra una costra superficial que puede llegar a los 60 cm, extremadamente dura, no soluble en agua y sin efervescencia al ácido clorhídrico. La mayoría de estos suelos corresponden al Gran Grupo Salorthids (Luzio, 1990; 2010).

Los valles que cruzan de este a oeste los suelos son todos de origen aluvial, de texturas gruesas con diferentes grados de salinización y sodificación y caracterizados por marcadas estratificaciones. Aún cuando la superficie que ocupan estos valles es una mínima parte de la superficie desértica total, tienen bastante importancia agrícola, pues constituyen las únicas áreas del desierto que parecen tener alguna utilización agropecuaria. Los principales valles son los de Azapa, Camarones, Lluta, Loa, Copiapó y Huasco (Luzio, 2010).

Los Suelos de Altura comprenden las áreas ubicadas por encima de la cota de los 1.500 m.s.n.m., e incluyen lo que podría llamarse el “Piedmont” de la Cordillera, los cordones montañosos y el altiplano propiamente tal.

En el altiplano la característica dominante es el régimen térmico de los suelos, que se ha considerado como crítico, el cual unido al permanente déficit hídrico ha dado origen a un régimen orgánico de desarrollo débil. De esta manera un gran porcentaje de estos suelos se puede considerar como esquelético, con bajos contenidos de materia orgánica y una profundidad no superior a los 40 cm sobre roca, muy cercanos en su composición a los materiales parentales. Estos suelos se clasifican dentro del Gran Grupo de los Cryorthents (Luzio, 1990; 2010).

A lo anterior se agrega que en numerosos planos y cuencas de deposición se desarrollan suelos formados por sucesivos aportes de sedimentos de muy diferente naturaleza mineralógica, a causa de los arrastres producidos por las lluvias torrenciales de corta duración. De esta forma, estos suelos muestran una clara estratificación producto de estas sedimentaciones, pero mantienen la característica de escaso desarrollo que domina en toda la región, reuniendo a suelos de texturas gruesas con gravas y estructura masiva o de grano simple (Luzio, 2010).

En las regiones de mayor altura hay cuencas cerradas con drenaje restringido donde se han producido procesos de paludización, generando suelos orgánicos y suelos minerales con alto contenido de materia orgánica, conocidos localmente como bofedales, ubicados sobre los 3.000 m.s.n.m. (Luzio, 2010). El contenido de materia orgánica en su superficie es alrededor de 10% y el de carbonatos puede ser alto (22% en las Vegas de Turi) con presencia de costras y eflorescencias. A estos suelos se les ha clasificado como Cryaquepts (Luzio, 1990; 2010) y bajo el orden de suelo de los Histosols (suelos derivados de tejidos vegetales).

Minerales en el Suelo

Los nutrientes del suelo están divididos en dos grupos de acuerdo a la cantidad demandada por la planta (Ronen, 2008). Los macronutrientes son aquellos que son demandados en cantidades relativamente altas, donde el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son considerados macroelementos principales, y el calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) son considerados macroelementos secundarios.

Las micronutrientes son aquellos que las plantas necesitan en cantidades traza, como el hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu), molibdeno (Mo), cloro (Cl), sodio (Na), níquel (Ni), silicio (Si), cobalto (Co) y selenio (Se).

Los elementos que más frecuentemente pueden encontrarse en la solución del suelo en niveles perjudiciales para las plantas son el cloro, el boro y el sodio, sobre todo en zonas áridas y semiáridas, aunque en determinadas condiciones pueden abundar también en regiones más húmedas (Bar, s/a).

En la mayor parte de los suelos el boro se encuentra en cantidades extremadamente pequeñas, oscilando entre 2 y 100 mg L⁻¹ (González, 1994; Navarro y Navarro, 2003) y hasta 150 mg L⁻¹ (Universidad de Chile-SAG, 2006) o 270 mg L⁻¹ (Essington, 2004). Los suelos con cantidades fitotóxicas son escasos y suelen presentarse sólo en las regiones áridas o en zonas regadas con aguas ricas en boro (Navarro y Navarro, 2003). Sin embargo, la mayor parte del boro contenido en el suelo no estaría en forma utilizable para la planta; en este sentido, la forma asimilable (por ejemplo, soluble en agua) sólo alcanza un rango comprendido entre 0,5 y 5 mg L⁻¹ y es suministrada, principalmente, por la fracción orgánica del suelo (Navarro y Navarro, 2003).

Este elemento es esencial para el desarrollo de las plantas siendo su concentración promedio en el tejido vegetal de 20 mg L⁻¹ (Ronen, 2008); participa en el movimiento de fotosintatos, favorece el movimiento del calcio, tiene mucha importancia en el proceso de polinización y fecundación del óvulo, y su carencia puede provocar problemas en el cuajado de los frutos (Bar, s/a).

El boro presente en el suelo es altamente móvil y se lixivia con facilidad. Los factores que influyen en la adsorción de este elemento a las partículas de suelo son su pH, textura, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, humedad y temperatura.

En Chile una de las fuentes naturales de boro más importantes es la ulexita, que se encuentra en salares ubicados a gran altitud sobre el nivel del mar y a veces en zonas de cabecera de fuentes de aguas superficiales, como el Salar de Surire en la Provincia de Parinacota (Figuroa *et al.*, 1998). Esto ha originado en distintos lugares del norte del país valles de uso agrícola "boratados", tanto en sus aguas como en sus suelos, particularmente en la Provincia de Arica (FIA, 2006).

En los suelos la cantidad de cobre es variable pudiendo oscilar por lo general entre 5 y 50 mg L⁻¹ (Navarro y Navarro, 2003), aunque se han descrito valores de hasta 250 mg L⁻¹ (Essington, 2004). Este elemento, cuya concentración promedio en el tejido vegetal es de 6 mg L⁻¹ (Ronen, 2008), participa del proceso de fotosíntesis, y tiene un rol indirecto en la producción de clorofila y en el incremento del contenido de azúcares (Ronen, 2008).

En sitios cercanos a minas y fundiciones de metales es común encontrar extensas áreas con elementos ecotóxicos tales como el cobre. En este caso, la mayoría de las plantas no crecen en estos sitios ya que las altas concentraciones de estos elementos son perjudiciales para su desarrollo. Sin embargo, existe un grupo de plantas denominadas metalófitas que son capaces de desarrollarse en estas condiciones.

Este grupo de plantas incluye a las metalófitas estrictas, aquellas que sólo crecen en sitios contaminados (endémicas) y a las pseudometalófitas, poblaciones tolerantes de especies comunes (González *et al.*, 2008).

Dentro del grupo de las metalófitas, existe un grupo aún más reducido denominado hiperacumuladoras, definidas como especies metalófitas capaces de concentrar metales. En el caso de cobre, estas plantas pueden acumular más de 1.000 mg kg^{-1} del contaminante en su biomasa aérea en base a su materia seca (González *et al*, 2008).

La dinámica del cobre en el suelo se ve afectada por la materia orgánica del suelo, el pH y el contenido de elementos como el fósforo, nitrógeno, hierro, aluminio, zinc y molibdeno, pero a su vez puede combinarse fácilmente con la materia orgánica del suelo originando complejos húmico-cúpricos (Navarro y Navarro, 2003).

Los estudios del comportamiento del cobre en el suelo indican que su solubilidad disminuye ligeramente al incrementarse el pH. De esta forma, el cobre estaría más disponible en medios ácidos, no obstante una acidez fuerte del suelo solubiliza excesivamente el cobre con las posibles pérdidas por lixiviación. En tanto que en medios alcalinos, el cobre es más insoluble, dificultándose su absorción por parte de la planta (Navarro y Navarro, 2003). De acuerdo con Universidad de Chile-SAG (2005), el rango de pH de mayor disponibilidad de cobre en el suelo varía entre 4,5 y 7.

El manganeso en la mayoría de los suelos varía en concentraciones de 200 a 300 mg L^{-1} (Navarro y Navarro, 2003). En Chile se han descrito valores de entre 42 y 600 mg L^{-1} en el rango mínimo y de hasta 5.360 mg L^{-1} en el rango máximo, mientras que el contenido medio se ha observado entre 678 y 998 mg L^{-1} (Universidad de Chile-SAG, 2005).

No obstante lo anterior, la condición general respecto de la disponibilidad para la planta de manganeso será elevada en suelos ácidos (donde su disponibilidad está al máximo) y suelos anegados. En estos últimos suelos, donde dominan procesos de reducción, se podrán observar niveles de toxicidad. En suelos ácidos, el encalado reduciría la solubilidad del manganeso, por ello los suelos se encalan hasta un pH de 5 a 6 para corregir la toxicidad (Navarro y Navarro, 2003).

El manganeso participa en numerosos sistemas enzimáticos y desempeña un papel vital en el proceso de la fotosíntesis y en la respiración celular de la planta. Su concentración promedio en el tejido de la planta es de 50 mg L^{-1} (Ronen, 2008).

La absorción de manganeso por la planta se realiza mediante transporte activo, de manera similar a la absorción de otros cationes como magnesio y calcio. Sin embargo, cuando el metal se encuentra en alta concentración en la solución suelo puede ocurrir absorción pasiva (Kabata-Pendias, 2001). Cuando la disponibilidad de manganeso es elevada en el suelo (e.g. suelos mal drenados, de pH menor a 5,5 o mayor a 8), el manganeso es rápidamente traslocado dentro de la planta a otros órganos, principalmente a los tejidos meristemáticos (Universidad de Chile-SAG, 2005).

El manganeso, bajo el punto de vista de su utilización por las plantas, puede clasificarse en manganeso soluble o activo, y manganeso insoluble. El primero puede encontrarse en la solución suelo como Mn^{2+} , utilizable por la planta, adsorbido en la fracción coloidal, fácilmente intercambiable, y como Mn^{3+} bajo la forma de óxidos, muy activos y fácilmente reducibles a pH 7; y el segundo, puede presentarse como Mn^{2+} , Mn^{3+} en óxidos de fórmula Mn_3O_4 , poco activo y no reducible a pH 7, aunque sí a pH 2 y bajo la forma MnO_2 como Mn^{3+} , prácticamente inerte a efectos de su absorción por la planta, pero que constituye la reserva edáfica del manganeso.

La disponibilidad para la planta de manganeso será elevada en suelos ácidos, donde su disponibilidad es máxima, y en suelos anegados. En estos últimos suelos, donde dominan procesos de reducción, se podrán observar niveles de toxicidad. En suelos ácidos, el encalado reduciría la solubilidad del manganeso, por ello los suelos se encalan hasta un pH de 5 a 6 para corregir la toxicidad (Navarro y Navarro, 2003).

El contenido de molibdeno en el suelo pueden variar entre 0,1 y 300 $mg\ L^{-1}$ siendo lo más común encontrar valores entre 1 y 10 $mg\ L^{-1}$ (Navarro y Navarro, 2003; Universidad de Chile-SAG, 2006). Este microelemento es esencial para la absorción de nitrógeno por la planta permitiendo su crecimiento. Su concentración promedio en el tejido de la planta es de 0,1 $mg\ L^{-1}$ (Ronen, 2008).

Al contrario como ocurre con otros microelementos (e.g. Fe, Mn, B, Cu, Zn), el molibdeno se hace cada vez más disponible (soluble) al aumentar el pH, asociándose principalmente a compuestos orgánicos e hidróxidos de hierro (Universidad de Chile-SAG, 2005), siendo casi inaprovechable en suelos fuertemente ácidos.

El molibdeno reacciona con los minerales del suelo como silicatos y compuestos de hierro y aluminio. El contenido en el suelo de óxidos de hierro y aluminio, aumenta la retención de molibdeno. Su adsorción aumenta cuanto mayor es el contenido de estos óxidos y el pH es bajo (Navarro y Navarro, 2003).

La concentración de MoO_4^{2-} , forma asimilable para la planta, se incrementa unas 100 veces por cada unidad de aumento de pH. Si el pH se encuentra entre 5 y 6, la especie dominante de molibdeno es MoO_4H^- , mientras que a pH menor que 5 la forma no ionizada y el catión MoO_4^{2+} son predominantes. Esto explica que en los suelos alcalinos las deficiencias de molibdeno no se presenten y que los suelos ácidos, al encalarse, se incrementa el contenido de molibdeno asimilable.

Algunos estudios han demostrado que, en la medida que aumenta la humedad del suelo, independiente de su textura, la disponibilidad de molibdeno tanto en el suelo como en la planta aumenta. Además, tiende a acumularse en ausencia de sulfatos (Universidad de Chile-SAG, 2005).

El encalado de los suelos ácidos aumenta, por lo general, el aprovechamiento del molibdeno (Buckman y Brady, 1977). No obstante, la dinámica de este elemento en el suelo no está perfectamente establecida y se asume que la mayor parte del molibdeno se encuentra en un estado no disponible para las plantas. En este sentido se ha demostrado que un 10% del molibdeno del suelo se encuentra en forma asimilable, registrándose valores inferiores a $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de molibdeno útil en la solución suelo.

Entre los factores determinantes de la disponibilidad de molibdeno en el suelo se encuentran el pH y los contenidos de óxidos de hierro, aluminio y titanio. Otros factores como el contenido de materia orgánica o elevadas cantidades de sulfatos y fosfatos son de menor importancia (Navarro y Navarro, 2003).

El sodio (Na) tiene un efecto perjudicial sobre los cultivos y en la mayoría de los casos es indirecto, debido a la influencia negativa que tiene este catión sobre la estructura del suelo. El sodio desplaza al calcio y al magnesio del complejo arcillo-húmico, provocando así la dispersión de las partículas del suelo, lo que acarrea el desmoronamiento de su estructura. Este sustrato pierde su capacidad de aireación y su conductividad hídrica produciéndose la alcalinización del suelo y aumentando el pH por encima de 8.5 (Bar, s/a).

Para la mayoría de las plantas cultivadas no se ha demostrado que este elemento sea esencial, aunque se sabe que puede reemplazar al potasio en algunos casos. Muchas plantas cuentan con mecanismos que reducen la absorción y la translocación del sodio a las hojas, por lo que no es común que aparezcan síntomas de toxicidad en éstas, ya que se acumula en tallos, troncos y raíces. El exceso de sodio puede provocar deficiencias de otros cationes, como potasio, calcio y magnesio (Bar, s/a).

La sodicidad o alcalinización se desarrolla cuando en la solución del suelo existe una concentración elevada de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina de tipo carbonato o bicarbonato de sodio. Como consecuencia, el medio se alcaliniza progresivamente alcanzando niveles de pH elevados (entre 9 y 10 incluso; Ibañez, 2004). Se afectan las propiedades físico-químicas del suelo, las arcillas sódicas y el humus se dispersan y los agregados estructurales del suelo se destruyen.

El diseño y planificación de proyectos agroforestales, incluye el análisis y evaluación de la composición de las sales del suelo a través de un análisis químico de la solución de este sustrato, pues cualquier elemento puede convertirse en tóxico para la planta si su concentración en la solución es alta o si se encuentra en desequilibrio con otros elementos.

La disponibilidad de los elementos químicos en el suelo, esenciales o no, depende de muchos parámetros como el pH, el drenaje y potencial de óxido-reducción, la especie vegetal, la interacción con otros elementos y la presencia de materia orgánica (MO) y arcillas; la estimación indirecta de la disponibilidad de estos elementos es un ejercicio necesario para determinar la biodisponibilidad de los minerales para las plantas.

Entre los problemas asociados a la calidad del suelo para fines agroforestales se puede mencionar la Salinidad, cuyos efectos se podrían agrupar bajo tres aspectos diferentes: relaciones hídricas, balance de energía y nutrición (Martínez-Raya, 1996).

Las concentraciones de sales solubles elevan la presión osmótica de la solución del suelo. De esta forma, cuando la concentración salina de la solución del suelo es superior a la del jugo celular de las plantas, el agua tenderá a salir de éstas últimas e igualar las presiones osmóticas de ambas. Por tanto, se produce una sequedad fisiológica en los suelos salinos aunque exista una humedad elevada, y en consecuencia, las plantas sufren estrés hídrico, se secan y acaban muriendo (Hillel, 1998; Ridder y Boonstra, 1994; van Hoorn y Alphen, 1994).

El balance de energía no describe completamente todos los efectos perjudiciales de la salinidad, ya que en ocasiones las plantas no sufren estrés hídrico sino que disminuyen considerablemente su altura. Al aumentar la presión osmótica de la solución del suelo, las plantas se ven obligadas a una adaptación osmótica de sus células para poder seguir absorbiendo agua. Esta adaptación requiere un consumo de energía que se hace a costa de un menor crecimiento, se produce un engrosamiento prematuro de las paredes celulares y se limita el crecimiento de la planta de forma irreversible (Hillel, 1998; Ridder y Boonstra, 1994; van Hoorn y Alphen, 1994).

En el aspecto nutricional, se producen una serie de importantes modificaciones debido a las variaciones de pH que afectan a la disponibilidad de los nutrientes del suelo y a las interacciones ocasionadas por la presencia en exceso de determinados elementos en este sustrato. La presencia en exceso de ciertos iones puede provocar toxicidad debido a su acumulación en distintas partes de las plantas, como las semillas, los tallos y las hojas. Los más significativos en este aspecto son los cloruros, el sodio y el boro, afectando con mayor incidencia a los cultivos pluri anuales (Hillel, 1998; Ridder y Boonstra, 1994; van Hoorn y Alphen, 1994).

Otro inconveniente para la agroproducción es la Sodicidad o alcalinización del suelo, que se desarrolla cuando en la solución suelo existe una concentración elevada de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina, de tipo carbonato y bicarbonato de sodio.

Cuando el suelo se sodifica los coloides orgánicos y minerales se dispersan y se produce una migración de ellos dentro del perfil de suelo. Los coloides orgánicos se mueven hacia arriba con el agua y se acumulan en la superficie del suelo dando una coloración "negra aceitosa" de los suelos sódicos, lo que provoca que se absorba más calor y se modifique la temperatura del perfil.

Los coloides minerales emigran hacia abajo del perfil y se causa taponamiento de los poros, lo que modifica la permeabilidad del suelo afectando el movimiento del agua, el aire, la densidad aparente, la estabilidad de los agregados, el manejo mecánico y se forman costras que impiden la germinación de las semillas. Todos estos factores están íntimamente ligados con los cambios de estructura producidos por el sodio, y como consecuencia, se producen cambios en la permeabilidad del suelo.

En los suelos sódicos es el sodio el que causa la toxicidad, la que se pueda categorizar en tres vías distintas: efecto nocivo del sodio activo para el metabolismo y nutrición de las plantas; toxicidad debida a los bicarbonatos y otros iones; y elevación del pH a valores extremos por acción del carbonato y bicarbonato sódicos. En resumen, las sales sódicas presentan una toxicidad muy alta y además su efecto adverso se ve aumentando por el elevado pH que originan (9,5 a 10,5; Ibañez, 2004)

En términos generales, respecto de la relación salinidad-sodicidad, es más común que la salinidad del suelo sea más perjudicial para las plantas, mientras que la sodicidad sea más perjudicial para el suelo.

El principal efecto de la salinidad sobre las plantas se manifiesta a través de su deshidratación debido al aumento de la presión osmótica del agua del suelo por el aumento en la concentración de sales en este sustrato. Así, la menor disponibilidad hídrica del suelo provocará una baja germinación, una menor absorción de nutrientes y, en consecuencia, un crecimiento disminuido en las plantas. Por otra parte, el exceso de sodio se manifiesta en las propiedades físicas del suelo.

La condición física de un suelo sódico puede verse agravada cuando se presenta una baja salinidad, puesto que se presenta una pérdida de su estructura, un aumento de la densidad aparente y una reducción de la porosidad total del suelo.

Algunos autores han estudiado la alternativa de regar cultivos tradicionales con agua salina. Esta posibilidad, sin embargo, depende de condiciones específicas relacionadas al cultivo, las propiedades del suelo, el manejo del riego, prácticas culturales y factores climáticos (Rhoades, s/a). En este sentido, para evaluar el potencial peligro de salinizar y/o sodificar se deben considerar parámetros como la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS) del agua de riego y del suelo.

La tasa de infiltración se ve drásticamente reducida cuando la RAS es elevada y la CE es baja. Mientras que, en la medida que la CE del suelo es mayor y pese a que la RAS puede ser alta, la tasa de infiltración no se ve reducida. Esto indica que la presencia elevada de sodio en los suelos puede afectar de forma importante la infiltración del agua en el suelo. Por lo tanto, mientras mayor sea la RAS y menor la salinidad, mayor es la reducción en la conductividad hidráulica del suelo (Sadzawka, 2006).

Bauder *et al.* (2004), indican que cuando el riesgo por sodio es bajo (RAS 1 - 9), el agua debe aplicarse con cuidado en cultivos sensibles al sodio. Por otro lado, cuando el riesgo es medio (RAS 10 - 17) se debe aplicar enmiendas como yeso y lavado, mientras que cuando el riesgo es alto (RAS 18 - 25) el agua no es para uso continuo. Por último, cuando el riesgo es extremadamente alto (RAS > 26), el agua no debería aplicarse. La toxicidad por sodio puede ser mayor cuando el agua es aplicada mediante riego por aspersión. El efecto nocivo de la aplicación de agua por esta vía se debería a que el agua en la hoja se seca y las sales se concentran sobre ella.

En resumen, si la RAS del agua de riego es alta, el riesgo de sodificación del suelo puede ser mayor y por lo tanto, la infiltración es menor cuando la CE del agua es baja. Sin embargo, sobre este mismo principio la distorsión en las propiedades físicas del suelo, por el exceso de sodio en el complejo de intercambio, puede ser contrarrestada por una concentración suficientemente alta de sales (Levy, 2000).

En relación a la introducción de especies para la producción de biomasa la macrozona norte del país, los contenidos totales de metales reportados para este territorio, así como los rangos asociados a otros parámetros de calidad de suelo presentados en esta descripción, pueden ser considerados en lo sucesivo como valores de referencia para el análisis de la información a estos fines (Anexo 2).

El manejo de suelos para enfrentar la salinidad y sodicidad, considera el lavado de sales -que supone el lavado de las sales solubles luego de un riego abundante- lo que permite que los elementos minerales que dan origen a estas condiciones se transporten a horizontes más profundos a los explorados por las raíces de las planta o se evacúen a otras zonas por medio de drenes.

En el caso de suelos sódicos el proceso de mejoramiento puede llevar años si la estructura del suelo fue dañada, por lo que se debe controlar continuamente la composición de las sales del suelo cuando existe peligro de sodificación (Bar, s/a). Los medios que se emplean para la enmienda de suelos sódicos son físicos y químicos y están encaminados a mejorar la estructura del suelo. Para ello, generalmente se deben combinar dos o más de los siguientes métodos (Bar, s/a):

Para ello, generalmente se deben combinar dos o más de los siguientes métodos (Bar, s/a):

- Siembra de especies tolerantes para mejorar la capacidad de infiltración.
- Asegurar drenaje apropiado, también subterráneo si es necesario.
- Aplicaciones de materia orgánica para mejorar la estructura del suelo.
- Aplicaciones de azufre para reducir el pH.
- Aplicación de yeso (SO_4Ca) para intercambiar el Na^+ por el Ca^{2+} .

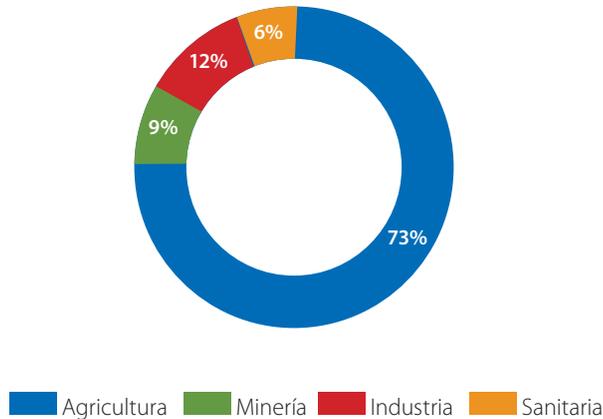
Finalmente, existen cultivos más tolerantes que otros a la salinidad (o pueden existir mejoras genéticas al respecto), sin embargo cada respuesta específica debe evaluarse localmente debido a que el clima y el tipo de suelo influyen notablemente la respuesta de las plantas a las condiciones edafoclimáticas (INIA, 1996).

1.3. Recurso Hídrico Norte Grande

Chile registra importantes avances para resguardar la salud de las personas y la conservación del medio ambiente, pero aún sigue pendiente el desarrollo de una visión más integral para la gestión de los recursos hídricos, en términos de disponibilidad, calidad, conservación y servicios ecosistémicos asociados (Ministerio del Medio Ambiente, 2011b). Nuestro país cuenta con 1.251 ríos, los que se emplazan en las 101 cuencas principales existentes en el país, de éstos, 21 ríos principales y 11 cuencas se ubican en la macrozona norte entre las regiones de Arica y Parinacota, y Atacama (Salazar, 2003).

El sector agrícola es el principal usuario de agua y representa el 73% de las extracciones a nivel nacional; la minería y los usos industriales comparten el siguiente nivel de importancia (Gobierno de Chile, 2012b). Actualmente el uso del agua en el país alcanza los $4.710 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, de los cuales el 89% corresponde a uso no consuntivo¹, siendo la hidroelectricidad la que efectúa la mayor utilización de este tipo (Figura 8). El grado de competencia entre estos usos varía a lo largo del país y es particularmente agudo en las áreas norte y central, donde desde mediados del siglo XX toda el agua superficial ya ha sido asignada (Gobierno de Chile, 2012b).

Figura 8. Distribución de los Usos Consuntivos del Agua (Gobierno de Chile, 2012b).



¹ Uso No Consuntivo (o No Extractivo): corresponden a los usos que ocurren en el ambiente natural de la fuente de agua sin extracción o consumo del recurso. Uso Consuntivo (o Extractivo): son los que extraen o consumen el agua de su lugar de origen (ríos, lagos y aguas subterráneas).

Dentro del contexto mundial Chile podría ser calificado como un país privilegiado en materia de recursos hídricos, sin embargo, estos valores enmascaran una realidad muy distinta cuando se analiza la disponibilidad de agua a nivel regional.

Si bien en regiones al sur de Santiago la disponibilidad media del agua está por sobre los 10.000 m³ año⁻¹ por habitante, desde la Región de Arica y Parinacota a la Región Metropolitana el promedio de agua disponible es sólo de 800 m³ año⁻¹ por habitante, por debajo de la media mundial y del mínimo recomendado para asegurar un desarrollo sostenible, Figura 9 (Gobierno de Chile, 2012b).

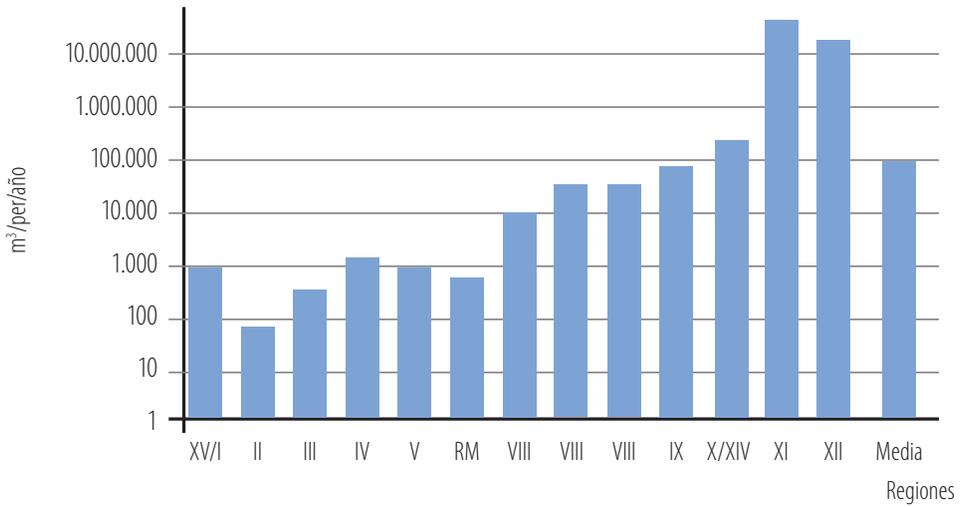
En las regiones del norte de Chile, la minería extrae menos de 12 metros cúbicos por segundo, lo que se compara con los casi 40 metros cúbicos utilizados por las empresas de agua potable y los 170 metros cúbicos de la agricultura. El problema es que la minería está concentrada en su gran mayoría en el árido extremo norte del país, lo que significa que es un importante consumidor justo donde los suministros son más escasos. En la Región de Antofagasta, donde la agricultura es insignificante, el sector corresponde a casi dos tercios del consumo de agua. Con el agua ya en baja provisión, la industria minera se ha esforzado con cierto éxito en mejorar la eficiencia, reutilizando el agua una y otra vez para minimizar la extracción. Según la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO, 2007), la industria minera usó apenas 0,79 de metro cúbico de agua para procesar 1 tonelada de mineral en el año 2006, un 28% menos que los 1,1 metros cúbicos del año 2000.

La demanda de agua para fines productivos y sanitarios, entre la Región de Arica y Parinacota, y la Metropolitana, supera con creces la disponibilidad de este recurso. En el norte de Chile se observa un déficit en la disponibilidad de agua comparado con la demanda, que en algunas regiones es cercano al 100% (Figura 10). Se debe tener presente que al año 2012 a nivel país existen 108 comunas que se encuentran en emergencia agrícola por efectos de la escasez hídrica y 12 han sido declaradas zona de catástrofe, siendo el gasto del Estado en mitigación a esa fecha de MM\$ 15.000.

Actualmente existe un sobre otorgamiento de derechos de agua en la macrozona norte (Figura 11) y es posible advertir que desde la Región Metropolitana hacia el norte se localizan las áreas con limitaciones a la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento. Así también existe un conjunto de áreas (e.g. ríos Lluta, Lauca, Loa, Huasco, entre otros) para las cuales tampoco existe libre disponibilidad para otorgar derechos, es decir la disponibilidad aún cuando existe, es restringida y se requiere de evaluaciones más detalladas para determinarla con mayor precisión (Salazar, 2003).

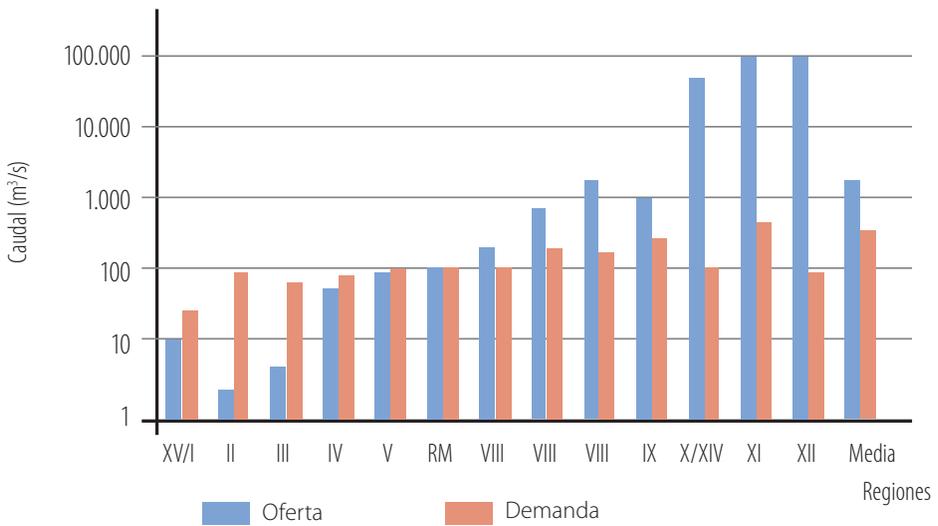
La contaminación de aguas superficiales, desde la Región de Arica y Parinacota, hasta la Metropolitana, limita la disponibilidad de recursos hídricos y la magnitud relativa de las extracciones, la capacidad de dilución de contaminantes es baja y se tiene, a pesar de la capacidad de autopurificación, una mayor vulnerabilidad frente a los procesos de contaminación (Peña y Salazar, 1993).

Figura 9. Disponibilidad de Agua en Chile por Habitante (Gobierno de Chile, 2012 b).



Región	XV/I	II	III	IV	V	RM	VI	VII	VIII	IX	X/XIV	XI	XII	MEDIA
m³/per/año	854	52	208	1.020	525	801	6.829	23.978	21.556	49.273	136.207	2.993.585	1.959.036	53.953

Figura 10. Oferta y Demanda de Agua en Chile (Gobierno de Chile, 2012b)



Región	XV/I	II	III	IV	V	RM	VI	VII	VIII	IX	X/XIV	XI	XII	MEDIA
Oferta	10	2	5	45	85	100	170	700	1.500	1.000	6.000	10.000	10.000	1.500
Demanda	20	80	60	65	100	100	100	150	140	200	100	450	90	300

La medición de la contaminación de aguas subterráneas, en diferentes cauces de valles del norte del país, asociados a la actividad agrícola, muestran procesos de salinización. Un ejemplo de aquello se observa en el Valle de Azapa, donde la incorporación de nuevos suelos al riego desde los años 60 ha sido acompañada de un incremento sostenido de la concentración de sales en las aguas subterráneas.

La Dirección de Obras Hidráulicas, en materia de inversión pública para la gestión del recurso hídrico, ha dispensado una cantidad significativa de recursos en la gestión de la sequía, la construcción de embalses y en obras de control aluvional (MOP, 2012). Resulta estratégico en este ámbito tener presente la ejecución del Diagnóstico del “Plan Estratégico de Gestión de Recursos Hídricos en las Regiones de Antofagasta, Tarapacá y Atacama”, que finaliza el año 2013, y cuyo objetivo es vincular la inversión pública a las visiones estratégicas que estas regiones tienen sobre su desarrollo al año 2021 y así contribuir con la infraestructura que se prioriza desde esa visión.

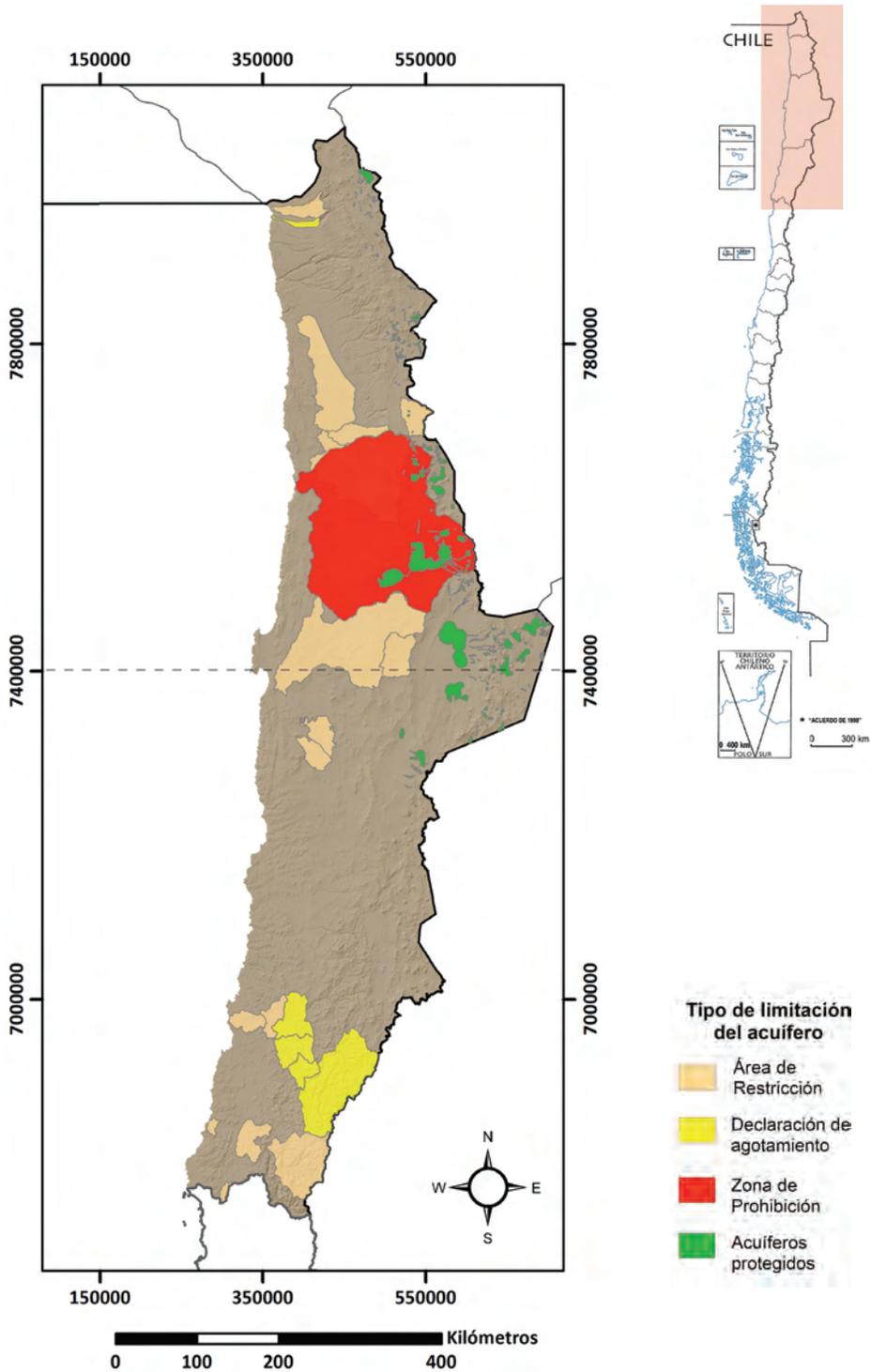
Este Plan considera la definición de diversas iniciativas de inversión, estudios, prefactibilidades, diseños y obras, es liderado por las Secretarías Regionales Ministeriales de Obras Públicas respectivas y cuenta con la participación de actores relevantes del sector público y privado en su elaboración (MOP, 2012).

Ante la escasez hídrica nacional, la demanda futura de agua en el Norte Grande debemos analizarla desde la sostenibilidad, entendiéndola como el equilibrio entre lo económico, social y ambiental, y los esfuerzos se han centrado en la necesidad de encontrar nuevas fuentes alternativas de recursos hídricos. En este contexto, cobra relevancia la desalinización de agua, reutilización de aguas residuales y provenientes de procesos industriales, traslado de agua de ríos del sur para abastecer el suministro de agua potable en el norte; y también se han mencionado como alternativas la cosecha de aguas lluvias, la siembra de nubes, el uso de atrapanieblas y la recarga artificial de acuíferos.

La alternativa de desalar agua de mar en Chile para uso potable e industrial, se posiciona como la salvación para descomprimir la competencia por el recurso hídrico, con más de 18 plantas construidas en la macrozona norte. Las plantas desaladoras comienzan a funcionar en Europa a partir de 1965 en Lanzarote, España, donde se construye la primera planta con tecnología de evaporación, la misma que ya se sustituyó por el método de ósmosis inversa en 1971 en el mismo país. Según el sitio web Soliclima.com, actualmente más de 150 países en el mundo emplean la desalación de agua de mar para solventar sus necesidades. Entre los países que más utilizan esta tecnología destacan Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Estados Unidos, España, Kuwait, Argelia, China, Qatar, Japón y Australia.

La eficiencia hídrica entendida como la capacidad de reutilización de aguas residuales y provenientes de procesos industriales, puede permitir mejorar la gestión del recurso hídrico a través de mecanismos de ahorro y uso eficiente del agua en todas las actividades productivas y no productivas del país. Chile cuenta con 120 mil millones de m³ en promedio al año y sólo se utilizan del orden de 20 mil millones, el resto es desaprovechados, porque no hay infraestructura para retener el agua, y se pierde en el mar.

Figura 11. Mapa de Sobreexplotación Regiones Arica y Parinacota - Atacama (Gobierno de Chile, 2012b)



El traslado de agua de ríos del sur para abastecer el suministro de agua potable en el norte, tiene como propósito tomar el agua de los ríos Rapel, Maule y Bío Bío justo cuando desembocan en el Pacífico y antes de que se salinice y luego, mediante un sistema de bombeo a presión, enviarla hacia el norte a través de una tubería. La propuesta de Aquatacama que pertenece a la empresa Vía Marina, propone el transporte submarino y originó el término de Carretera Hídrica, y la propuesta de vía hídrica del norte de Chile, ofrece el transporte por tierra y pertenece al consorcio Euro Engineering Group.

Finalmente, se puede destacar la exploración de los glaciares blancos del país. El año 2011 se concluyó el inventario de este recurso, que cubre una superficie de 21.000 Km² a nivel nacional y representan el 76% del total de la superficie glaciar sudamericana. Esto permitirá cuantificar las reservas de aguas que posee el país, lo que ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido a los efectos del cambio climático y la escasa disponibilidad de los recursos hídricos (MOP, 2012).

Distribución del Agua

Chile presenta una diversidad de climas, rasgos morfológicos y de características litológicas que determinan distintos comportamientos con respecto a la hidrología. Sin embargo, similitudes en los caudales y en los regímenes de escurrimiento; el tipo de red de drenaje y la situación en las cuencas con respecto a las unidades morfológicas fundamentales, permiten agruparlas y definir zonas más o menos homogéneas, Figura 12 (Salazar, 2003).

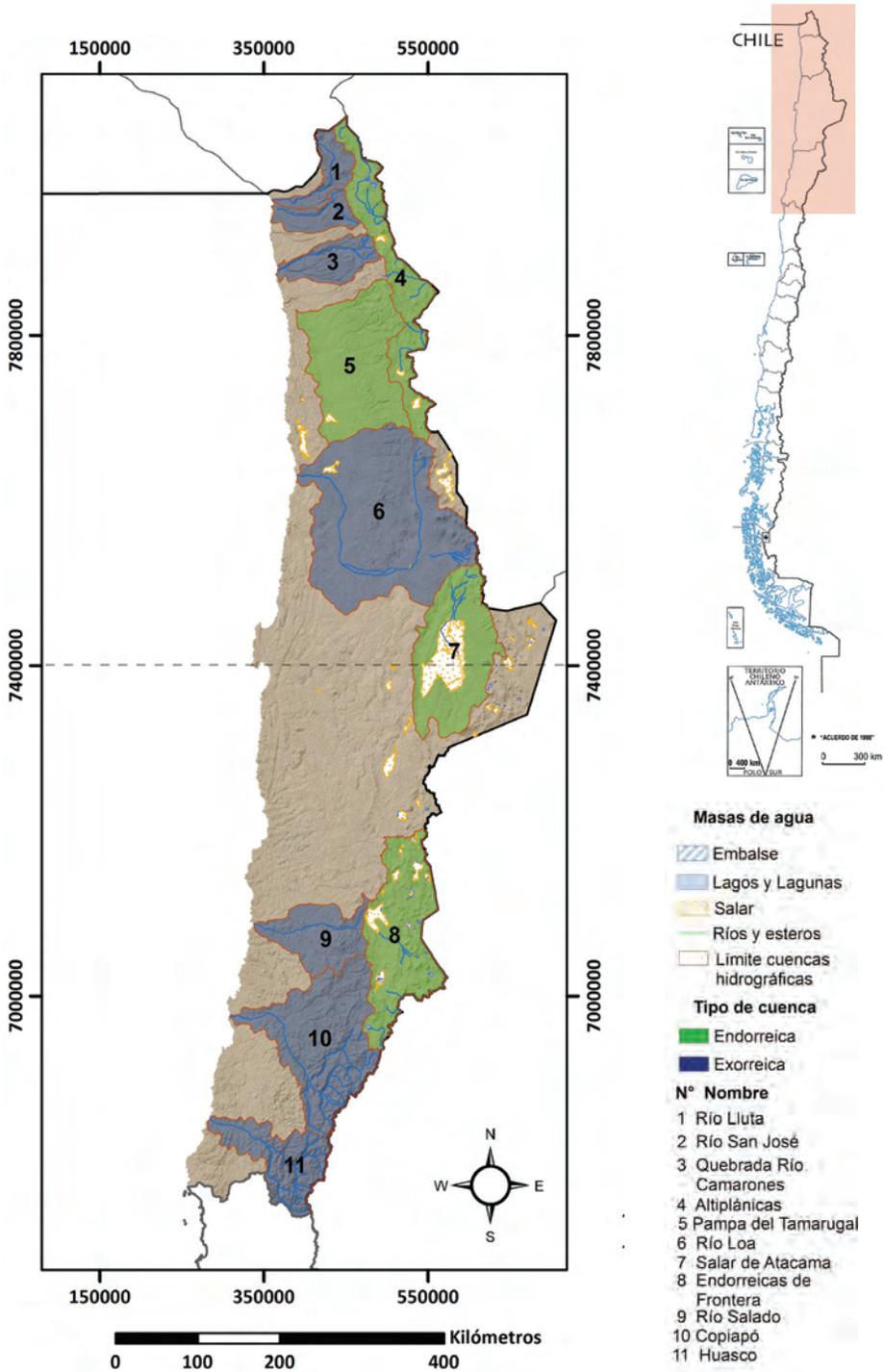
La Zona Árida, comprende la región de Arica y Parinacota hasta la parte nororiental de la región de Atacama, y se presenta con ríos de régimen esporádico.

La característica fundamental de esta zona es su extrema aridez. Las cuencas, condicionadas por el relieve y por la escasa cantidad de precipitación que reciben se agrupan en tres tipos: (a) sistemas exorreicos, con escurrimientos permanentes o esporádicos; (b) sistemas endorreicos, emplazados principalmente en la meseta altiplánica, algunos de ellos de carácter transfronterizo y (c) sistema de cuencas inactivas o arreicas, que existe exclusivamente en esta parte del país (Salazar, 2003).

En la zona árida del norte del país, donde impera el desierto más absoluto, con precipitaciones que no alcanzan a 10 mm anuales, los escurrimientos sólo dependen de las precipitaciones que se presentan en la parte alta oriental denominada meseta altiplánica. Los ríos presentan la mayor parte del año caudales reducidos o esporádicos y sólo en verano, cuando las precipitaciones en el altiplano son importantes, ocurren crecidas que a veces adquieren carácter de catástrofe. Los principales ríos que comprende esta zona, de norte a sur, son Lluta, San José y Loa (Salazar, 2003)

La Zona Semiárida, llamada zonas de los "Valles Transversales", comprende parcialmente la región de Atacama, de Coquimbo y de Valparaíso, hasta el cordón de Chacabuco, límite entre las regiones de Valparaíso Metropolitana.

Figura 12. Cuencas del Norte Grande, Regiones Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama (Salazar, 2003)



Se caracteriza por presentar ríos de tipo torrencial con alta pendiente donde ha desaparecido el relieve altiplánico y donde los ríos de cabecera en la alta cordillera tienen régimen permanente. Estos ríos una vez formados toman la dirección este-oeste condicionadas por la tectónica local. La cantidad de precipitaciones y su dispersión en el tiempo permiten definir un clima semiárido con lluvias centradas en los meses de invierno.

En esta zona el anticiclón del Pacífico es determinante para que prevalezcan o no precipitaciones. Lluvias de mayor importancia se producen una vez cada tres o cuatro años, provocando ascensos de escurrimientos medios de los principales ríos y también significativos caudales en verano, en el caso de una importante acumulación nivel debido a un invierno húmedo.

Las precipitaciones hasta una elevación entre 2.500 y 3.000 m.s.n.m. se manifiestan en forma de lluvias; en la parte más alta se presentan en forma de nieve, de manera que los ríos de esta zona semiárida presentan regímenes mixtos, donde la importancia de la componente pluvial respecto de la nival depende de la proporción de la superficie de la cuenca que se localiza a mayores elevaciones.

La existencia de embalses subterráneos en esta zona tienen relación con los rellenos fluviales de la caja de los ríos, a diferencia de lo que ocurre más al norte, donde estos embalses corresponden a cuencas endorreicas con rellenos aluvionales profundos.

Estos ríos presentan mayores caudales en una sucesión norte a sur con un aumento de las precipitaciones de 25 mm en Copiapó (Región de Atacama), por ejemplo, a 250 mm en Aconcagua (Región de Valparaíso). Los ríos principales de esta zona en la Región de Atacama son, de norte a sur, Copiapó y Huasco (Salazar, 2003).

Disponibilidad de Agua

Los cursos de aguas superficiales, cuyas cuencas hidrográficas están ubicadas desde el río Elqui al norte presentan caudales sobrantes medios muy reducidos; esta situación se agrava en situaciones de sequías donde los caudales sobrantes se hacen prácticamente nulos. Cabe hacer presente algunas situaciones anómalas en la zona del Norte Grande (ríos Lluta y Loa) donde las condiciones de mala calidad del agua limitan su mayor aprovechamiento (Salazar, 2003).

Las aguas subterráneas presentan una menor variabilidad hidrológica, se estima que la recarga media para los acuíferos que se ubican desde la Región Metropolitana al norte, alcanza aproximadamente a $55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y los derechos de agua autorizados alcanzan a $107 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un uso efectivo del orden de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. (Figura 13; Salazar, 2003). En Chile, el uso y la gestión de agua son temas de suma importancia, dada la creciente demanda por este recurso por las industrias de exportación (particularmente agricultura y minería, Figura 14), el sistema de mercados de derechos de agua que es casi único en el mundo, y también los potenciales efectos del cambio climático para los recursos hídricos.

Figura 13. Disponibilidad y demanda de aguas subterráneas (Salazar, 2003)

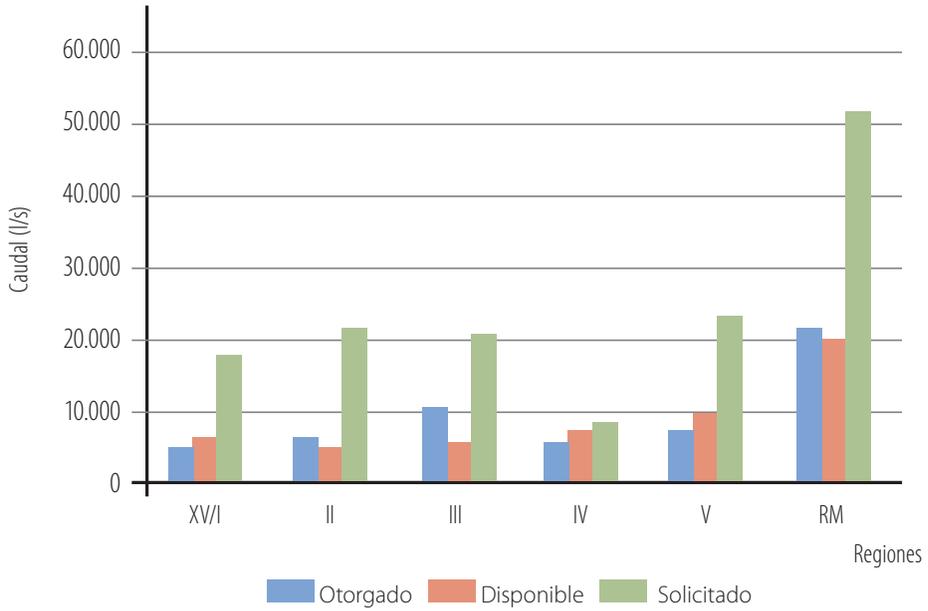
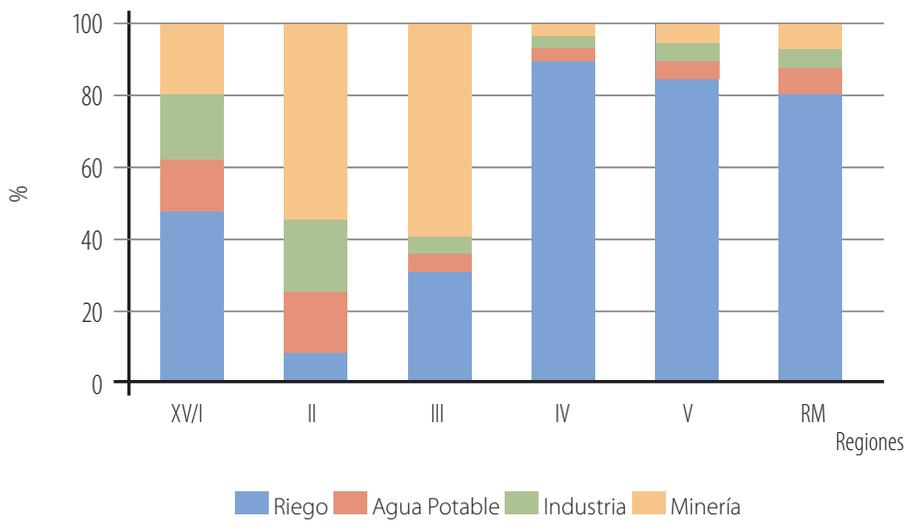


Figura 14. Demanda de Agua a Nivel Regional (Salazar, 2003).



Características del agua de riego

La composición química de las aguas naturales presenta una gran variabilidad a lo largo del territorio nacional, observándose en general una alta concentración de sales en las zonas áridas del país y decreciendo fuertemente hacia las regiones más húmedas.

Calidad de las aguas superficiales

La conductividad eléctrica (CE), pH y concentración de los macroelementos representativos en cuencas importantes del país indican que las aguas del Norte Grande se caracterizan por sus altos contenidos de sales, lo que se refleja en valores de conductividad eléctrica que usualmente están entre $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ y 2 dS m^{-1} , y en ocasiones superan largamente estas cifras (Salazar, 2003). En la Tabla 2 se presentan valores característicos para las aguas de las cuencas más importantes en la zona comprendida entre las regiones de Arica y Parinacota y Atacama.

Tabla 2. Constitución química de aguas superficiales (Salazar, 2003)

Región	Punto de Control	pH	Conductividad Eléctrica ds/m	Concentración (mg L ⁻¹)					
				Cl	SO ₄	Ca	Mg	K	Na
I ⁽¹⁾	Lluta en Panamericana	7,4	3,45	688	700	247	71	38	405
	San José de Ausípar	8,3	0,805	54	177	58	33	12	74
II	Loa en Yalquincha	7,8	6,42	1.000	205	125	93	85	983
III	Copiapó en Mal Paso	7,8	1,18	44	350	126	31	5	71
	Huasco en Panamericana	7,9	0,775	30	220	93	18	3	37

⁽¹⁾ Previo a la creación de la Región de Arica y Parinacota.

La CE se utiliza para medir la concentración total de sales en una solución, pero no indica qué sales están presentes (Bar, s/a). A medida que el suelo se seca la CE de la solución del suelo va en aumento; por otra parte, a una misma cantidad de sales aplicada al suelo la concentración de las sales en la solución de suelo en capacidad de campo² será menor cuanto más agua sea capaz de retener el suelo.

Las cuencas con mayor contenido de sólidos disueltos en esta zona son las de los ríos Lluta, Camarones y Loa, con conductividades eléctricas superiores a 2 dS m^{-1} . Las cuencas de los ríos San José, Quebrada de Tarapacá y otras altiplánicas en general registran concentraciones inferiores a ese valor.

² Capacidad de Campo: es el contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo luego de su saturación o de haber sido mojado abundantemente y después dejado drenar libremente, evitando pérdida por evapotranspiración hasta que el potencial hídrico del suelo se estabilice (alrededor de 24 a 48 horas después de la lluvia o riego).

Un caso excepcional lo constituye el río Lluta en el cual se presentan cursos de agua con aguas extraordinariamente ácidas ($\text{pH} < 3$) y elevadas concentraciones de sales, en especial de compuestos de boro, situación que se asocia a la importante actividad volcánica. Una situación también excepcional la constituyen cursos ubicados en afluentes del río Loa (Géiseres del Tatio, Región de Antofagasta) con conductividades superiores a 10 dS m^{-1} (Salazar, 2003).

En esta zona los ríos muestran un notable deterioro de la calidad de sus aguas a lo largo de su recorrido, fenómeno que tiene causas naturales y antropogénicas. Entre las causas naturales se tiene la disolución de sales contenidas en formaciones geológicas que son interceptadas por el cauce, el aporte de aguas de inferior calidad y la existencia de los cursos medios e inferiores de áreas con niveles freáticos próximos a la superficie, lo que produce una concentración de las sales por evaporación desde el suelo húmedo. También desempeñan un papel significativo en este fenómeno las labores agrícolas por la evaporación en la humedad del suelo que ellas provocan y los procesos de lixiviación de las sales contenidas en el suelo.

Un caso especialmente interesante de salinización a lo largo de su recorrido se constata en el río Loa, donde se observa disolución de sales, aportes de vertientes de alta salinidad, influencia del uso agrícola y además el efecto de la extracción para fines domésticos de recursos de buena calidad existentes en los ríos afluentes; acorde a ello, las aguas en la parte baja de este caudal alcanzan conductividades que superan los 6 dS m^{-1} (Salazar, 2003).

Más al sur el contenido de sólidos disueltos de las aguas presenta en general valores menos elevados que en las regiones del Norte Grande con conductividades eléctricas típicas menores de 2 dS m^{-1} aunque con frecuencia en los cursos inferiores también se tienen restricciones para el uso del agua por exceso de salinidad (Copiapó, Huasco).

Otro factor relevante en el análisis de las aguas de riego son los microelementos que en ellas se contienen, siendo los de mayor atención el arsénico (As), cuyo origen se socia al volcanismo cuaternario altiplánico, el boro y algunos metales pesados como el cobre, el molibdeno, el manganeso y el hierro.

En algunas cuencas del Norte Grande (Camarones, Tarapacá, Aroma, Isluga y Loa) frecuentemente las aguas tienen un contenido de arsénico superior a $0,5 \text{ mg L}^{-1}$, valor sustancialmente superior al aceptado en la norma chilena de agua potable, NCh1333. Of78 (INN, 1999).

El contenido de boro también constituye una importante restricción para mucha de las aguas del Norte Grande, en especial las concentraciones son poco favorables en la región altiplánica donde frecuentemente las aguas superan niveles de boro tan altos como $5,0 \text{ mg L}^{-1}$. Algunos cauces con elevado contenido de boro son el río Loa, la Quebrada de Camarones, Tarapacá y Aroma, y los ríos Isluga y Collacagua. En general la incorporación de este elemento al ciclo hidrológico en la zona tiene su origen en la actividad volcánica y en depósitos evaporíticos (Salazar, 2003).

Calidad de a las aguas subterráneas

Si bien no existe un control sistemático a nivel nacional, se ha constatado que la calidad del agua subterránea queda determinada por las características de su recarga y por procesos químicos que se desarrollan en el acuífero (disolución, precipitación, oxidación, reducción, etc.).

En términos generales se puede señalar que la importante interacción que se presenta en el país entre las aguas superficiales y subterráneas, respecto de lo cual existen diversos criterios de análisis (Anexo 3), tiene como consecuencia que la calidad de ésta última siga de cerca las tendencias de las aguas superficiales que la recargan, aun cuando normalmente éstas tienen niveles de sólidos disueltos superiores (Salazar, 2003).

En relación al desarrollo agroforestal siempre se debe tener en cuenta que los cultivos no se desarrollan en el agua de riego, sino en la solución del suelo, donde en el caso de las zonas áridas las sales están mucho más concentradas. Cuando nos vemos obligados a usar agua con un nivel de salinidad relativamente alto debemos evitar en lo posible la acumulación de sales en la zona radicular de tal forma que se reduzca la absorción de elementos tóxicos (Bar, s/a).

Por otra parte, es necesario considerar que, por sus características, el riego por goteo es el más indicado para utilizarlo con agua salina. Permite mantener en la zona radicular una humedad cercana a la capacidad de campo, lo que evita una concentración alta de sales; de esta forma, la zona del bulbo mojado que ocupan las raíces se lava continuamente, lo que previene la acumulación de sales, y además, no se mojan las hojas con el agua de riego (las hojas de algunos cultivos absorben con facilidad las sales disueltas en el agua de riego).

Sin perjuicio de lo anterior, hay que tener en cuenta que cuando se riega por goteo existe un riesgo en el momento que comienzan las lluvias. Si no llueve lo suficiente como para desplazar las sales por debajo de la zona radicular, el agua de lluvia puede introducir a la zona radicular las sales acumuladas en la parte superior del bulbo mojado, por esta razón se recomienda mantener el riego activo durante las primeras lluvias del otoño, si estas son débiles, para evitar la entrada de las sales a la zona radicular.

Además, cuando se riega por goteo el sistema radicular de la planta se reduce y hay un lavado constante, por lo que es necesario fertilizar todo el tiempo para evitar carencias y desequilibrios (Bar, s/a).

Finalmente, como se indicó previamente, existen cultivos más tolerantes que otros a la salinidad, y además, un aspecto relevante de considerar, es cuando el cultivo está en estado de plántula pues más que cualquier otro estado de desarrollo del vegetal es el más sensible a la salinidad (INIA, 1996).

1.4. Desafíos en el Uso de los Recursos Naturales

Recurso Clima

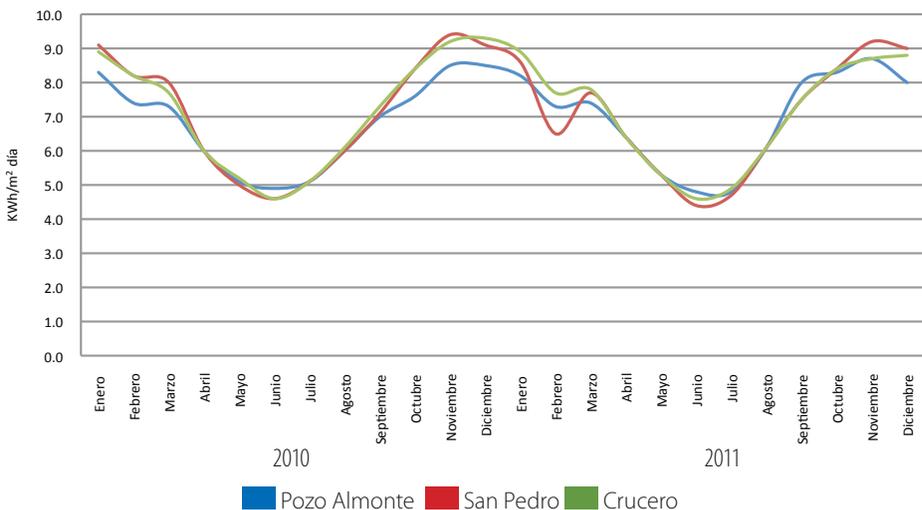
El clima es uno de los recursos con mayor variabilidad espacial y temporal, dado que no sólo es posible encontrar un clima particular en cada zona, sino además, el comportamiento temporal que presentan la temperatura media del aire, la radiación solar, la humedad del aire, la tasa de evapotranspiración, la precipitación, entre otras, determinan una amplia gama de condiciones que potencian las áreas para el desarrollo de cultivos o plantaciones que se adaptan a estas condiciones.

Sin embargo, la disponibilidad de agua será una limitante permanente del Norte Grande, no sólo por la escasa precipitación sino por las altas tasas de evapotranspiración que se registran en los periodos estivales.

Las variables climáticas de la macrozona norte constituyen una fuente inagotable de recursos renovables que puede ser incorporados a un sistema de producción o ser integrado en la planificación de futuros polos de desarrollo en el ámbito de las ERNC, considerando por ejemplo aquellas masificadas, como la solar y eólica, en sinergia con aquellas en estudio y evaluación, como la producción de biomasa.

El aprovechamiento potencial de la energía solar del Norte Grande muestran valores por sobre los 1000 W/m² en los meses de primavera verano, dada sus altas tasas de radiación solar y de irradiación, (Ministerio de Energía, 2013; Figura 15). Sin embargo, la expansión de la producción de energía eólica en Chile, aún necesita estudios que permitan recoger información de los regímenes de viento (CNE, 2009), con el objetivo de identificar zonas con potenciales eólicos que puedan minimizar costos asociados a la captación de aguas subterráneas.

Figura 15. Radiación Global Horizontal para los años 2010 y 2011 (Ministerio de Energía, 2013)

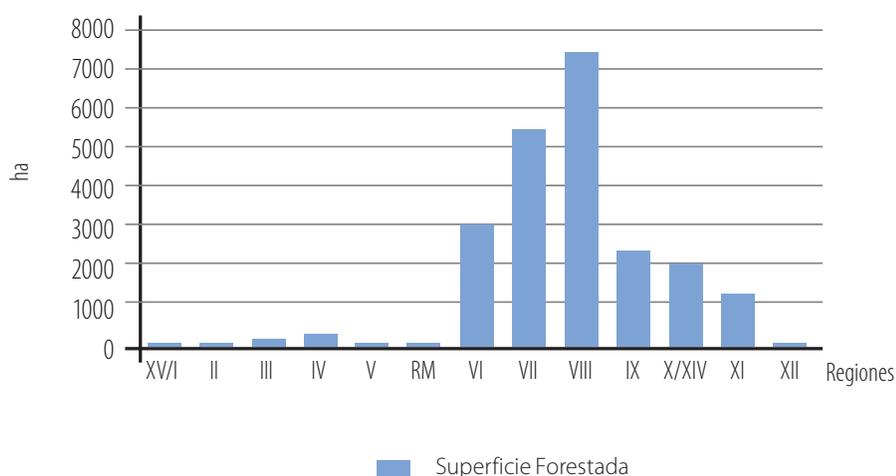


Recurso Suelo

Chile tiene una enorme oportunidad para el desarrollo agroforestal en la macrozona norte del país para la producción de biomasa y otros fines, pues se tiene una superficie fiscal disponible para uso -actualmente en proceso de caracterización para su puesta en valor- superior a los 15 Mha entre las regiones de Arica y Parinacota y Atacama, y un sinnúmero de iniciativas, de carácter público y privado, tendientes a promover el aprovechamiento de aguas residuales o provenientes de fuentes alternativas.

La reforestación del Norte Grande está estimulada por la aplicación del Decreto Ley N° 701 (MINAGRI, 1974), como un instrumento de política pública que contribuye directamente a mejorar las tasas de forestación, *e.g.* para la macrozona norte respecto de zonas en procesos de degradación por erosión y desertificación, o suelos marginales subutilizados. Otros beneficios están contenidos en la nueva ley de fomento forestal, en tramitación, que modifica y extiende la aplicación del actual DL N° 701, con el objetivo de contribuir al desarrollo sustentable del país mediante la provisión de materias primas con fines productivos tradicionales, de energía renovable y servicios ambientales, tales como la protección de suelos, la regulación hídrica, la captura de carbono disminuyendo las emisiones de gases efecto invernadero y el combate contra la desertificación (Cámara de Diputados, 2012), lo que se transforma en una oportunidad para el desarrollo agroforestal de esta macrozona. Cabe consignar que al año 2011 la superficie forestada para las regiones de Arica y Parinacota a la de Atacama fue considerablemente menor en relación al resto del país (Figura 16).

Figura 16. Superficie Forestada a Nivel Nacional, año 2010 (CONAF, 2011)



El impulso de encadenamientos productivos en el Norte Grande, conforme la experiencia acumulada en la industria forestal primaria y secundaria, considerando pequeños y medianos productores sujetos de ser bonificados mediante el DL N° 701, no sólo por actividades de reforestación, para generar biomasa por ejemplo, sino también por otras acciones como la recuperación de suelos degradados (Tabla 4). Actualmente CONAF, promueve el establecimiento de plantaciones en áreas desérticas y desertificadas mediante la instalación de 3.000 incubadoras de plantas mediante la tecnología Waterboxx³.

Tabla 3. Bonificaciones de acuerdo a la aplicación del DL N° 701 (CONAF, 2011)

Tipo de Bonificación	Pequeños Propietarios Forestales			Otros Propietarios		
	N°	Sup. (ha)	Monto (\$)	N°	Sup. (ha)	Monto (\$)
Forestación	541	2.129,69	907.746.162	412	7.492,23	2.226.759.161
Recuperación de suelos degradados y forestación	530	2.693,72	1.815.240.988	304	7.447,06	3.639.164.380
Total	1.071	4.823,41	2.722.987.150	716	14.939,29	5.865.923.541

Al año 2001 la superficie total bonificada por CONAF fue de 19.762,7 ha (menor en un 9 % que la superficie bonificada el año 2010), siendo la superficie forestada propiamente tal de 9.621,92 ha y la superficie bonificada por recuperación de suelos degradados de 10.140,78 ha.

Un aspecto relevante vinculado a la modificación del DL N° 701, es el mejoramiento de la información para la comercialización de bonos de carbono, mercado que se pretende fortalecer mediante la aplicación de esta normativa. La bonificación pretende que los dueños de predios reforesten sus tierras, con fines madereros tradicionales como energéticos, recibiendo dependiendo de la zona y las especies plantadas un dinero que incentive estas plantaciones, las que más tarde se pueden usar en distintas actividades productivas, entre ellas, la venta de bonos de carbono.

Para apoyar el desarrollo de proyectos de ERNC, CONAF se encuentra realizando para la zona centro sur del país, un catastro de la información relativa a la biomasa disponible, secuestro de carbono, crecimiento de especies forestales y otros parámetros relevantes. Sin embargo, no se dispone de información de la macrozona norte, que permita cuantificar el aporte de las plantaciones ubicadas en ecosistemas de zonas áridas para la mitigación del cambio climático.

³ Tecnología Waterboxx (o Groasis): materialmente corresponde al uso de un recipiente de plástico que recoge el agua del rocío y de la lluvia, manteniéndola en el interior para suministrarla paulatinamente a la especie que se contiene en él, sin ayuda de riego. Entrega soporte, por ejemplo, a especies que se desarrollan en zonas que presentan periodos de sequía.

Recurso Hídrico

Considerando la realidad chilena y los efectos derivados del cambio climático, en materia hídrica se hace necesario tomar medidas tanto en el corto, mediano como en el largo plazo para poder absorber el aumento de la demanda de agua a nivel país, lo que se espera ocurra progresivamente durante los próximos años (Gobierno de Chile, 2012b).

Algunos ejes centrales a considerar para atender los requerimientos que permitirán un creciente desarrollo, entre otros ámbitos, de especies para el cultivo y producción de biomasa en la macrozona norte de Chile son una gestión eficiente y sustentable del recurso hídrico, y cómo enfrentar su escasez.

Enmarcado en dicho enfoque, resulta primordial la gestión de los recursos hídricos aumentando, por ejemplo, la eficiencia en el uso del agua mediante la tecnificación de riego (riego por goteo, uso de tecnología waterboxx, otros), y la recuperación de aguas residuales provenientes de procesos mineros, industriales, etc. Asimismo, se debe fortalecer la protección de la calidad de tales recursos hídricos reduciendo al máximo posible la contaminación de éstos, entre otros, a través de planes de prevención y de descontaminación asociados, sin perjuicio de las normas existentes al respecto en la actualidad.

En relación a la escasez, se ha constatado que en los últimos años varias zonas del país han experimentado situaciones de sequía, en particular la zona comprendida entre las regiones de Atacama y La Araucanía. Si bien esta escasez tiene un carácter estacional, es relevante tomar medidas no sólo para superar la situación de corto plazo, sino también para abordar la escasez de forma más permanente.

La construcción de infraestructuras de riego tradicionales son un elemento importante pero no suficiente. Para el caso de macrozona norte, se debe fomentar la exploración de alternativas no tradicionales como las descritas en el acápite sobre Recurso Hídrico (desalación, reutilización, entre otros).

El desafío del uso del agua en el sector agroforestal lo constituye fundamentalmente el aumento de la eficiencia en el uso, lo que se traduce en un incremento en la tecnificación del riego y en la ejecución de obras de conducción y almacenamiento de aguas, dado que en promedio el riego tecnificado permite reducir el consumo de agua por hectárea en un 50%. Sin embargo, se debe profundizar sobre el efecto que tiene la implementación de estas tecnologías en la recarga de las napas subterráneas, en la calidad de las aguas por el aumento de la concentración de contaminantes como pesticidas y fertilizantes si fuera el caso, y en otras externalidades que sería relevante considerar.

Por último, un desafío que enfrenta el sector productivo agroforestal se refiere al manejo de contaminantes, pasivos ambientales e introducción de plagas y enfermedades que puedan generarse eventualmente por su implementación, situación que debe preverse en relación a la ampliación de la frontera agrícola en el Norte Grande con especies adaptadas a esa zona para el cultivo y producción de biomasa.

Aspectos transversales

En materia hídrica, y sobre la interrelación entre aguas superficiales y subterráneas, la legislación actual maneja estos recursos en forma independiente, situación que ha originado en los últimos años impactos más marcados debido a la mayor intensidad en su uso.

Esta situación ha venido produciendo mermas sobre los caudales superficiales por efecto del descenso de los niveles subterráneos, así como también se ha detectado la disminución del caudal de vertientes. La integración dentro del marco legal de estos aspectos, de acuerdo a los expertos en esta área, permitiría una gestión más adecuada del recurso hídrico (Salazar, 2003).

Respecto de la generación de energía y el aporte del país en la meta de disminuir el calentamiento global, actualmente se elaboran las bases para la elaboración de la "Estrategia Nacional de Bioenergía" para el periodo 2013-2020, que corresponde a una propuesta que permite materializar el potencial de bioenergía del país, incluyendo biomasa, biogás y biocombustibles líquidos.

Este instrumento entregará los lineamientos técnicos para la toma de decisiones con respecto al uso y promoción de la biomasa como fuente de energía en Chile. Cabe señalar que al año 2013 el 20% de la energía primaria del país proviene de biomasa forestal, situación que la convierte en un recurso estratégico.

La iniciativa, en su primera etapa, revisará la disponibilidad de biomasa digestible -para producción de gas- y lignocelulósica, y analizará las tecnologías para la conversión de este recurso en bioenergía, revisando entre otros aspectos los proyectos y las barreras asociadas a la implementación de proyectos de bioenergía.

En relación a la gestión de la información y el uso de de las tecnologías de información y comunicación (TIC's), para incentivar la difusión de las oportunidades que presenta el Norte Grande en relación a su potencial desarrollo agroforestal (en el ámbito científico-técnico y comercial), se hace necesario generar información sobre la adaptación de las especies a zonas áridas y los soportes utilizados a tal fin (uso de aguas residuales, prácticas de manejo, mejoramiento genético, entre otros aspectos relevantes), acompañando sus resultados con la generación de cartografía normalizada. Actualmente la producción de información geoespacial, bajo estándares internacionales, otorga un valor agregado al desarrollo de conocimiento (ciencia, I+D) y su análisis integrado en un contexto territorial.

Finalmente, hay principios y elementos básicos y transversales que podrían orientar el desarrollo agroforestal de esta macrozona como son promover una cultura de conservación del agua, generar energías limpias y lograr un desarrollo equitativo, armónico y sustentable, teniendo presente que los recursos naturales de este territorio son únicos, escasos y estratégicos.



Capítulo 2

**Forestación y
Vegetación del Norte
Grande de Chile**

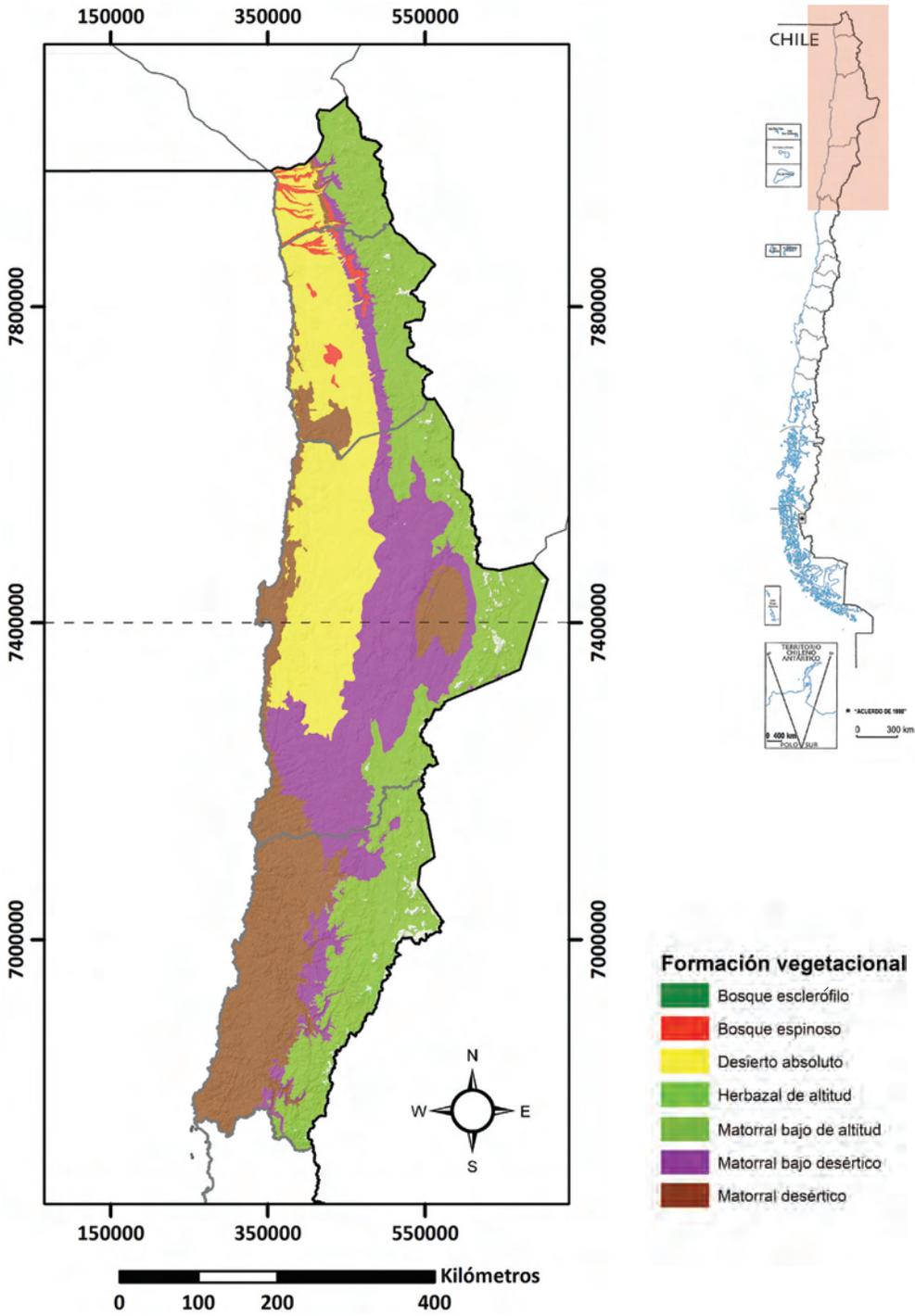


La distribución que presenta la vegetación en la macrozona norte de Chile, sigue un comportamiento similar a los tipos climáticos, existiendo tres sectores definidos: la zona costera (desierto costero), la pampa desértica y la zona andina. La zona costera se caracteriza por poseer influencia marina, con neblinas y lluvias orográficas. La pampa desértica, prácticamente no presenta precipitaciones, existiendo oasis provenientes desde capas freáticas. La zona andina presenta un aumento en las precipitaciones (en comparación con la pampa), además de marcadas diferencias altitudinales por la combinación de parámetros, como temperatura y precipitación. Cada sector posee diferentes formaciones vegetacionales características, en la zona costera se encuentra, principalmente, matorral desértico; en la zona andina matorral bajo de altitud y matorral bajo desértico; el matorral bajo desértico también se encuentra, en menor medida, en la pampa desértica, aunque en esta última destacan los bosques espinosos, los que se desarrollan asociados a cuerpos de aguas como ríos y oasis (Figura 17; Luebert y Plissock, 2006).

El desierto costero, que se extiende desde La Serena hasta Perú (en el límite con Ecuador), es una zona donde la influencia marina posibilita la formación de campos de nieblas, camanchaca, que permite el desarrollo de un tipo vegetacional conocido como oasis de niebla o pradera del desierto, y que se encuentra fuertemente influenciado por fenómenos climáticos como el Niño y la Niña (Muñoz-Schick *et al.* 2001). Se asocia la incidencia de la neblina entre los 300 y 800 m de altitud, diferenciándose con los pisos superiores e inferiores. Las principales especies vegetales presentes en este sector corresponden a suculentas de los géneros *Eulychnia* y *Neoporteri*, también con especies de *Puya*, entre otros, en conjunto con algunas especies arbustivas de los géneros *Nolana*, *Euphorbia*, entre otros y con herbáceas que, en algunos casos, sólo es posible observar posterior a periodos con precipitaciones intensas (Muñoz-Schick *et al.* 2001; Luebert y Plissock, 2006; Pinto y Luebert, 2009). Por sobre y bajo el piso altitudinal, también es posible encontrar otro tipo vegetacional, el que se encuentra formado, principalmente, por cactus de género *Copiapoa* y algunas especies arbustivas como palo del jote (*Gypothamnium pinifolium*), parafina (*Oxyphyllum ulicinum*) y *Heliotropium pycnophyllum* (Luebert y Plissock, 2006).

La pampa desértica, es una zona intermedia entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes, siendo una zona con escasa vegetación, la que se encuentra asociada, principalmente, a oasis, los que se abastecen con aguas salinas provenientes desde las napas freáticas. La vegetación predominante corresponde a especies del género *Prosopis*, las que se ven complementadas con matorrales o bosques de quebradas, con especies como chañar (*Geoffroea decorticans*), sauce criollo (*Salix humboldtiana*), huacano (*Myrica pavonis*), entre otros (Becerra y Faúndez, 2001; Luebert y Plissock, 2006).

Figura 17. Distribución vegetal en la macrozona norte (Luebert y Plischoff, 2006)



La zona andina presenta vegetación con alta variabilidad altitudinal, concentrándose en la zona intermedia, donde se producen las mejores condiciones entre temperatura y precipitación. La zona inferior se encuentra fuertemente afectada por una baja pluviometría, mientras que la superior por bajas temperaturas. La zona baja se encuentra dominada por el arbusto *Atriplex imbricata*, en un matorral bajo abierto (Luebert y Plissock, 2006). La parte intermedia presenta mayor abundancia y diversidad vegetacional, con diferencias según gradiente latitudinal. La zona de mayor aridez o puna desértica, transición entre precipitaciones invernales y estivales, se encuentra dominada por paja blanca (*Stipa frigida*) acompañada con arbustos como añahua (*Adesmia melanthes*), koa (*Fabiana bryodes*) y copa-copa (*Artemisa copa*; Luebert y Gajardo, 2000; Luebert y Plissock, 2006). En la zona alta es escasa la vegetación existente, aunque también es posible encontrar remanentes de *A. imbricata* con matorrales de *Fabiana ramulosa* y *Diplostephium meyenii*. A mayores altitudes la vegetación se conforma por cojines o vegetación en roseta (de baja altura), siendo la flor de la puna (*Chaetanthera sphaeroidalis*) la especie dominante, también es posible encontrar yareta (*Azorella compacta*), coca vicuña (*Pycnophyllum molle*) y senecio de Putre (*Senecio zoellneri*; Luebert y Plissock, 2006).

2.1. Cultivos con Potencial Adaptación a Zonas Áridas

En este capítulo se describen especies que poseen el potencial para desarrollarse en zonas semiáridas o áridas. En este caso se consideraron especies con una característica particular, que es su potencial energético. Son diez especies las que se analizan en este caso, de éstas siete son nativas y tres son introducidas, pero entre las introducidas dos se encuentran de manera asilvestrada en territorio nacional y sólo *Jatropha* no se encuentra en territorio nacional.

Algarrobo [*Prosopis chilensis* (Molina) Stuntz]

P. chilensis, es miembro de la familia Fabaceae, y vulgarmente es conocido como algarrobo, algarrobo chileno, algarrobo del centro, algarrobo blanco, cupesí y mezquite en países de habla hispana, mientras que en países de habla inglesa se le conoce como carob tree. Es un árbol de porte medio, que alcanza entre 8 y 10 m de alto, y 0,6 a 1 m de diámetro. La corteza es de color gris a café clara, desprendible y gruesa, con protuberancias y grietas longitudinales profundas. Posee ramas flexibles y espinosas; las espinas son duras, axilares, de color blanquecino a café y miden entre 6 y 10 cm de largo. Las hojas son compuestas y uni, bi o tripinnadas, de 10 a 20 cm de largo y con entre 10 y 29 folíolos; los folíolos son verdes a verdes amarillentos, lineares, rectos o subfalcados, agudos o mucronados y con nervadura poco marcada, miden de 2,5 a 3 mm de largo y 1,5 a 2 mm de ancho (Figura 18; Burkart, 1976; Hoffman, 1998; Anónimo, 2012a).



Figura 18. *Prosopis chilensis* (Molina) Stuntz

Las flores, hermafroditas, se reúnen en inflorescencias tipo racimo espiciforme de 7 a 12 cm de largo, cada inflorescencia alberga alrededor de 250 flores que miden 5 mm de diámetro; el cáliz glabro es pentámero con los sépalos unidos y forma acampanulada, la corola es pentámera con pétalos verde amarillentos, libres y lineares de 3 a 4 mm de largo, son pilosos en el haz y con una mancha de pelos blanquecinos en el envés; cada flor posee alrededor de 10 estambres. El fruto es una legumbre indehisciente, alargada o arqueada que mide de 5 a 18 cm de largo y 1 a 1,8 cm de ancho, de color amarillo claro y con los bordes estrechos; cada fruto posee de 20 a 30 semillas. Las semillas son de color café amarillento con forma ovalada a elíptico-ovalada y miden de 6 a 7 mm de largo (Burkart, 1976; Hoffman, 1998; Castillo y Moreno, 2002; García y Ormazabal, 2008; Anónimo, 2012a).

Es una especie nativa de Chile, se encuentra entre las regiones de Arica y Parinacota y O'Higgins, aunque se concentra preferentemente de Copiapó hasta el norte de la cuenca del Santiago. También es nativa de otros países latinoamericanos, Bolivia, Argentina y Perú, y ha sido introducida en Paraguay, India, Australia, Estados Unidos, Gabón, Camerún, Chad, Gambia, Guinea, Kenia, entre otros. Debido a su rápido crecimiento y alta adaptabilidad, es pionera en ambientes disturbados, considerándose, inclusive, como invasora y agresiva (García y Ormazabal, 2008; Anónimo, 2012a).

Es una especie adaptada a climas semiáridos con intensa radiación solar y luminosidad, con precipitaciones entre 50 y 350 mm anuales y puede soportar hasta 11 meses de sequía. Es tolerante a un amplio rango térmico desde -20 a 48 °C. Prefiere suelos llanos, serranías de interior y faldeos cordilleranos, generalmente ente 500 y 2.500 m de altitud, en zonas alejadas de la influencia costera. Es poco exigente con la calidad del suelo, aunque los franco-arenosos son los principales. Se encuentra en suelos planos, salinos y con poca pendiente, también en suelos aluviales pedregosos con aguas ocasionales. Prefiere suelos levemente alcalinos, pH entre 7,6 - 8,9 (Medina y Cardemil, 1993; Galera, 2000).

Los árboles adultos producen entre 40 y 60 kg de frutos, en ocasiones pueden llegar hasta 100 kg, e inclusive hasta 200 kg. Por lo general son muy sensibles a problemas fisiológicos, los que influyen en la producción de frutos, disminuyéndolo hasta 1 kg por árbol. Algunos ensayos que se han efectuado destacan la necesidad de distanciamiento entre árboles, siendo más favorable una plantación de 8 x 8 m, aumentando la tasa de supervivencia de los individuos (57%), en comparación con distanciamientos de 4 x 4 y 5 x 5. Es considerado en Chile como una de las especies forestal con mayor tasa de crecimiento, alrededor de 40 cm anuales, por lo que se utiliza para planes de reforestación, sobre todo en zonas áridas y semiáridas (Galera, 2000).

El principal uso de esta especie es como un producto maderero. La madera es de fácil secado y es posible trabajarla cuando aún está verde, es permeable a tratamientos de impregnación, aunque es dura para clavar. Se emplea para construcción de marcos, puertas, ventanas, entre otras; construcción de viviendas rurales y postes, para embarcaciones y fabricación de muebles estilo rústico (Hoffman, 1998; Galera, 2000).

Como fuente de energía, por el poder calorífico, de su madera y leña, sobre todo en zonas rurales y aisladas. El potencial energético está determinado por el uso dendroenergético de la madera. La madera posee un poder calorífico de 4.200 Kcal kg⁻¹, mientras que el carbón vegetal 6.000 Kcal kg⁻¹. Adicionalmente se puede producir etanol desde los frutos, los que poseen 72% de hidratos de carbono (Medina y Cardemil, 1993; Galera, 2000).

Se ha empleado para alimentación animal. Las semillas son una buena fuente proteica, también posee ácido linoleico (50%) y oleico (28%). Por otro lado los frutos en conjunto con el follaje tierno se emplean como forraje, sobre todo en épocas de sequías. Las raíces poseen ácido algarrobitánico, que puede ser empleado como colorante en lanas y algodones, otorga tintes de color gris pardo, castaño pálido y negro. La corteza también puede servir de colorante (Galera, 2000).

Atriplex (*Atriplex* spp.)

El género *Atriplex*, perteneciente a la familia Chenopodiaceae, consta de 250 especies distribuidas generalmente en climas desérticos tanto cálidos y fríos y en suelos salinos. Vulgarmente es conocido como atriplex o cachiyuyo en español y saltbush en inglés.

Son hierbas o arbustos globosos que pueden ser perennes o anuales, monoicos o dioicos, que llegan a medir entre 0,4 - 3 m de alto y entre 1 - 5 m de diámetro (Figura 19). Los tallos son ramificados, erectos y glabros, pueden ser de color verde, verde amarillento, grisáceo o rojizo. Las hojas pueden ser triangulares, ovadas, oblongas, rómbicas o hastadas, son carnosas, de color verde, púrpura, glauco o plateado, con el margen entero o dentado, pudiendo medir hasta 20 cm de largo (Duke, 1983; Al-Turki *et al.*, 2000; Canals *et al.*, 2007).

Las flores son monoicas (aunque existen especies que son dioicas) se reúnen en inflorescencias con forma de panícula que se pueden posicionar de manera terminal o axilar con las hojas; las flores son de color amarillo, verde, verde grisáceo o pardo, y son inconspicuas. Las flores masculinas y femeninas pueden encontrarse en un mismo individuo (plantas monoicas) o en individuos distintos (plantas dioicas). El fruto está cubierto por unas bractéolas de variada forma según la especie y puede medir entre 0,2 - 1,5 cm de largo. Las semillas tienen forma de disco y miden entre 2 - 4 mm de ancho (Duke, 1983; Al-Turki *et al.*, 2000; Castillo y Moreno, 2002; Canals *et al.*, 2007).



Figura 19. *Atriplex* spp.

Es un género con especies nativas de Asia, Oceanía y América, tanto del Norte como del Sur. Son varias las especies de atriplex nativas e introducidas que pueden encontrarse en Chile. Se distribuyen, principalmente, desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Coquimbo, aunque también existen registros en el resto de las regiones e inclusive en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena (Rosas, 1989; Aguilera *et al.*, 1998).

Es un género halófito y xerófito, que crece preferentemente en climas secos y cálidos, encontrándose en lugares con temperaturas entre 6 - 24 °C. Es posible encontrarlo desde el nivel del mar hasta los 2.000 m de altitud. Las precipitaciones en los lugares en donde se encuentra varían entre 100 - 1.400 mm anuales, pero lo más común es que se desarrollen en zonas con entre 100 - 500 mm al año. Se adapta a condiciones de veranos moderados con influencia marina o nublados. Inviernos moderados, en valles ventilados. No es una especie muy exigente, pudiendo encontrarse en una amplia variedad de suelos, siendo el arcilloso el más común, aunque puede encontrarse inclusive en dunas costeras y suelos yesosos. Es un género tolerante a la salinidad, pudiendo crecer en zonas costeras, desérticas saladas y salares. Se encuentra en suelos con pH entre 5,0 - 8,2 (Duke, 1983; Canals *et al.*, 2007; Meyer, 2008).

Se han efectuado cultivos comerciales, pero no existe información con respecto a ellos. Los antecedentes disponibles sobre cultivos sin fines comerciales, se realizan en densidades de plantación de hasta 400 arbustos ha⁻¹, encontrándose distanciadas a 5 m entre y sobre hilera. La productividad promedio que alcanza en estos casos se encuentra alrededor de los 5.200 kg leña ha⁻¹ (Román *et al.*, 2012).

Son dos los principales usos que poseen las especies del género *Atriplex*, uno es como fuente energética, y la biomasa puede emplearse con fines dendroenergéticos. El poder calorífico que posee la leña oscila entre 3.548 Kcal kg⁻¹ para *A. mucronata* y 4.840 Kcal kg⁻¹ para *A. atacamensis* (Rivera, 1996).

El segundo uso en importancia es como forraje para animales, ya que crece en zonas en donde es difícil encontrar alimento y en condiciones adversas suple las necesidades de los animales en épocas de escasez. Su calidad forrajera no es óptima, ya que depende mucho de las condiciones climáticas imperantes, por lo general en Primavera es cuando mayor valor nutritivo poseen. *A. halimus* y *A. nummularia* se encuentran constantemente con hojas durante todo el año, la producción de material forrajero oscila entre 1 y 5 ton ms año⁻¹ para ambas especies (Canals *et al.*, 2007; Román *et al.*, 2012).

También algunas especies se emplean como ornamentales y en algunos casos se utilizan para controlar la erosión, ya que puede crecer en suelos degradados y pobres. También se pueden emplear para remediación de suelos, ya que algunas especies no tienen inconvenientes para desarrollarse en suelos contaminados con Arsénico. Las hojas se pueden emplear como sustancia aromática, mientras que las semillas molidas son una buena fuente de vitamina A (Duke, 1983; Tapia *et al.*, 2013).

Chañar [*Geoffroea decorticans* (Gill. ex Hook. et Arn.) Burk.]

G. decorticans, miembro de la familia Fabaceae, conocido vulgarmente como chañar, chañarcillo, quimori y kumbaru en español, y como chilean palo verde en inglés.

Es un árbol o arbusto que mide entre 3 - 12 m de alto. El tronco es tortuoso y ramificado, tiene un diámetro de entre 30 - 60 cm. La corteza externa es gruesa, de color amarillento, es caediza y se encuentra cubierta por hendiduras longitudinales de mediana profundidad, la corteza interior es de color verdosa a verde amarillenta. Las ramas son espinosas, las que miden entre 2 - 4 cm de largo, y glabras. El sistema radical es extenso, llegando a medir hasta 7 m de largo. Las hojas pecioladas son pinnadas, alternas o fasciculadas, son de color verde claro en el haz y verde grisáceo en el envés, miden 1,5 - 6,0 cm de largo y se componen por entre 3 - 9 folíolos, estos son subcoriáceos, sésiles y con forma oblonga a elíptica-oblonga, tienen el ápice agudo o emarginado y se disponen de manera opuesta, subopuesta o alterna, miden entre 5 - 30 mm de largo y 3 - 8 mm de ancho, el folíolo terminal es más grande que los laterales. El raquis es glabro o levemente pubescente (Eynard y Galletto, 2002; Silva *et al.*, 2004; García y Ormazabal, 2008).

Las flores se agrupan en inflorescencias racemosas o corimbosas, las que miden entre 2 - 5 cm de largo y contienen entre 10 - 40 flores. La corola es amariposada y los pétalos son de color amarillo anaranjado y con líneas (estrías) rojizas; el cáliz es pubescente y acampanado, el tubo mide 2,5 mm de largo (Figura 20). Cada flor posee 10 estambres, con uno más corto y libre. El fruto es una drupa globosa, con forma ovoide y glabra, es de color rojizo y mide entre 2,0 - 2,5 mm de diámetro; cada fruto contiene 1 ó 2 semillas. Las semillas son fusiformes, surcadas en la superficie y miden 10 mm de largo y 5 mm de ancho (Eynard y Galletto, 2002; Silva *et al.*, 2004).

Es nativa de Sudamérica, desde el norte de Chile y Argentina, hasta el norte de Paraguay, incluidos el sur de Bolivia y Perú. En Chile se encuentra entre las regiones de Arica y Parinacota y Coquimbo, aunque en algunos casos su distribución se encuentra restringida a poblaciones acotadas a ciertos sectores. Es muy abundante en la cuenca del río Copiapó, con alrededor de 2.200 ha de chañarales (Maestri *et al.*, 2001; García y Ormazabal, 2008).

Crece en climas áridos y semiáridos, en zonas donde la temperatura promedio oscila entre 15,6 - 19,8 °C, siendo la media del mes más cálido entre 23,8 - 30,4 °C y la del mes más frío entre 7,6 - 10,6 °C. Las precipitaciones en estos lugares fluctúan entre 320 - 860 mm anuales, aunque se registra en sectores con precipitaciones menores de 100 mm al año. Se encuentra desde el nivel del mar hasta los 2.300 de altitud, en ocasiones hasta los 3.000 m. De manera natural, crece en suelos moderadamente profundos (hasta 1 m), planos o con pendientes suaves (5 - 7%) y que sean de texturas franco arenoso a arcilloso, siendo los franco limoso los más comunes. Tiene una alta tolerancia a la salinidad (mayor a 16 mmhos cm⁻³) y se desarrolla en suelos con pH neutro a moderadamente alcalino (6,9 - 9,0), siendo los neutro los más comunes (Bravo *et al.*, 2010; Román *et al.*, 2012).



Figura 20. *Geoffroea decorticans* (Gill. ex Hook. et Arn.) Burk.]

No existen antecedentes sobre producciones comerciales o plantaciones que se hayan realizado con esta especie. De forma natural las densidades varían entre 125 - 750 árboles ha⁻¹, en este último caso se tratan de individuos juveniles sin mucho desarrollo (Román *et al.*, 2012).

Históricamente se ha empleado la madera como fuente de leña, la biomasa aérea que produce alcanza a 18,4 kg árbol⁻¹, aunque no se especifica su potencial energético. También se utiliza en la confección de muebles rústicos, enseres domésticos, trabajos de carpintería y mangos de herramientas. La corteza y la madera se emplearon para teñir textiles y como medicina popular para el tratamiento de afecciones respiratorias. El fruto es comestible, preparándose dulces y chicha, pero no es muy común ya que es astringente (García y Ormazabal, 2008; Iglesias y Barchuk, 2010).

Otro posible uso que puede tener, aunque no se ha estudiado es la posibilidad de producir biodiesel desde el aceite de las semillas, el que oscila entre 45,9 - 48,8% y se encuentra constituido por los siguientes ácidos grasos: 7,2 - 8,8% palmítico, 3,4 - 4,3% esteárico, 41,4 - 53,7% oleico, 30,7 - 43,4% linoleico, 0,8 - 1,5% araquídico, 0,7 - 1,2% gadoleico, 1,0 - 1,3% behénico y 0,4 - 0,6% lignocérico. También se registran el ácido mirístico, pero en cantidades trazas (Lamarque *et al.*, 2000; Maestri *et al.*, 2001; 2002).

Guindilla (*Guindilia trinervis* Gill. ex H. & A.)

G. trinervis, miembro de la familia Sapindaceae, es conocida vulgarmente como guindilla o guindillo. Es un arbusto leñoso, que alcanza una altura de hasta 1,5 m. El tallo es ramificado y glabro, los tallos nuevos son de color café rojizo, mientras los tallos viejos, leñosos, son de color café claro. Las hojas tienen un peciolo muy corto o son sésiles, son opuestas y coriáceas, con borde entero, obtusas y de forma elíptica, son de color verde claro en el haz, más blanquecinas en el envés donde se marcan claramente 3 nervios paralelos (trinervis), miden alrededor de 2 cm de largo y 1 cm de ancho (Navas, 1976; Hoffman, 1998).

Las flores son hermafroditas reunidas en una inflorescencia cimosa con entre 5 - 15 flores; el cáliz se encuentra compuesto por 5 sépalos pubescentes y que miden entre 2 - 3 mm de largo; la corola es tetrámera, con un quinto pétalo abortado, los pétalos son oval lanceolados, y algo más grandes que los sépalos. El fruto es una cápsula con 1 ó 2 semillas. Las semillas son negras y miden de 1 - 2 cm de diámetro (Figura 21; Navas, 1976; Hoffman, 1998; San Martín *et al.*, 2010).

Es nativa de América del Sur, de Chile y Argentina, en Chile crece entre las regiones de Valparaíso y del Maule. Se encuentra en climas mediterráneos templados, las temperaturas en las zonas donde crece fluctúan entre 5 - 30 °C, estando la temperatura promedio entre 14 - 25 °C. Se encuentra en zonas de altura, desarrollándose desde los 1.500 - 2.600 m de altitud, aunque se presume que podría desarrollarse bajo los 1.000 m, encontrándose en la zona precordillera. Debido a las altitudes en que se desarrolla, normalmente, durante la época invernal se encuentra cubierta de nieve. Las precipitaciones fluctúan entre 300 - 800 mm anuales. Presenta adaptabilidad a serranías y valles interiores. Zonas con veranos definidos, cálidos y secos, e inviernos moderados. No existe mucha información disponible, pero se sabe que puede crecer en terrenos con pendientes y soleados, y en suelos delgados y en sustrato rocoso (Aljaro y Montenegro, 1981; Román *et al.*, 2012).



Figura 21. *Guindilia trinervis* Gill. ex H. & A.

El potencial de esta especie se encuentra determinado por el contenido de aceite que poseen sus semillas, el cual alcanza hasta 30%. El cotiledón que equivale al 45% del peso de la semilla, aporta con entre 63 - 67% del aceite. El que se encuentra constituido por los siguientes ácidos grasos: 9,0 - 9,6% palmítico, 1,8 - 3,2% esteárico, 62,3 - 63,7% oleico, 7,6 - 10,1% linoleico, 0,8 - 2,8% linolénico, 4,7% araquídico, 9,5 - 12,9% gadoleico, 0,4% behénico y 0,8 - 0,9% erúxico. También se encuentran los ácidos laúrico, mirístico, lignocérico y nervónico, pero en cantidades menores al 0,1% (Aguilera *et al.*, 1986; San Martín *et al.*, 2010).

Es una especie que sólo se encuentra en su distribución natural, no siendo muy conocida inclusive en esos países. Hace algunos años se ha empezado a estudiar. Se estima que la productividad en aceite que puede alcanzar, oscilaría entre 500 - 600 L ha⁻¹ (Siegler *et al.*, 1987; Román *et al.*, 2012).

No se registran usos para esta especie. Actualmente, y por la posibilidad de producir biodiesel de ella es que se ha empezado a estudiar. La torta de molienda podría ser empleada para alimentación animal, pero aún habría que estudiarla bien, pues en experimentos resultó ser tóxica para ratas (Siegler *et al.*, 1987).

Higuerilla (*Ricinus communis* L.)

R. communis, miembro de la familia Euphorbiaceae, se conoce como higuerilla, ricino, palma christi y tártago en español, castor y castorbean en inglés y mamona y mamoneira en portugués.

Es un arbusto perenne o una arbustiva anual, dependiendo del lugar donde crezca alcanza diferentes tamaños. En zonas templadas mide entre 1 - 4 m de alto, y en zonas tropicales y subtropicales entre 8 - 14 m. El tallo es erecto, suculento y lampiño, es ramificado, rojizo y posee un diámetro de entre 7,5 - 15 cm. El sistema radical, se compone de una raíz central y abundantes raíces laterales muy cercanas a la superficie del suelo. Las hojas son alternas, glabras y miden entre 10 - 60 cm de diámetro, son palmeadas con entre 6 - 11 lóbulos cada una; los lóbulos tienen forma lanceolada y poseen margen dentado (Duke, 1983; Brigham, 1993; Toledo *et al.*, 2006).



Figura 22. *Ricinus communis* L.

Las flores se disponen en una inflorescencia racemosa terminal, en la base se posicionan las flores masculinas y en la parte superior las femeninas; las flores, sin pétalos, poseen un cáliz compuesto de 3 - 5 sépalos de color verde. El fruto es una cápsula dehiscente -indehiscente en cultivares modernos-, con forma ovoide que mide entre 1 - 2,5 cm de diámetro, la superficie se encuentra cubierta con gloquídios de color verde en un principio y rojizos cuando maduras (Figura 22); cada fruto posee 3 semillas en su interior. Las semillas son elipsoidales a ovoides, brillantes y jaspeadas, los colores pueden ser blanco, gris, amarillo, café, rojo o negro y miden entre 0,5 - 1,5 cm de largo (Duke, 1983; Brigham, 1993; Toledo *et al.*, 2006; Goytia-Jiménez *et al.*, 2011).

Crece en climas tropicales, pero ha sido naturalizada en zonas climáticas templadas. En los lugares donde se encuentra distribuida la temperatura oscila entre 7 - 30 °C, pero se considera como temperatura óptima el rango entre 10 - 23 °C. Se desarrolla desde el nivel del mar hasta los 2.500 m de altitud, aunque lo más común es encontrarla entre 300 - 1.500 m. Requiere de entre 500 - 1.000 mm anuales para poder desarrollarse, aunque crece en lugares con precipitaciones entre 200 - 4.200 mm. Se adapta a serranías y valles interiores con influencia costera en invierno y alta incidencia solar en verano. Zonas mediterráneas con veranos marcados y cálidos e inviernos suaves con régimen de heladas benigno. Crece en suelos profundos, que tengan buen drenaje y que sean de textura franca o franca arenosa. Requiere de suelos que tengan un pH más o menos neutro, entre 6,5 - 7,0, aunque se registra en suelos con pH que varía entre 4,3 - 8,2 (Duke, 1983; Falasca y Ulberich, 2007; Scholz y da Silva, 2008).

Se encuentra actualmente distribuida en todo el mundo, principalmente en las zonas tropicales y subtropicales. No se tiene bien claro su origen, aunque los registros más antiguos son desde el imperio Egipcio, por lo que se presume que es nativa del este de África y específicamente de Etiopía. Posteriormente fue introducida en el lejano oriente e India (otros posibles centro de origen) y en la península Arábiga, en Asia, en Europa y Sudamérica. En Chile se encuentra de forma alóctona y asilvestrada, desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región Metropolitana, incluidas las islas del Archipiélago de Juan Fernández, pero es poco lo que se conoce (Behn, 1942-1943; Anjani, 2012).

Las densidades de siembra oscilan entre 2.000 - 5.000 plantas ha⁻¹, aunque al parecer podrían emplearse densidades mayores. Los distanciamientos varían entre 1,5 - 4 m entre hileras y 1 - 2 m entre plantas. Las productividades que se obtienen son muy variables, dependiendo principalmente de la variedad empleada y el lugar geográfico (los cultivos tropicales obtienen mayores productividades), alcanzando entre 450 - 3.000 kg semillas ha⁻¹ (Duke, 1983; Brigham, 1993; Pedrosa *et al.*, 2007).

Son diversos los usos que posee esta especie, pero en el último tiempo su potencial para ser empleado en la industria bioenergética como materia prima para la producción de biodiesel ha sido uno de los más nombrados. Este potencial se encuentra determinado por el contenido de aceite que poseen sus semillas, el cual oscila entre 35 - 55%. Se encuentra

constituido por los siguientes ácidos grasos: 1,0 - 1,5% palmítico, 0,5 - 1,5% esteárico, 2,5 - 4,0% oleico, 82,0 - 92,3% ricinoleico (C 18:1-OH), 2,8 - 6,0% linoleico y 0,2 - 0,8% linolénico. También existen variedades con contenidos muy variables para los ácidos ricinoleico, 9,9 - 88,6%, y oleico, 1,7 - 83,2% (Scholz y da Silva, 2008; Anjani, 2012).

Se emplea principalmente para la producción de aceite, el cual es empleado de forma industrial o medicinal. Entre los usos industriales se utiliza en la elaboración de lubricantes para jet y para algunos tipos de motores, también en la fabricación de materiales de pintura y barnices, tintas, adhesivos, poliuretano, entre otros (Duke, 1983; Ogunniyi, 2006).

La torta de molienda puede ser empleada como fertilizante por su alto contenido de nitrógeno, o bien como alimento animal, pero para esto es necesario tratarlo ya que contiene una proteína tóxica denominada como Ricina, las hojas también poseen esta proteína. También se emplea como barrera natural, ya que los animales no lo utilizan como alimento, debido a su toxicidad (Ogunniyi, 2006).

Jatropha o piñon (*Jatropha curcas* L.)

J. curcas L., miembro de la familia Euphorbiaceae, es conocida por varios nombres común. *Jatropha* es empleada en todos los idiomas, y representa una generalización del nombre científico. En español también se le conoce como piñon, piñoncito o coquito, mientras que en inglés como physic nut y purging nut, purghère en francés, Mundubi-assu en portugués, purgiernub en alemán y fagiola d'India en italiano. Además de existir otros nombres vernaculares en países africanos y asiáticos, y algunos nativos en su distribución natural.

Es un árbol pequeño o un gran arbusto que puede llegar a medir entre 5 y 7 m de altura, pero que bajo condiciones óptimas puede llegar inclusive hasta 8 o 10 m de alto. Su tronco es recto, con madera suave y corteza de color blanquecino o grisáceo. Las ramas crecen de manera horizontal y son delgadas, contienen látex en su interior que es de color blanco, lechoso o amarillento. Las hojas pueden tener un comportamiento perennifolio o caducifolio, dependiendo del lugar en que se encuentre la planta. En su ambiente natural las hojas son perennes, mientras que en zonas donde las temperaturas son bajas, normalmente tienen un comportamiento decíduo; su copa es ancha e irregular. Las hojas son palmatífidas y se disponen de manera alternada en el tallo, tienen entre 4 y 7 lóbulos acuminados (Figura 23). En los primeros estados de desarrollo son de color violeta pálido o violeta, pasando posteriormente a una tonalidad verde amarillenta, cuando maduran toman una tonalidad verde oscuro, miden entre 6 y 15 cm de largo y ancho aunque en algunos casos, podrían llegar hasta 40 cm de largo y 35 cm de ancho (Heller, 1996; Singh *et al.*, 2006; Joerdens-Roettger, 2007; Kumar y Sharma, 2008; Román *et al.*, 2012).

Las flores de color amarillo verdoso son monoicas y unisexuales (diclino), en ocasiones pueden darse flores hermafrodita. Se encuentran agrupadas en inflorescencias cimosas denominadas dicasio, las que se posicionan de manera terminal en las ramas, por cada inflorescencia se producen alrededor de 10 frutos. La flor central es la pistilada (femenina),

mientras que las laterales son grupos de flores estaminadas (masculinas). En cada inflorescencia pueden haber entre 1 a 5 flores femeninas y entre 25 a 93 flores masculinas. La diferencia entre las flores masculinas y femeninas se da en que las femeninas son un poco más grandes que las masculinas y en que las brácteas de las femeninas son acuminadas, mientras que las masculinas son aovadas. El fruto, trilobular, es una cápsula drupácea, con forma elipsoidal que mide entre 2,5 y 4 cm de largo y de 2 a 2,5 cm de ancho, son de color verde a café oscuro o negra; cada fruto contiene 3 semillas. Las semillas tienen forma oblonga, son de color negro y miden de 2 a 3 cm de largo y 1 cm de ancho (Dehgan y Webster, 1979; Heller, 1996; Singh *et al.*, 2006; Kumar y Sharma, 2008).

Es nativa de Centro América y México, pero ha sido introducida a diversos países. En la actualidad se encuentra distribuida en varios países de Asia, África y Oceanía, siendo algunos de estos países los principales productores (Heller, 1996). No existen poblaciones nativas o asilvestradas de *Jatropha* en Chile, se han efectuado algunos ensayos para evaluar su adaptabilidad a las condiciones del país con resultados muy diversos, y que aún no han sido concluyentes.

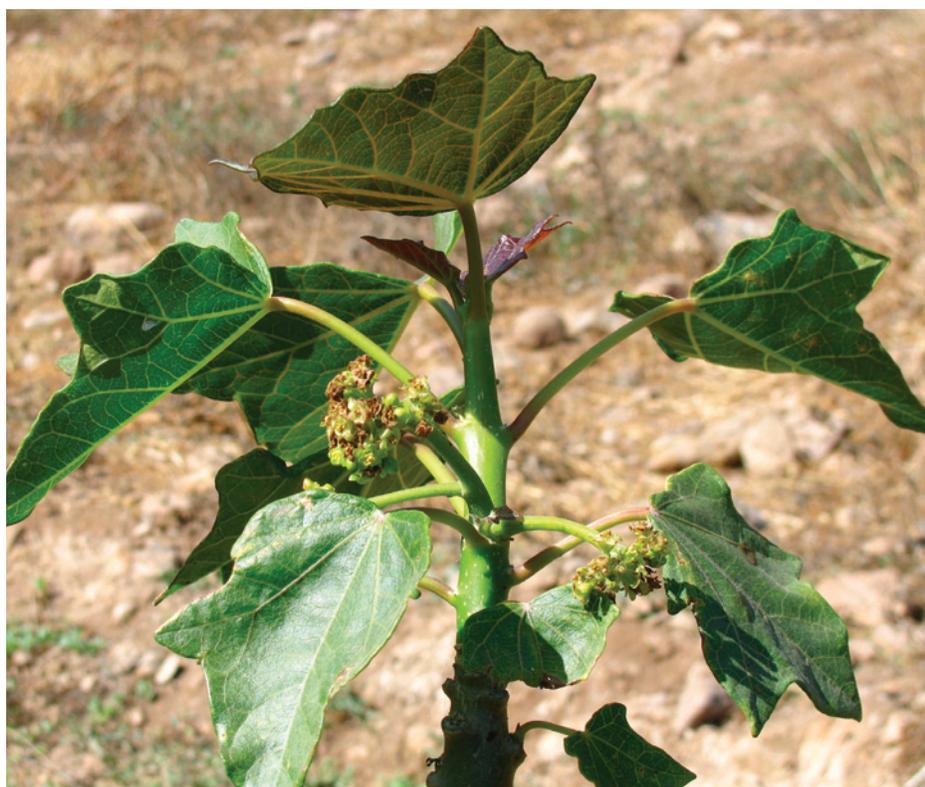


Figura 23. *Jatropha curcas* L.

Crece en climas tropicales o subtropicales, en zonas donde la temperatura fluctúa entre 15 - 36 °C, aunque su óptima está entre 20 - 28 °C, normalmente crece en bajas altitudes, siendo lo común hasta los 500 m, pero ha sido cultivada hasta los 1.800 m. Se encuentra en lugares donde la precipitación oscila entre 200 - 4.000 mm al año, aunque mucha precipitación favorece la producción vegetativa por sobre la de frutos, para lograr una buena producción de frutos lo ideal son entre 600 - 1.500 mm anuales. Se adapta a condiciones térmicas moderadas con inviernos suaves y veranos cálidos con influencia marina. Valles y serranías costeras. Requiere suelos profundos (sobre 80 cm), que tengan buen drenaje y aireación, que tengan hasta un 30° de pendiente, crece en suelos pobres y pedregosos, aunque los suelos franco arenosos y francos son los mejores, posee una mediana tolerancia a la salinidad y crece en suelos con pH de 5,0 - 9,0, pero los óptimo son los de pH entre 6,0 - 8,0 (Heller, 1996; Achten *et al.*, 2008; Kheira y Atta, 2009; Kumar y Sharma, 2008).

La densidad de la plantación comercial para obtención de aceite oscila entre 1.111 - 2.500 plantas ha⁻¹, estando distancias de 2 - 3 m entre hileras y plantas. Para una plantación con fin de conservación de suelos es de entre 4.000 - 6.700 plantas Km⁻¹. Las productividades de semillas son muy variables estando entre 400 - 12.000 kg ha⁻¹, dependiendo de muchos factores, tanto climáticos como de las prácticas del cultivo (Román *et al.*, 2012).

Uno de los principales usos es como barrera natural, principalmente cubriendo cultivos agrícolas, ya que al existir variedades tóxicas y al ser impalatable para los animales evita que estos lleguen a los cultivos. Éstas barreras también pueden emplearse para controlar la erosión o recuperar suelos degradados (Heller, 1996; Singh *et al.*, 2006; Kumar y Sharma, 2008).

Las hojas y las semillas pueden ser empleadas como alimentos en algunas situaciones. *Jatropha* es una especie que generalmente es considerada como tóxica, debido principalmente a la presencia de esteroides de forbol, curcín y otros componentes, pero se han encontrado en zonas de México y de Centro América algunas variedades no-tóxicas, que contienen menos del 5% de esteroides de forbol. Precisamente son estas variedades las que son consumidas en algunas zonas de México, de todos modos, las hojas y partes del fruto son cocidos o asados para poder ingerirlos (Heller, 1996; Achten *et al.*, 2008; Kumar y Sharma, 2008).

El aceite que se extrae de las semillas puede ser empleado de distintas formas, el que se encuentra entre 28 y 39,1%, y está constituido por los siguientes ácidos grasos: 11,3 - 19,5% palmítico, 6,7 - 17% esteárico, 12,8 - 47% oleico, 31,4 - 47,3% linoleico, 4,7% araquídico, 1,8% gadoleico y 0,6% behénico. El uso más común es para la producción de biodiesel, aunque también se utiliza para el tratamiento de algunas enfermedades dermatológicas y para aliviar el dolor producido por el reumatismo. El aceite se puede emplear como insecticida o molusquicida, ya que también posee esteroides de forbol en su composición. El otro uso que se le da al aceite es como lubricante en motores de baja revolución (Heller, 1996; Biswas *et al.*, 2006; Kumar y Sharma, 2008).

La torta de molienda se puede ocupar de variadas formas. Al igual que las otras partes del árbol, la torta también posee componentes tóxicos que la imposibilitan para ser empleada en alimentación, pero por medio de procesos químicos es posible disminuir su toxicidad y de esa manera servir para alimentación de ganado. El uso más común de la torta es como fertilizante, en su composición tiene abundante contenido de nitrógeno, convirtiéndola en un excelente abono para el suelo (Biswas *et al.*, 2006; Kumar y Sharma, 2008).

Jojoba [*Simmondsia chinensis* (Link) C.K. Schneid.]

S. chinensis, miembro de la familia Simmondsiaceae, conocida comúnmente como jojoba en español y goat nut en inglés, además de pnaocl por dialectos nativos mexicanos.

Es un arbusto erecto, postrado o rastrero perennifolio, que mide entre 0,5 - 5 m de altura. La corteza del tallo presenta un color verde pálido o verde azulado. El sistema radical se compone de unas pocas raíces principales pivotantes, que crecen hacia abajo (pueden penetrar hasta 10 m de profundidad) y de pocas raíces fibrosas a los lados. Las hojas son opuestas, oblongas, pubescentes y de consistencia coriácea, están cubiertas de cera y son de color azul grisáceo, miden entre 2 - 5 cm de largo y 1 - 2 cm de ancho (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; FAO, 2006).

Las flores son apétalas, unisexuales y dioicas; las flores femeninas son pequeñas y axilares, de color verde pálido (Figura 24); las flores estaminadas se encuentran en racimos redondeados de color amarillo pálido y son más pequeñas que las femeninas. El fruto es una cápsula dehiscente, con tamaño, forma y color muy variado, puede ser relativamente corta y redondeado, largo y agudo, oval o elíptico (polimorfismo). Las semillas son de color café oscuro, también presenta altas variaciones en tamaño (normalmente entre 0.6 - 3 cm de largo), forma y pubescencia (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; FAO, 2006).

Se desarrolla preferentemente en climas desérticos, donde existe una gran amplitud térmica, creciendo en zonas en donde la temperatura oscila entre 10 - 35 °C. Se encuentra desde el nivel del mar hasta los 1.450 m de altitud. Requiere de entre 150 - 550 mm de precipitación al año, siendo su óptimo entre 300 - 450 mm, no soporta zonas con alta precipitaciones. Se adapta a serranías y valles interiores. Zonas con condiciones áridas, con veranos calurosos y secos, inviernos con moderado régimen de heladas. Necesita de suelos que sean profundos y con buen drenaje, de textura arenosa y franca arenosa, aunque también crece en suelos francos. Puede encontrarse en suelos con pendientes de hasta 25% y que sean ligeramente pedregosos. Tiene alta tolerancia a la salinidad, creciendo en zonas que son bañadas o regadas con agua marina. Se da en suelos con pH entre 5,0 - 8,5, aunque lo óptimo es un pH neutro, entre 6,0 y 7,0 (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; Román *et al.*, 2012).

Es originaria de México y Estados Unidos, principalmente en el noroeste de México en el área del desierto de Sonora, y en Baja California Norte y Sur (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Se ha introducido en los 5 continentes, siendo Argentina el principal productor, seguido por Israel, Estados Unidos, México, Egipto, Australia, Chile y Perú. En Chile se introdujo en



Figura 24. *Simmondsia chinensis* (Link) C.K. Schneid.

la década de los 70, sin muy buenos resultados, por lo que se abandonaron las plantaciones efectuadas. En la actualidad se distribuye entre las regiones de Arica y Parinacota y Metropolitana (Cappillino *et al.*, 2003)

En plantaciones comerciales se alcanzan densidades de entre 1.000 - 2.000 plantas ha⁻¹, posicionando 1 macho por cada 5 hembras. Las producciones se encuentran alrededor de 600 kg semillas ha⁻¹ durante los 3 primeros años, posteriormente una vez que se haya estabilizado, alcanzan productividades de entre 1.000 - 4.000 kg semillas ha⁻¹ (Benzioni *et al.*, 1999; Vázquez-Yanes *et al.*, 1999).

Entre los usos que posee el cosmetológico es el más importante. Jojoba es una de las pocas fuentes de cera líquida, y cuando tiene calidad para cosméticos no es tóxica para las personas. Entre las propiedades que posee aumenta la elasticidad y flexibilidad de la piel. Se usa para el cuidado del pelo y del cuero cabelludo. Con esta cera se elaboran labiales, maquillaje y esmaltes, champú, aceites capilares, cremas faciales, lociones, etc. (Van Boven *et al.*, 1997; FAO, 2006).

Otros usos que se le da son como alimento, tanto para humanos como ganado, medicinal e industrial. La semilla y el aceite pueden ser consumidos como bebidas o leche, además se emplea en la preparación de galletas y pan. La semilla contiene Simmondsina que inhibe el apetito, colabora con el acné, cura heridas y ayuda en problemas estomacales. El aceite puede emplearse en la elaboración de lubricantes, barnices y plastificantes. La torta de molienda posee 30% de proteína, pero debe emplearse con cuidado ya que posee sustancias tóxicas para los animales (Van Boven *et al.*, 1997; Wisniak, 1994; FAO, 2006).

El aceite de sus semillas también tiene valor por su potencial energético, estas poseen entre 43,8 - 60%, y se encuentra constituido por los siguientes ácidos grasos: 0,7 - 1,0% palmítico, 0,7 - 1,1% esteárico, 2,9 - 10,2% oleico, 78,9 - 82,8% gadoleico, 8,8 - 12,8% erúxico y 0,2 - 0,4% tetracosenoico (Kayani *et al.*, 2000).

Pimiento (*Schinus molle* L.)

S. molle, es un miembro de la familia Fabacea, y vulgarmente es conocido como pimiento, pimiento falso, árbol del Perú, pirwi y pirú en países hispano hablantes, mientras que en países de habla inglesa es conocido como pepper tree, false pepper plant o California pepper tree.

Es un árbol de tamaño medio que mide entre 8 y 10 m de alto, llegando en ocasiones hasta 15 m, su diámetro es de 15 a 35 cm, en Chile se han registrado individuos de hasta 25 m de alto y 1,5 m de diámetro (Figura 25). La copa es redondeada y abierta con ramas flexibles, de hasta 8 m de diámetro por lo que se emplea para dar sombra. La corteza es rugosa y fisurada, se desprende en placas pequeñas y exuda resinas aromáticas, mide hasta 10 mm de grosor y es de color marrón oscuro o cenizo. Las hojas pecioladas son alternas y compuestas, pari o imparipinnadas y miden de 10 a 30 cm de largo, el peciolo mide de 2 a 5 cm de largo, cada hoja posee de 10 a 41 foliolos; los foliolos son sésiles y opuestos, con forma linear-lanceolada a lanceolado y el borde dentado, la base es cuneada o truncada y el ápice agudo a acuminado, son de color verde amarillento o verde cenizo y miden de 2 a 8 cm de largo y 0,3 a 1 cm de ancho (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; Anónimo, 2003; Ojeda y Mesa, 2008).

Las flores hermafroditas o unisexuales, se reúnen en inflorescencias paniculares axilares (en las hojas terminales) o terminales, son pubescentes y miden hasta 20 cm de largo. Las flores son muy pequeñas, miden alrededor de 6 mm de diámetro; el cáliz es pentámero con sépalos muy pequeños, de 1 mm de largo; la corola es pentámera, los pétalos son de color amarillo verdoso, blanco verdoso o amarillo y mide 2 mm de largo; cada flor posee 10 estambres. El fruto es una drupa semicarnosa y globosa, son de color rojizo o rosado y miden de 5 a 9 mm de largo y 4 a 6 mm de ancho; cada fruto posee una o dos semillas. Las semillas son redondeadas u oblongas, de color castaño claro y comprimida, miden de 2 a 2,5 mm de largo (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; Castillo y Moreno, 2002; Anónimo, 2003).



Figura 25. *Schinus molle* L.

Es una especie nativa de Sudamérica (Argentina, Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú, Paraguay, Uruguay y norte de Chile). Ha sido introducida y se ha adaptado a España, Australia, Nueva Zelanda, México, sur de Estados Unidos, en países de Centro América, del sur de África y de Asia y en algunas islas del Pacífico, a pesar de haber sido introducida en varios países hasta ahora no ha mostrado señales de ser una especie invasiva, aunque de todos modos fue incorporada en un listado como potencial invasiva en Sudáfrica (Iponga *et al.*, 2008; Ojeda y Mesa, 2008; Queensland Government, 2011).

Naturalmente se desarrolla en climas semiáridos, aunque se ha adaptado para sobrevivir en zonas más templadas. Es posible encontrarla en lugares con temperaturas promedio entre 18 y 34 °C y precipitaciones 300 a 2.000 mm año⁻¹. En su distribución natural se desarrolla en una amplia variedad altitudinal, siendo posible encontrarla hasta 3.850 m de altitud en Los Andes peruanos (Howard y Minnich, 1989; Anónimo, 2003). No es muy exigente en suelos pudiendo establecerse en suelos rocosos y secos, su amplio sistema radical (20 a 30 m de profundidad) le permite alcanzar aguas subterráneas, también tolera suelos levemente alcalinos, aunque los neutros son los óptimos. Los suelos francos, franco-arenosos y franco-arcillosos son los que muestran mejor adaptabilidad (Anónimo, 2003).

No existe mucha información sobre plantaciones que se hayan efectuado. Sólo se menciona que las plantaciones se efectúan en distanciamiento de 8 m, en suelos profundos y sin interrupciones. Se obtienen productividades promedio de 21,7 kg árbol⁻¹. Comienza a producir a partir del tercer año y se mantiene durante 100 años aproximadamente (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; Anónimo, 2003; Iponga *et al.*, 2009).

Son diversos los usos que posee esta especie, uno de los principales es como restaurador ecológico. Al ser una especie considerada como rústica y sin grandes exigencias, permite colaborar con la recuperación de suelos degradados y erosionados, mejora la fertilidad de los suelos y le da estabilidad a los sustratos donde se desarrolla (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999).

Históricamente ha sido empleada como fuente de energía, la leña y carbón han sido utilizados con este fin en su distribución natural. La madera también se emplea para la construcción de herramientas o mangos de enseres rurales (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999).

Se ha evaluado su potencial para ser empleado como biopesticida. Los aceites esenciales de las hojas y los frutos han mostrado efectividad contra la mosca común (*Musca domestica*) y el escarabajo de las hojas (*Xanthogaleruca luteola*). Además la resina obtenida desde diversos órganos y partes del árbol presenta propiedades como antifúngico, antiviral y bactericida, siendo efectiva por ejemplo contra hongos del género *Fusarium* y *Aspergillus*, causantes de importantes enfermedades vegetales (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999; Chiffelle *et al.*, 2013).

Otros usos son alimenticios, de los frutos se obtiene una bebida refrescante y se puede emplear como condimento, siendo similar a la pimienta negra. También como forraje para animales, sobre todo en momento de escases o en sequías. Se extrae resinas desde todos los órganos la que, además de emplearse como biocida, se utiliza como base para la elaboración de goma de mascar, en la elaboración de barnices y con fines medicinales (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999).

Tamarugo (*Prosopis tamarugo* Phil.)

P. tamarugo es miembro de la familia Fabaceae, y vulgarmente es conocido como tamarugo, es un árbol que mide en promedio 15 de alto, aunque se registran individuos de hasta 18 m, y entre 0,5 y 1,5 m de diámetro. La copa del árbol puede llegar hasta los 20 m. La corteza es rugosa y hendida, de color pardo oscuro o grisácea, es áspera y mide 1,5 cm de grosor (Figura 26). Las ramas son arqueadas o flexuosas, de color pardo-rojizo y con espinas; las espinas se ubican en posición axilar y en pares, miden entre 0,5 y 3,8 cm de largo, inclusive hasta 6 cm. Las hojas son compuestas, bipinnadas y alternas, miden de 2,5 a 4,5 cm de largo y 8 a 10 mm de ancho, y posee entre 6 y 18 pares de folíolos; los folíolos elíptico-oblongos, glabros, ápice obtuso y con margen entero, miden de 3 a 7 mm de largo y 1 a 2 mm de ancho (Galera, 2000; Anónimo, 2012b).

Las flores, hermafroditas, se reúnen en inflorescencias tipo racimo espiciforme, con un raquis piloso de hasta 6 cm de largo; las flores son sésiles y miden alrededor de 4 mm de largo. El cáliz es gamosépalo y pentadentado, pubescente en la base y de 1,0 a 1,5 mm de largo; la corola pentámera, campanulada y gamopétala, con pétalos de color amarillo o amarillo dorado y pubescentes en la base que miden hasta 4,5 mm de largo; las flores poseen 10 estambres de 7 mm de largo. El fruto es una legumbre coriácea, gruesa y cilíndrica con



Figura 26. *Prosopis tamarugo* Phil.

forma similar a un maní, es de color castaño rojizo, verde amarillento o amarillo paja y mide entre 2,5 y 4,0 cm de largo y 7 y 10 mm de diámetro; cada uno contiene alrededor de 18 semillas. Las semillas son de color marrón a castaño oscuro y miden de 3,8 a 5,2 mm de largo, 2,6 a 3,2 mm de ancho y 1,1 a 1,4 mm de espesor (Galera, 2000; Castillo y Moreno, 2002; Anónimo, 2012b).

Es una especie nativa de Chile, y más específicamente del Norte Grande del país, de la Pampa del Tamarugal, Región de Tarapaca, en el Desierto de Atacama. También se registran poblaciones en Toconao y San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta, y en Canto del Agua, Copiapó, Región de Atacama. En el caso de las poblaciones en las regiones de Antofagasta y Atacama, fueron introducidas por medio de un programa de reforestación ejecutado por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) entre los años 1965 y 1973 (Mooney *et al.*, 1980; Galera, 2000; Vargas y Bobadilla, 2000; Anónimo, 2012b).

En la Pampa del Tamarugal, principal centro de distribución de esta especie, prácticamente no existen precipitaciones. Por esta razón presenta un sistema radical que puede ser 4 veces más profundo que la biomasa aérea, capaz de captar aguas subterráneas. En casos donde la capa freática se encuentra a mayor profundidad, las hojas tienen la posibilidad de captar la humedad ambiental (sobre 80%) y transportarla hasta las raíces, sobre todo en los meses de primavera-verano donde la humedad puede variar entre 10% durante el día hasta 100% durante la noche. También existe una fuerte oscilación térmica, llegando hasta 35 °C durante el día y 8 °C durante la noche (Mooney *et al.*, 1980; Sudzuki, 1985).

No es una especie exigente en calidad del suelo, pudiendo desarrollarse en suelos con altos niveles de sal, e inclusive en aquellos con capas de 0,1 a 0,6 m de costra salina. También en suelos que son arcillosos o arenosos. Crece en suelos que sean profundos, ya que en los primeros estados de desarrollo la raíz puede alcanzar hasta 1,2 m de largo (Mooney *et al.*, 1980; Sudzuki, 1985; Galera, 2000).

La producción de frutos alcanza entre 41,5 y 141,5 kg árbol⁻¹, aunque lo normal es de 57,4 kg árbol⁻¹. Las plantaciones, con objetivo de reforestación, se efectúan una vez que las plántulas alcancen de 8 a 10 cm de alto, cuando ya ha logrado un desarrollo radical. En terreno se consideran distanciamientos de 10 x 10 o 15 x 15, generalmente en una extensión territorial de 1 Km². Se deben efectuar hoyos de 30 cm de diámetro y entre 40 y 50 cm de profundidad. Una de las principales condiciones para la plantación de tamarugo es el riego, ya que la viabilidad de las semillas en condiciones naturales es baja, brotando en las ocasiones en que se producen aluviones o eventos climáticos anormales (Habit *et al.*, 1980; Galera, 2000).

Uno de los más importantes usos que se le ha dado a esta especie tiene relación con la habilitación de zonas áridas para un sistema agro-forestal. Tamarugo protege las aguas subterráneas, disminuye el impacto de los vientos, actúa como un regulador térmico, y otorga sombra para los animales y pobladores (Habit *et al.*, 1980; Galera, 2000).

Los frutos y las hojas pueden emplearse para alimentación animal, tanto para ganado ovino, bovino y caprino, también los brotes sirven con este fin, aunque no es muy común (Habit *et al.*, 1980). Otro importante uso es el energético, el cuál durante muchos años ha sido utilizado con este fin. Sobre todo durante la época de expansión salitrera era normal emplear la biomasa aérea, carbón y madera. El potencial energético de esta especie se encuentra determinado por su uso dendroenergético. El duramen posee un poder calorífico de $4.801 \text{ Kcal kg}^{-1}$, mientras que el de la corteza es de $4.496 \text{ Kcal kg}^{-1}$ (Rosende *et al.*, 1985; Galera, 2000).

Tara [*Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze]

C. spinosa, miembro de la familia Fabaceae, y vulgarmente conocida como tara, acacia amarilla, algarroba del Perú, huarango, guaranga, tanino, vainillo o dividivi en español. Es un árbol de porte pequeño o arbusto grande, que mide entre 3 y 5 m de alto, pudiendo llegar hasta 8 m. La copa es irregular, poco densa y con ramas ascendentes, se encuentran cubiertas por vellosidades suaves y cortas y por espinas cónicas entre los nudos. El tronco es corto y, generalmente, ramificado desde la base; la corteza es rugosa y de color gris. Las hojas son compuestas, bipinnadas y paripinnadas, el raquis es levemente tomentoso y miden hasta 14 cm de largo, cada hoja posee entre 2 y 5 pares de folíolos; los folíolos son de color verde oscuro, glabros en el haz y puede ser pubescente en el envés, tiene forma ovoide, oblonga o elíptica, son sésiles y con la base oblicua, el margen es entero y con el ápice obtuso o emarginado, miden de 2,5 a 4 cm de largo y 1,5 a 2 cm de ancho (Hoffman, 1998; Lapa, 2004; Dostert, 2009; Liu, 2009; de Lorenzo-Cáceres, 2011).



Figura 27. *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze

Las flores, hermafroditas, se reúnen en inflorescencias tipo racimo espiciforme algo espinosos, de 8 a 20 cm de largo y que se ubican de manera terminal en las ramas; las flores se ubican sobre pedicelos levemente pubescentes. El cáliz es pentámero y asimétrico, los sépalos están fusionados en la base formando un tubo, el sépalo inferior (ventral) es el más largo, curvado y con el ápice dentado, miden hasta 6 mm de largo; la corola es pentámera con los pétalos libres, son de color amarillo o rojo-amarillento, su tamaño es aproximadamente el doble de los sépalos (8 - 9 mm de largo); con 10 estambres del mismo tamaño de los pétalos. Los frutos son legumbres coriáceas, aplanadas e indehiscentes, de color café-rojizo claro, miden de 6 a 10 cm de largo y 1 a 2,5 cm de ancho; cada fruto posee de 5 a 8 semillas (Figura 27). Las semillas son redondeadas o reniformes, de color negro o marrón oscuro (Hoffman, 1998; Lapa, 2004; Dostert, 2009; Liu, 2009; de Lorenzo-Cáceres, 2011).

Es nativa de Sudamérica, de Perú, Bolivia, Ecuador, Venezuela y el norte de Chile y Argentina. Ha sido introducida en Cuba, Estados Unidos, Brasil, España y en el norte y este de África. En Chile se encuentra entre las regiones de Arica y Parinacota y Metropolitana, aunque no es muy frecuente. Se encuentra adaptada a condiciones semiáridas, en zonas con precipitaciones entre 230 y 500 mm y temperaturas medias anuales de 14,7 a 27,5 °C. Crece en zonas altas, entre 1.000 y 3.100 m de altitud. Los mejores suelos son los silíceos y arenosos, que preferentemente sean neutros (pH entre 6,8 y 7,1) y profundos. De todos modos, no es muy exigente en la calidad del suelo, pudiendo desarrollarse en sustratos pedregosos, degradados y lateríticos, e inclusive en suelos ligeramente ácidos a medianamente alcalinos (Dostert, 2009; Liu, 2009).

Comienza a producir frutos a partir del sexto año de producción, logrando los máximos niveles entre los 20 y 50 años, después de los 65 se reduce notoriamente, agotándose al llegar a los 85 años. Cada árbol produce alrededor de 10 kg de legumbres, aunque en condiciones óptimas pueden alcanzar hasta 40 kg árbol⁻¹. Por lo general las plantaciones tienen densidades de entre 1.000 y 2.500 plantas ha⁻¹. El trasplante debe realizarse dentro de la primera o segunda semana luego que hayan germinado, ya que posee un rápido crecimiento radical. Se recomienda seguir prácticas culturales comunes para producciones silvícolas, considerando tratamientos con pesticidas, podas, raleos y riego (Dostert, 2009; Liu, 2009).

Uno de los principales usos que posee esta especie es en la extracción de taninos, los que se encuentran en alrededor de 50% en el fruto. Se utilizan para fabricar diversos productos, o para el curtido de cueros, en la fabricación de plásticos y adhesivos, como bactericida y fungicida, en la industria vitivinícola, para aclarar los vinos y en la industria cervecera como sustituto de la malta., entre otros. También se extrae ácido gálico, que se emplea en la industria del aceite y cervecera como un elemento blanqueador o decolorante, también para fotografías, tintes y manufactura de papel (Lapa, 2004; Dostert, 2009; Liu, 2009).

Otro uso importante es en la producción de energía, empleada históricamente como fuente energética tanto por su madera como por el carbón producido de ella. La madera también se emplea para la confección de vigas, para construir viviendas, mangos de herramientas y postes para cercos (Lapa, 2004; Dostert, 2009; Liu, 2009).

Finalmente las semillas poseen uso forrajero, ya que tiene un alto contenido proteico, con aminoácidos como metionina y triftofano en altas concentraciones. También posee un buen contenido de grasas y aceites que inclusive podrían servir para alimentación humana (Lapa, 2004; Dostert, 2009; Liu, 2009).

2.2. Principales Estréses Abióticos

Las especies vegetales en ocasiones se ven sometidas a una serie de condiciones adversas que pueden afectar su normal desarrollo. Los estrésés abióticos son una problemática a la que se pueden enfrentar y que cada vez es más frecuente, además desde un punto de vista económico-productivo, afecta los niveles de producción obtenidos. Entre los estrésés más comunes se encuentran aquellos causados por la salinidad, la aridez, la ausencia de nutrientes básicos y por niveles de toxicidad (Athar y Ashraf, 2009). Diferentes tipos de estrésés abióticos, generan pérdidas desde el punto de vista productivo, *e.g.* cuando se ven afectados por sequía disminuye 17%, 20% por salinidad, 40% por altas temperaturas, 15% por baja temperatura y 8% por otros factores (Ashraf *et al.*, 2008; Athar y Ashraf, 2009). En este caso se enfocara la adaptación de especies vegetales bajo condiciones salinas y sequía.

Adaptación a condiciones salinas

Existen dos métodos para combatir los problemas de salinidad, a) tomar medidas preventivas y correctivas para acondicionar los suelos y disminuir los efectos sobre la agricultura, método que es muy costoso y no siempre se obtienen los resultados esperados, y b) emplear especies adaptadas a condiciones salinas -especies halófitas o cultivos tolerantes a la salinidad-, o bien, mejorar los sistemas de absorción de Na^+ y Cl^- de las plantas, el que puede ser modificado genéticamente (Ashraf *et al.*, 2008; Athar y Ashraf, 2009). Del mismo modo, el estrés salino en el suelo puede afectar a las especies vegetales de dos maneras distintas, a) complicando el normal crecimiento del sistema radical en el sustrato salino y afectando la extracción del agua, y b) altos niveles de sales en las plantas puede llegar a ser tóxico en algunos casos (Munns y Tester, 2008). Generalmente cuando se habla de salinidad en el suelo se asocia a la presencia de cloruro de sodio (NaCl), ya que es la sal más abundante y soluble, pero también existen otras sales que afectan a las plantas, sulfato de magnesio (MgSO_4) y cloruro de potasio (KCl) son algunos ejemplos (Uphof, 1941; Munns y Tester, 2008).

Las plantas halófitas, aquellas que poseen altos niveles de tolerancia a las sales en el sustrato donde se desarrollan (Uphof, 1941), son una de las alternativas viables para suelos salinos, y que por lo general son nativas en suelos con este tipo de condiciones (Ashraf, 2004). Es muy variable la tolerancia que poseen las especies vegetales en suelos salinos, cuando la conductividad eléctrica es igual o superior a 4 dS m^{-1} o 40 mM de NaCl (Tabla 4) los suelos son considerados como salinos (Rogers *et al.*, 2005; Munns y Tester, 2008). El género *Atriplex* -especies halófitas- soporta altos niveles de salinidad pudiendo alcanzar altas productividades a concentraciones de sales de 700 mM de NaCl (cuando una especie se desarrolla en suelos con 400 mM de NaCl, se consideran como halófitas), mientras que otras especies -no halófitas- mueren cuando los niveles de sales alcanzan 100 mM de NaCl, o menos inclusive (Flowers *et al.*, 1977; Flowers, 2004; Munns y Tester, 2008).

Tabla 4. Niveles de salinidad y sus características (Rogers *et al.*, 2005).

Categoría	Concentración (dS m^{-1})	Características	Productividad
Baja salinidad	2 - 4	Salinidad en el subsuelo	Alta
Moderada salinidad	4 - 8	Variables, a veces anegados	Media
Alta salinidad	> 8	Áreas de descarga: filtrado o seco	Baja

Además de las especies halófitas, cultivos, variedades o ecotipos adaptados a condiciones salinas también representan una posibilidad para la producción en suelos con altas concentraciones de sales. Existen varios antecedentes en donde se han analizado especímenes de distintos orígenes, encontrándose que algunos de ellos se desarrollan en sustratos salinos, no al mismo nivel que las halófitas, pero si en mejores condiciones que plantas glicófitas (Athar y Ashraf, 2009). Krishnamurthy *et al.* (2007) al analizar distintos orígenes de sorgo azucarero (*Sorghum bicolor*) encontraron que de entre 100 genotipos distintos habían 7 que eran tolerantes a altos niveles de salinidad (18 dS m^{-1}), mientras que 10 eran muy sensibles a esas condiciones. Esto demuestra la alta variabilidad fisiológica que puede existir en una misma especie, existiendo ecotipos adaptados a condiciones adversas mientras que otros muestran una mayor sensibilidad, por lo que es importante conocer los recursos genéticos que se poseen. En Chile Bastias *et al.* (2011) encontraron una variedad de maíz (*Zea mays*), denominada Lluteño, que se adapta a suelos con conductividad eléctrica de $5,5 \text{ dS m}^{-1}$ sin disminuir su productividad, considerando que en esas condiciones los niveles de productividad del maíz disminuyen (Maas *et al.*, 1983).

En la búsqueda de variedades adaptadas a condiciones salinas se han explorado diversas alternativas, el mejoramiento genético es una de ellas. No siempre cuando se cree haber encontrado o adaptada una especie a condiciones salinas es así (Munns, 2005), por lo mismo es necesario que se efectúen pruebas en todas las etapas fenológicas de la planta, ya que en algunas especies la tolerancia a la salinidad puede corresponder exclusivamente

a sólo una etapa de desarrollo. Tampoco sirve que se efectúen ensayos sólo a nivel de laboratorio, sino que también se deben realizar bajo condiciones naturales, ya que son más las variables que pueden influir en el proceso adaptativo (Athar y Ashraf, 2009).

Adaptación a la sequía

El estrés provocado por la sequía, o bien por la falta de agua, es una de las mayores limitantes para la productividad, el que se puede ver potenciado también por otras variables como la temperatura y la intensidad lumínica (Reynolds *et al.*, 2005; Neumann, 2008; Athar y Ashraf, 2009). Ante la escasez de recurso hídrico, se han planteado tres maneras que pueden atenuar los efectos de la falta de agua sobre las plantas, a) mejores prácticas en la gestión del agua, que permitan un mayor ahorro del recurso, b) utilización de prácticas agronómicas que permitan el desarrollo adecuado de las plantas bajo condiciones de estrés hídrico, y c) selección de cultivos, ecotipos o variedades con bajos requerimientos hídricos para su desarrollo y/o productividad (Neumann, 2008; Athar y Ashraf, 2009).

En este caso, nos centraremos en la selección de individuos adaptados o, al menos a aquellos que poseen menores requerimientos hídricos para su desarrollo bajo condiciones de sequía. Las plantas adaptadas a condiciones de sequía, poseen métodos o mecanismos para salvarse (escapar) o evitar los efectos de la sequía. En el primer caso, salvarse (o escapar) de la sequía, las plantas logran una madurez más temprana y acortan su ciclo de vida, mientras que en el segundo, evasión de la sequía, las plantas mantienen un alto potencial hídrico, con lo que evitan los posibles daños que pueda ocasionarle el estrés hídrico (Boyer, 1982; Hall, 2001; Athar y Ashraf, 2009).

Salvarse de la sequía, tiene relación con acortar el ciclo de vida de las plantas, donde las etapas de desarrollo más sensibles (floración y fructificación) se producen durante el periodo previo a la ocurrencia de sequía (Hall, 2001; Peng e Ismail, 2004), *e.g.* la avena (*Avena barbata*) muestra una reducción en su ciclo de vida cuando se desarrolla en un ambiente más seco, aunque sus resultados productivos son menores que las que se encuentran en un ambiente con agua, logra sobrevivir y producir semillas (Sherrard y Maherali, 2006).

Evadir la sequía, también considerado como resistencia a la sequía, son las especies que no se ven afectadas por la falta de agua, sobreviviendo o, inclusive, aumentando productividades bajo estas condiciones (Hall, 2001; Athar y Ashraf, 2009). Son varias las maneras en que una planta puede adaptarse para atenuar los efectos provocados por la sequía, puede aumentar la resistencia estomática, disminuir el área foliar y por la reducción de la radiación absorbida, también por un incremento en la extensión el sistema radical, tanto en profundidad como lateral, y una mayor conductividad hidráulica, y manteniendo la turgencia con un ajuste osmótico (Schulze, 1986). Otra forma de colaborar con la resistencia a la sequía es la simbiosis que se produce entre organismos vegetales y hongos micorrícicos arbusculares, ya que permiten mejorar la conductividad hidráulica de las raíces, mantiene la turgencia, entre otros mecanismos (Davis Jr. *et al.*, 2002).



Capítulo 3

Ampliación de la Frontera Agrícola



La desertificación es la degradación persistente de los ecosistemas de las tierras secas producida por las variaciones climáticas y la actividad del hombre (FAO, 1993; Hotlz, 2003). Está presente en todos los continentes, excepto en la Antártida (Holtz, 2003) y afecta al medio de vida de millones de personas, entre los que se encuentran buena parte de la población de más bajos ingresos que habitan en zonas áridas (Malagnoux *et al.*, 2007).

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) define este proceso como «la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultantes de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas» (UCNDD, 1994). Por su parte, la degradación de las tierras se define como la reducción o pérdida de productividad biológica o económica de los suelos (FAO, 2003) y es ocasionada por procesos de degradación de la cobertura vegetal, erosión hídrica y eólica, salinización y variaciones en la calidad del suelo entre otros (PNUMA, 1999).

Los científicos han constatado que la temperatura promedio mundial ha aumentado 0,8 °C en los últimos 100 años, ocasionando un incremento en la cota del nivel del mar de más de 200 mm, y una disminución en la cobertura total de nieve de 3 millones de Km² aproximadamente, disminuyendo el volumen total de agua dulce disponible (UDP, 2012). Los predictivos señalan que de continuar la actual tendencia, en los próximos 100 años se anticipan cambios en la temperatura superficial de la atmósfera de 1,4 a 5,8 °C, situación que estaría atribuida a variaciones drásticas en los patrones de precipitaciones incluyendo la intensificación de los eventos climáticos extremos como fuertes precipitaciones, inundaciones, olas de calor, sequías entre otros, además de aumentos en el nivel del mar que podrían fluctuar entre 8 y 88 cm (UDP, 2012).

La desertificación en Chile afecta una superficie aproximada de 47,3 Mha, lo que equivale al 62,3% del territorio nacional (PNUD, 2011), correspondiente principalmente a la macrozona norte del país (desde la región de Arica y Parinacota hasta la región del Maule) e involucra a un millón y medio de personas, especialmente familias rurales de escasos recursos (Ministerio de Desarrollo Social, 2011). La desertización y la desertificación del suelo son regresiones ecológicas paulatinas de las que empezamos a entender sus consecuencias ambientales y sociales, como la deforestación, pérdidas de la fertilidad de los suelos, escasez de agua, bajos rendimientos de la producción agropecuaria y migración (Jiménez, *s/a*). Las principales causas de la desertificación masiva en la zona norte de Chile se pueden asociar a incendios forestales, procesos subsecuentes del cambio de uso de la tierra, la expansión minera, la exportación triguera y a la crisis del salitre, las que junto a la expansión demográfica tendrían mayor relevancia en el avance de este fenómeno hacia la región de Coquimbo, considerada una zona emblemática de la desertificación (CONAF, 2007).

Dado el carácter global y creciente del problema, en 1994 las Naciones Unidas propuso a los países la firma de la Convención Internacional para Combatir la Desertificación (UNCCD), con la finalidad de establecer un marco para todas las actividades encaminadas a combatir este fenómeno centrado en el aumento de la productividad del suelo, su rehabilitación y la conservación y reordenación de las tierras y recursos hídricos (CONAF, 2007). En 1997 el Estado chileno suscribió y ratificó la citada Convención, transformándose en Ley de la República (PNUD, 2011), además, el mismo año se diseñó el Programa de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertificación (PANCCD) implementado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), la que en 1999 realizó un catastro comunal acerca de la situación actual de la desertificación en el país (Tabla 5; CONAF, 2007).

Los escenarios territoriales de las áreas en procesos y/o peligro de desertificación en Chile (Figura 28), muestra que una superficie de 26,05 Mha, correspondiente al 45,7% de la superficie de la macrozona norte tendría una categoría de desertificación Grave, un 42,3% erosión Moderada, un 5,92% erosión Leve y un 6,07% no estaría afectada (Tabla 5). Este fenómeno se expresa con mayor magnitud en la Precordillera de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Atacama; la faja costera entre las regiones de Arica y Parinacota y Coquimbo, las áreas ocupadas por las comunidades agrícolas de las regiones de Atacama y Coquimbo, el Secano Costero entre las regiones de Valparaíso y del Biobío, la Precordillera andina entre las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Biobío, y las zonas degradadas entre la región de Aysén y Magallanes (PNUD, 2011).

El año 2002, el Gobierno de Chile a través de CONAF realizó una revisión del PANCCD-Chile y el cumplimiento de sus metas para el periodo 1997-2001, permitiendo la formulación de un Proyecto-País 2003-2007 que resumió la estrategia para abordar el desafío de controlar la desertificación y mitigar la sequía en una extensión correspondiente a dos tercios del territorio continental, definiéndose 8 hotspots o áreas prioritarias de acción correspondientes a la Puna, Desierto, Norte Chico, Secano y Precordillera, Araucanía, Patagonia y Territorios Insulares Oceánicos (CONAF, 2007).

Los cambios climáticos asociados a la disminución de las precipitaciones (Marzal, 2012), aumento de temperaturas (IPCC, 2007), las variaciones de la química atmosférica, y los atribuidos a los fenómenos del niño y la niña (Escobar y Aceituno, 1998), afectan cada vez con mayor intensidad al Pacífico Sur, alternando la pluviometría continental (Marzal, 2012). Actualmente, Chile atraviesa una sequía que se ha prolongado casi cinco años, en un hecho atribuido al fenómeno de La Niña, caracterizado por presentar bajas temperaturas asociadas a la Corriente de Humboldt, disminución en las precipitaciones particularmente en la zona norte (DGA, 2010) y también a los efectos del Calentamiento Global (Marzal, 2012). No obstante expertos han estimado que las sequías han formado parte habitual de la zona norte y centro del país desde 1950 y se ha registrado un déficit de precipitaciones desde 1924 (UDP, 2012). Como consecuencia de este fenómeno, la productividad agrícola en zonas sometidas a la desertificación en Chile muestra una caída del 32% con un impacto social que anualmente significa la migración de 45.000 personas del campo a las ciudades (UDP, 2012).

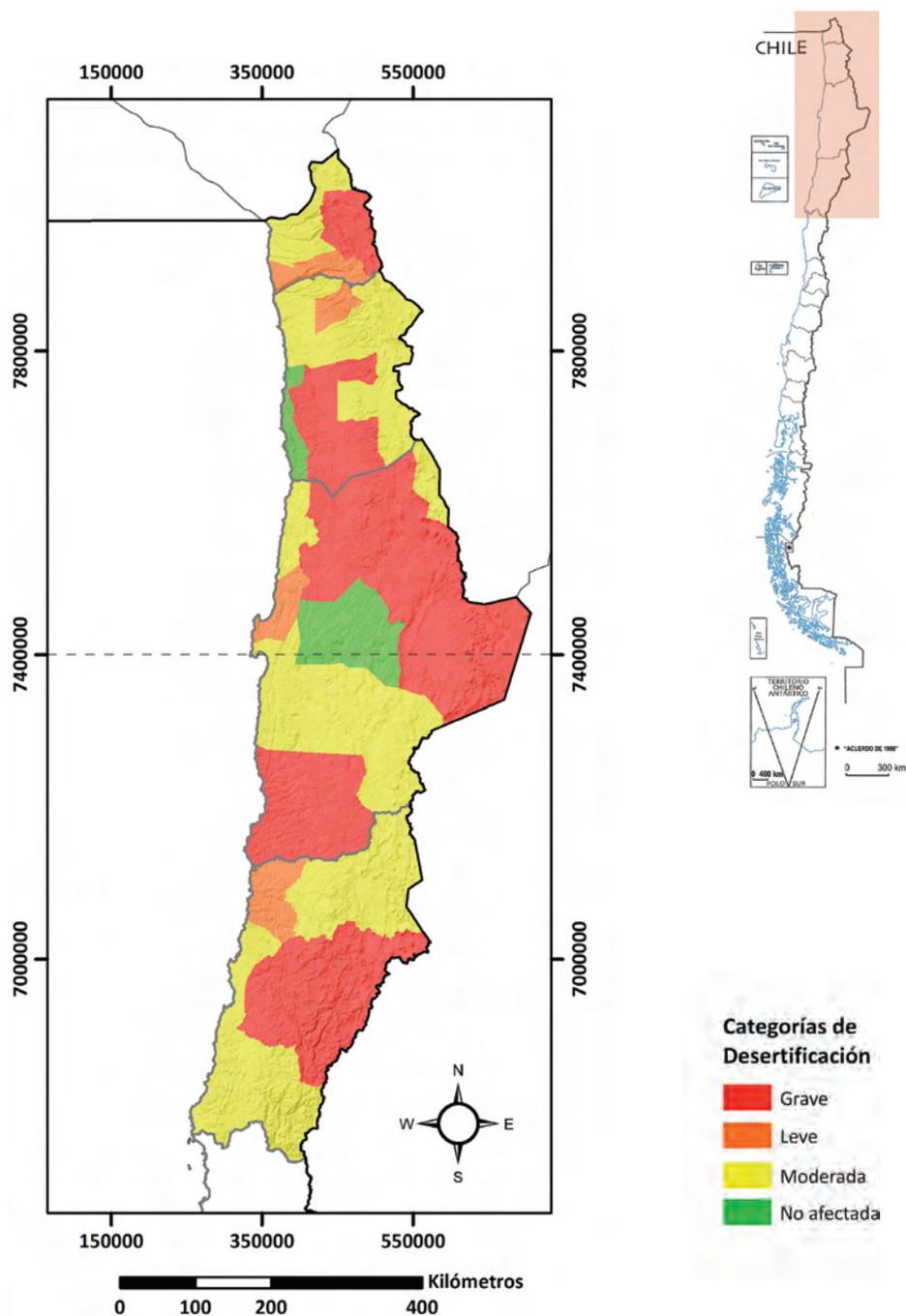
Tabla 5. Categorías de desertificación y superficies según región de la macrozona norte (CONAF, 1999).

Región	Categorías de desertificación	Superficie [ha]	% Superficie regional
Arica y Parinacota	Grave	588.255,00	35,57%
	Leve	364.415,00	22,04%
	Moderada	700.921,00	42,39%
Tarapacá	Grave	1.363.377,00	32,10%
	Leve	238.675,00	5,62%
	Moderada	2.349.166,00	55,31%
	No afectada	296.028,00	6,97%
Antofagasta	Grave	7.170.632,65	56,94%
	Leve	366.667,24	2,91%
	Moderada	3.768.534,37	29,93%
	No afectada	1.286.394,57	10,22%
Atacama	Grave	2.783.588	36,84%
	Leve	572.392	7,58%
	Moderada	4.200.083	55,59%

El aumento sostenido en la superficie que sufre desertificación en Chile da cuenta de que las medidas de protección ambiental deben ser intensificadas. La sociedad enfrenta numerosos desafíos, las tierras áridas de la macrozona norte de Chile se encuentran entre los ecosistemas más frágiles del mundo (Jaksic *et al.*, 1997), situación que se agudiza al observar el actual escenario de cambio climático (Marzal, 2012). La forestación puede ser un instrumento medioambiental eficaz para la restauración de estos lugares, ya que la vegetación posee la capacidad de extenderse naturalmente, aun en tierras desnudas, mejorando los procesos ecológicos, ya que disminuye la escorrentía favoreciendo la reposición de agua en acuíferos, contribuyendo así al balance hídrico de las zonas forestadas (Malagnoux *et al.*, 2007), además de proporcionar otros bienes forestales no maderables como la utilización de la biomasa como combustible constituyendo un medio de subsistencia para la población local (FAO, 2006).

En este Capítulo se describe el potencial de ampliación de la frontera agroforestal del Norte Grande de Chile. Se aborda la disponibilidad de los principales recursos naturales para la valorización del ecosistema. Así como los desafíos y zonificación agroecológica de cultivos con potencial agroenergético.

Figura 28. Categorías de desertificación para la macrozona norte de Chile (CONAF, 1999)



3.1. Disponibilidad de Agua para Riego

Los ecosistemas de la macrozona norte de Chile se caracterizan por su fragilidad producto de las condiciones climáticas, de temperatura y aridez extrema (Di Castri y Hayek, 1976) junto a la larga data de ocupación humana (más de 10.000 años) (Jaksic *et al.*, 1997). Son de tipo desértico y mundialmente se caracterizan por tener una productividad baja o muy variable, dependiente de las precipitaciones y de la disponibilidad de nutrientes, por lo que la disponibilidad de agua superficial y subterránea constituyen un factor limitante para el desarrollo de la agricultura en zonas áridas (Malagnoux *et al.*, 2007).

El sostenido crecimiento económico y desarrollo social de las últimas décadas ha generado un incremento en la presión de uso de los recursos hídricos desde la región Metropolitana hacia el norte (Banco Mundial, 2011), en donde las fuentes de agua están generalmente agotadas y no se pueden otorgar más derechos de aprovechamiento (Salazar, 2003), evidenciándose esta situación particularmente en la ciudades de Taltal y Antofagasta en donde el abastecimiento proviene de la desalinización de agua salobre (SISS, 2010).

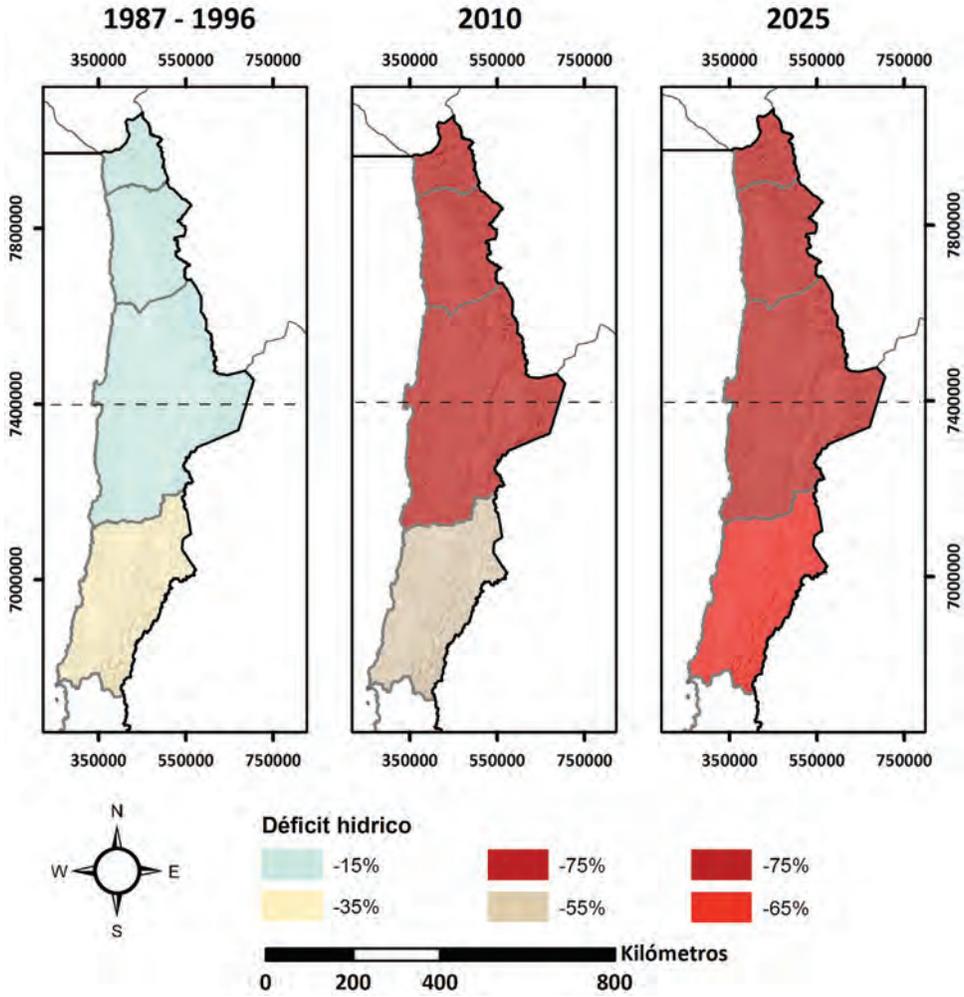
Los sistemas hidrográficos distribuidos desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Coquimbo tienen su disponibilidad de derechos de aprovechamiento copada o han sido categorizados como zonas de prohibición, como es el caso de la cuenca del río San José en el Valle de Azapa y el río Copiapó (Salazar, 2003), situación que dificulta el panorama para el desarrollo agrícola en la macroregión. Por otro lado, las hoyas hidrográficas de la zona norte son de particular interés, ya que poseen menores caudales disminuyendo consigo la capacidad de dilución de sus cauces incrementándose las concentraciones de metales, sales y minerales de origen natural o antropogénico, situación que se acentúa aguas abajo por efecto de la deriva (CADE-IDEPE, 2004a; b; c y d), constituyendo un escenario adverso para la agricultura en lo que respecta a cantidad y calidad del recurso.

Los pronósticos del Banco Mundial (2011) para las regiones que conforman la macrozona norte de Chile (regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama) señalan que estas regiones han presentado un déficit hídrico que data desde 1987 (Tabla 6), incrementándose al año 2010, atribuyéndose este efecto a un aumento de demanda y de capacidad de regulación, esperándose al año 2025 un escenario de escasez hídrica generalizado para la macrozona norte atribuido a los efectos del cambio climático (Figura 29).

Tabla 6. Balance hídrico según macrozonas (millones de m³ año⁻¹; Banco Mundial, 2011).

Macro zonas	1987 – 1996	Año 2010	Proyección al 2025
Desde Arica y Parinacota a Tarapacá	-40	-928	-1.602
Desde Antofagasta a Atacama	-397	-873	-1.299

Figura 29. Déficit hídrico (%) según los balances hídricos estimados para 1996, 2010 y 2025 (Banco Mundial, 2011).



Según la estimación de disponibilidad de agua para riego realizado por la DGA (2011) para el periodo 2010 - 2013, se estima un superávit para la región de Atacama y parte de la región de Coquimbo atribuido a las precipitaciones de Mayo y Junio, no obstante, esta situación no estaría reflejada en las zonas de acumulación de aguas en ambas regiones, siendo incluso inferiores al 20% de la recarga promedio, esperándose volúmenes de deshielos inferiores al 40% del promedio histórico para las regiones de Atacama y Coquimbo, ocasionando una situación deficitaria desde la macrozona norte hacia el sur.

En el presente escenario y considerando las proyecciones a futuro de disponibilidad de agua en el Norte Grande, y en el contexto del cambio climático, tiene relevancia la eficiencia hídrica y utilización de fuentes de agua alternativas como la recuperación de aguas servidas e industriales, y la desalación de agua de mar.

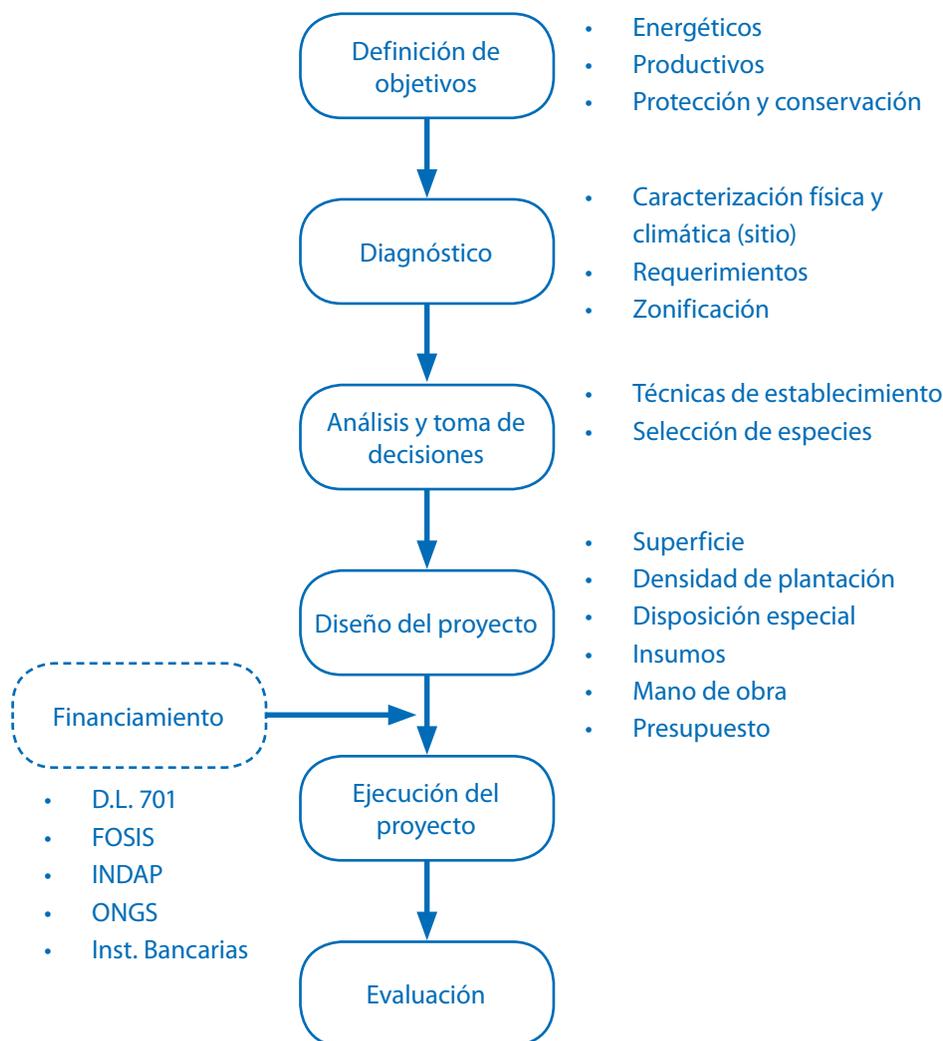
La industria del tratamiento del agua es muy competitiva, se emplean varias técnicas como la ósmosis inversa, la destilación, el electro diálisis y la congelación en el vacío. Hoy solamente son viables comercialmente la ósmosis inversa y la destilación. La desalinización es una de las principales alternativa para zonas con déficit hídrico. Una desalinizadora, que desale agua para diez mil personas, tiene el mismo coste que un tanque. Para cien mil personas, lo que cuesta un avión de combate. Invertir en la desalinización o en el reciclaje de aguas residuales, es más barato que llegar a acuerdos económicos por las fuentes hídricas disponibles.

3.2. Potencialidad Agrícola de Zonas Áridas

En la zona norte de Chile existen importantes extensiones de tierras que no tienen potencial agroforestal y que se encuentran bajo algún nivel de erosión (CONAF; 1999; Gonzalez *et al.*, 2000). Consecuentemente, las regiones que conforman la macrozona norte de Chile son las que tienen el menor aporte al PIB Silvoagropecuario Nacional (ODEPA, 2012), lo que evidencia limitaciones para el desarrollo agrícola asociadas a la competencia por el agua, salinidad de los suelos y a la adversidad climática (Malagnoux *et al.*, 2007).

Las tierras del norte de Chile pueden ser utilizadas por especies tolerantes a condiciones extremas, capaces de desarrollarse en condiciones de aridez, cuyos sistemas agrícolas han evolucionado a través de una progresiva convergencia entre las prácticas de cultivo más adecuadas y programas de selección de plantas mejor adaptadas (Botti *et al.*, 1997; Quaranta, 2007). El escenario singular de este ecosistema demanda que para establecer un cultivo sea necesario realizar previamente una planificación que permita ordenar actividades y recursos en el tiempo, y en el espacio, con el propósito de alcanzar un determinado conjunto de metas fijadas en base a las potencialidades y limitaciones, tanto técnicas como culturales de un área determinada (Figura 30; Benedetti y Perret, 1995).

Figura 30. Planificación de una forestación en zonas áridas (Benedetti y Perret, 1995)



La forestación de zonas áridas con especies alternativas tiene el principio de desarrollar cultivos que sean capaces de entregar altas productividades en condiciones adversas, sin constituir un riesgo para la seguridad alimentaria (Patiño, 2008). Es relevante el estudio de especies como el atriplex, jojoba, e higuera (Capítulo 2), por su capacidad de adaptación a las condiciones edafoclimáticas de la macrozona norte de Chile. Estas especies con potencial energético se han caracterizado por presentar rendimientos aceptables de biomasa para biocombustibles líquidos o sólidos (Tablas 7 y 8).

Tabla 7. Biomasa para combustible líquido (Román *et al.*, 2012).

Especie	% Aceites	Productividad (kg ha ⁻¹)
Chañar	46 - 49	S/I
Higuerilla	35 - 55	450 - 3000
Jojoba	44 - 60	1.000 – 4.000
Jatropha	28 - 50	400 – 12.000
Guindilla	30	S/I

*S/I: Sin información

Tabla 8. Biomasa para combustible sólido (Román *et al.*, 2012).

Especie	Productividad (kg ha ⁻¹)
Atriplex	500 - 1000
Algarrobo	1.000 – 3.000
Tamarugo	590 – 2.770
Tara	1.000 – 100.000

*S/I: Sin información

La producción de biomasa con fines energéticos en los últimos años ha cobrado importancia para la mayoría de los países en América Latina y el Caribe (CEPAL, 2007a; Paneque *et al.*, 2011), esto debido a la sostenida tendencia al alza de los precios del petróleo a nivel mundial, al incremento de la preocupación por el medio ambiente y a un mayor énfasis acerca de la sostenibilidad de los sistemas de producción, lo que ha incentivado a implementar, o iniciar procesos de implementación de políticas o programas que incentiven la producción de biocombustibles (CEPAL, 2007a), además de otros históricamente utilizados como la leña (Gelabert *et al.*, 2011).

En Chile desde el año 2006 se han realizado cambios en políticas públicas que tienen el propósito de aumentar la participación de las energías renovables dentro de la matriz energética, como la Ley N° 20.257 acerca de la generación electricidad a partir de fuentes de ERNC y el Decreto N° 11/2008 promulgado por el Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción del Gobierno de Chile, acerca de especificaciones de calidad para biodiesel y bioetanol autorizando las mezclas de un 2% y un 5% de etanol con petróleo y gasolina respectivamente, ratificando la potencialidad agroeconómica de los cultivos señalados.

3.3. Área Potencial de Cultivo de la Macrozona Norte de Chile

La selección y estudio de especies arbustivas con potencial bioenergético, y que sean parte de la vegetación nativa de Chile, permite considerar especies como el atriplex chañar, tamarugo y algarrobo, cuya distribución se asocia principalmente a zonas áridas del país (Iglesias y Taha, 2010).

El Norte Grande posee una superficie de 26,08 Mha, según el Catastro de Bosque Nativo (CONAF, 1999), y solo el 0,3% del territorio posee un uso agrícola, siendo predominantes las áreas desprovistas de vegetación y subutilizadas, con un 60,49% promedio de la superficie de la macrozona (Tabla 9; Labra, 2009). Estos terrenos presentan características limitantes para el desarrollo de cultivos tradicionales, pero potencialmente podrían ser útiles para el desarrollo de cultivos energéticos adaptables a sus condiciones edafoclimáticas (Román *et al.*, 2012).

El territorio ocupado por áreas silvestres protegidas pertenecientes al SNASPE, excluyendo superficies industriales, cascos urbanos, cuerpos de agua superficiales y la superficie desprovista de vegetación, corresponde a 15,45 Mha, constituyendo un área potencial de cultivo para especies adaptables equivalente al 59,2% para la macrozona norte de Chile (Figura 31).

El área potencial de cultivo es amplia, sin embargo existen zonas que podrían estar limitadas por la geografía, disponibilidad de suelos, accesibilidad, pertenencias mineras asociadas al subsuelo, entre otras. Por tanto, del área potencial de cultivo, y terrenos sin vegetación (Figuras 31 y 32), destacan los terrenos de propiedad fiscal que ascienden a un 46,98% de la superficie, ya que pueden ser utilizados para la implementación de proyectos de inversión de cultivos energéticos, y contabilizan una superficie productiva potencial de 7,4 Mha, que otorga un valor económico a suelos sin un uso productivo.

3.4. Potencial de Mitigación y Zonificación de Cultivos Energéticos

Las limitaciones hídricas y edafoclimáticas de la macrozona norte de Chile dificultan el desarrollo de la agricultura, situación que se podría mitigar significativamente con la forestación de cultivos adaptados a condiciones extremas, los que pueden producir una cantidad aceptable de biomasa que puede ser utilizada con diversos fines (Iglesias y Taha, 2010), respetando y adaptando las prácticas agrícolas del hombre, a las condiciones de un sistema ecológico muy sensible.

La forestación permite la restauración paulatina de zonas erosionadas, restaurando procesos ecológicos de los ecosistemas a lo largo del tiempo, ya que la vegetación contribuye a mejorar los balances hídricos en zonas áridas favoreciendo la cosecha de agua de los suelos y disminuyendo la escorrentía superficial. La existencia de instrumentos de fomento para la restauración de suelos degradados como el DL N° 701 propicia el desarrollo de obras de forestación y conservación de suelos facilitando el desarrollo de proyectos orientados

Tabla 9. Usos de suelo de la macrozona norte (CONAF, 1999)

Uso	Área [Mha (%)]			
	Arica y Parinacota	Tarapacá	Antofagasta	Atacama
Otros Terrenos Sin Vegetación	659,08 (39,62)	2808,47 (66,05)	9408,12 (74,66)	2901,29 (38,35)
Matorral	530,69 (31,90)	706,52 (16,62)	710,23 (5,64)	3065,88 (40,53)
Estepa	296,70 (17,84)	308,67 (7,26)	1047,25 (8,31)	12,38 (0,16)
Áreas Sobre Límite Vegetación	83,66 (5,03)	132,56 (3,12)	584,87 (4,64)	1378,20 (18,22)
Salares	10,96 (0,66)	169,97 (4,00)	564,67 (4,48)	88,83 (1,17)
Playas y Dunas	5,47 (0,33)	27,80 (0,65)	116,33 (0,92)	1,92 (0,03)
Vegas	16,93 (1,02)	4,78 (0,11)	47,20 (0,37)	7,11 (0,09)
Terrenos de Uso Agrícola	17,22 (1,04)	11,88 (0,28)	3,93 (0,03)	45,71 (0,60)
Otros usos	3,95 (0,24)	11,29 (0,27)	69,49 (0,55)	40,89 (0,54)
Bofedales	10,16 (0,61)	9,33 (0,22)	1,67 (0,01)	0,00 (0,00)
Plantación	0,00 (0,00)	26,77 (0,63)	3,37 (0,03)	0,00 (0,00)
Afloramientos Rocosos	2,77 (0,17)	10,99 (0,26)	20,70 (0,16)	3,21 (0,04)
Minería Industrial	6,15 (0,37)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
Lago-Laguna-Embalse-Tranque	3,68 (0,22)	0,00 (0,00)	10,40 (0,08)	7,60 (0,10)
Nieves	4,49 (0,27)	0,67 (0,02)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
Sin Cobertura Aerofotográfica	0,00 (0,00)	9,29 (0,22)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
Renoval Abierto	0,00 (0,00)	7,24 (0,17)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
Ciudades-Pueblos-Zonas. Indus.	1,49 (0,09)	1,15 (0,03)	3,26 (0,03)	1,39 (0,02)
Área región	1.663,36	4.251,98	12.602,00	7.565,20

Figura 31. Proporción regional según uso de suelo (% superficie regional; CONAF, 1999).

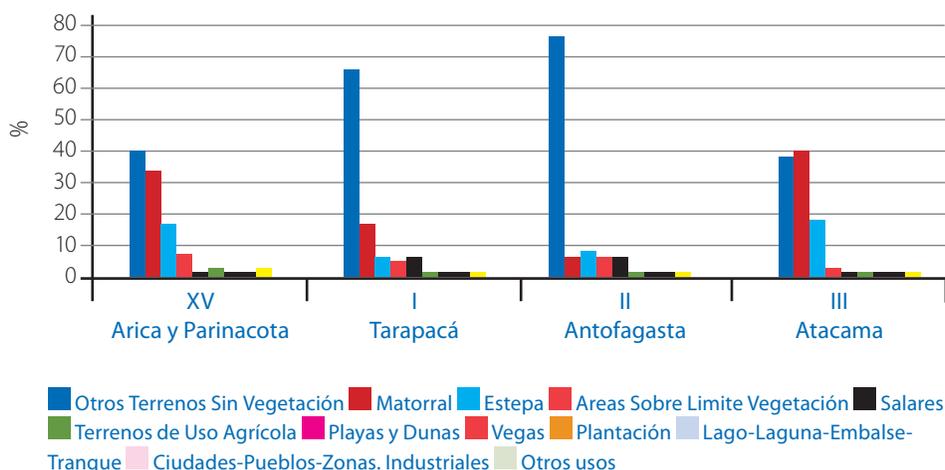


Figura 32. Área potencial de cultivo de la macrozona norte de Chile.

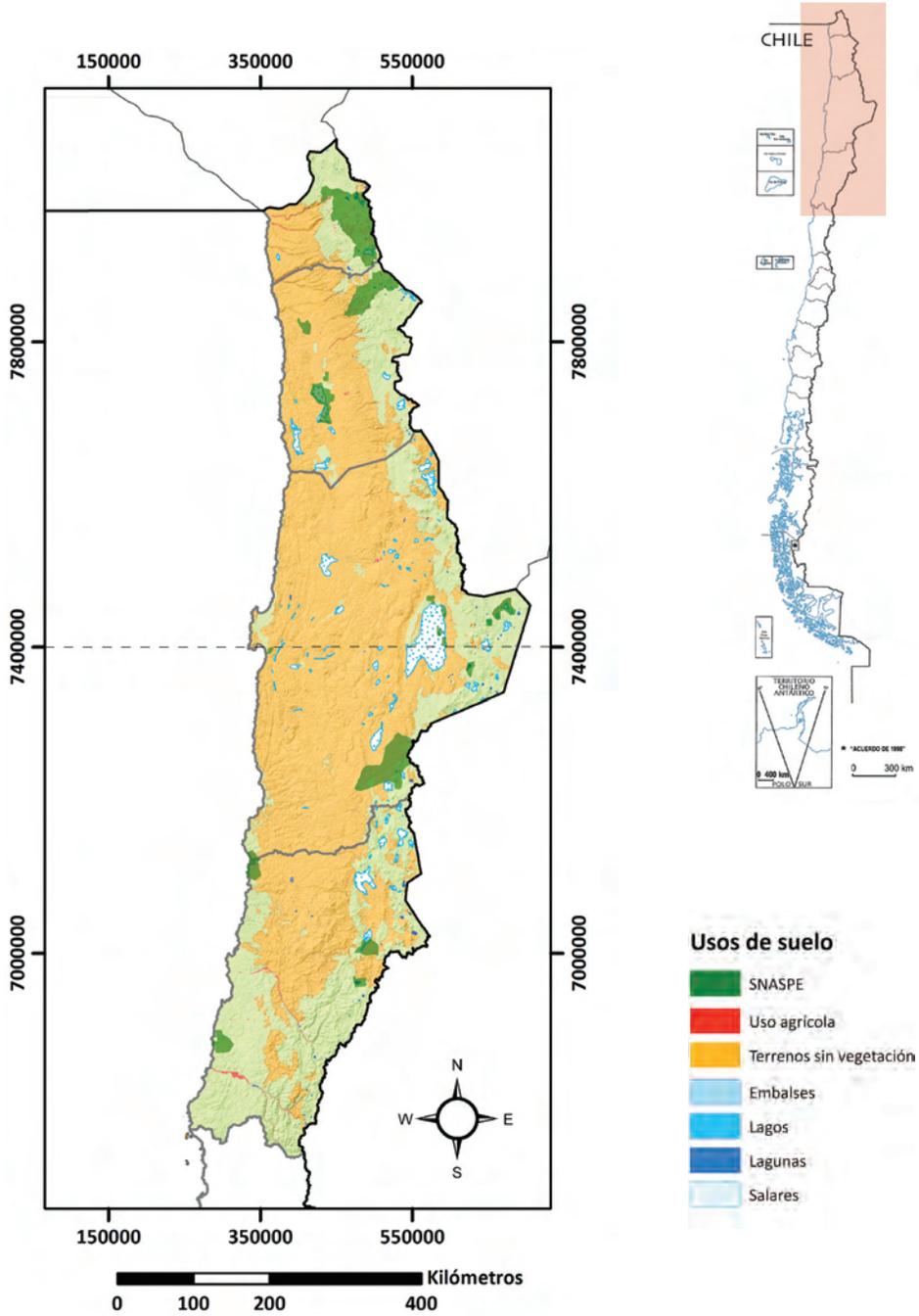
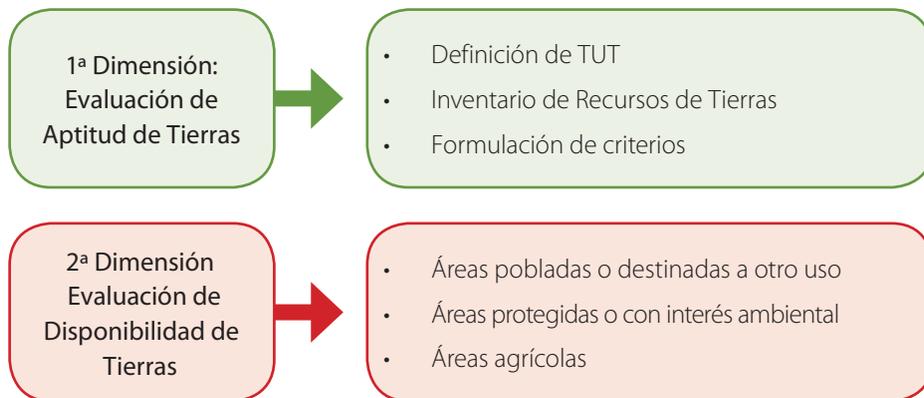


Figura 33. Evaluación de Aptitud de Tierras (EAT; Helfgott *et al.*, 2010)



*TUT: Tipo de Uso de tierras

a contener la erosión. La forestación con especies de interés energético ayuda a potenciar estrategias de mitigación de la pobreza ya que proporcionan a la población rural bienes, principalmente leña y productos no madereros, así como servicios ambientales, contribuyendo a la diversificación del ingreso de los hogares (Malagnoux *et al.*, 2007).

En la macrozona norte de Chile existen zonas desprovistas de vegetación que poseen una aptitud bioclimática aceptable para el desarrollo de cultivos energéticos. La generación de energía a partir de biomasa, residuos u otras materias primas de desechos de cultivos, contribuye a la seguridad y diversificación de la matriz energética nacional, consideradas dentro de las ERNC, y a la reducción de gases de efecto invernadero (Iglesias y Taha, 2010), su utilización genera emisiones que son parte del ciclo natural del carbono en la tierra (Recalde y Durán, 2009), sustituyendo una fracción del uso de los combustibles fósiles en los procesos productivos (CEPAL 2007a; 2007b).

La planificación de proyectos de inversión asociados a la forestación evidencian la necesidad de evaluar la aptitud de tierras (Benedetti y Perret, 1995), con la finalidad de proveer información acerca de la aptitud de los cultivos que sustente la toma de decisiones a los expertos técnicos y a los responsables políticos para probar diferentes alternativas de manejo reduciendo riesgos e incrementando los beneficios (Helfgott *et al.*, 2010).

La metodología de evaluación de aptitud de tierras (EAT) propuesta por la FAO contempla dos dimensiones, la primera evalúa la aptitud de las tierras definida como la capacidad de un lugar específico para producir un cultivo determinado en base a las condiciones agroclimáticas y suelos; y la segunda, determina cuales son áreas potenciales de cultivo, que no poseen otro tipo de uso (Figura 33).

La utilización de sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta de zonificación es de gran relevancia a la hora de determinar zonas aptas para el establecimiento de cultivos en zonas áridas (Labra, 2009), sin embargo, la precisión de los resultados obtenidos dependerá estrictamente de las características y calidad de la información cartográfica con la que se disponga. En base a los requerimientos hídricos y térmicos de los cultivos planteados (Capítulo 2) se realizó una zonificación con la finalidad de obtener zonas potenciales de adaptación de acuerdo a su aptitud bioclimática. Estos parámetros se agruparon de acuerdo al interés energético de cada cultivo (Tablas 10 y 11), obteniéndose como resultado un mapa que describe aptitud de tierras para el desarrollo de especies cuya biomasa puede ser utilizada para la obtención de biocombustibles líquidos (Figura 34) y otro para especies de interés dendroenergético para biocombustibles sólidos (Figura 35).

Para estimar la demanda hídrica se consideró como referencia la tasa de evapotranspiración máxima (ETmax) en relación a las etapas de desarrollo de cada cultivo¹. El valor máximo de demanda hídrica se consideró homólogo a la evapotranspiración máxima obtenida para el mes más cálido (ETmax enero) del cultivo más exigente y, de la misma forma, el valor mínimo correspondió a la tasa de evapotranspiración máxima que presentó el cultivo en la condición de menor requerimiento hídrico en el mes más frío (ETmax julio). Para el proceso de zonificación se consideraron las tasas de evapotranspiración de referencia máximas de enero y mínimas de julio de la macrozona norte descritas por Uribe *et al* (2012), bajo el supuesto de minimizar las necesidades de riego.

Se establecieron rangos de amplitud térmica según el potencial energético de cada cultivo. Para las temperaturas máximas se consideraron los valores de mayor tolerancia aceptables por el cultivo en la condición del mes más cálido (Tmax enero) y las temperaturas mínimas correspondieron a la menor tolerancia por el cultivo a bajas temperaturas en relación al mes más frío (Tmin julio). Para la zonificación se utilizó las temperaturas mínimas de julio y máximas de enero descritas por Uribe *et al* (2012).

La macrozona norte se encuentra caracterizada por una matriz edáfica cuyas características físicas y químicas son similares (ordenes entisols y aridisols), por lo que no resulta necesario utilizar este parámetro para discriminar la aptitud de tierras dentro de la macroregión (Luzio y Alcayaga, 1992).

¹ La evapotranspiración máxima representa la tasa evapotranspirativa de la planta en relación al desarrollo del cultivo y el valor de la evapotranspiración de referencia del lugar en donde se encuentra.

Figura 34. Zonificación bioclimática de cultivos para biocombustibles líquidos

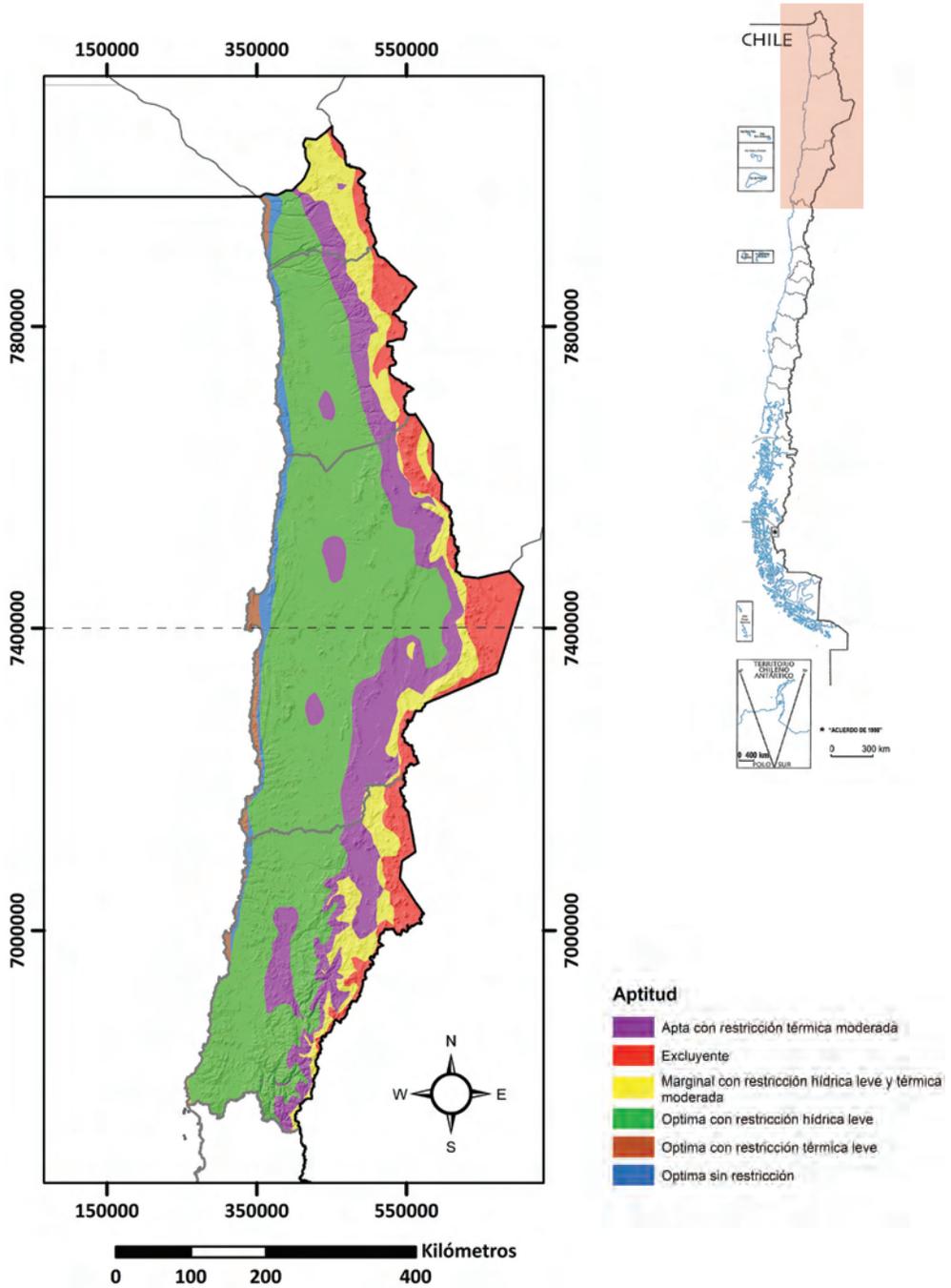


Figura 35. Zonificación bioclimática de cultivos para biocombustibles sólidos

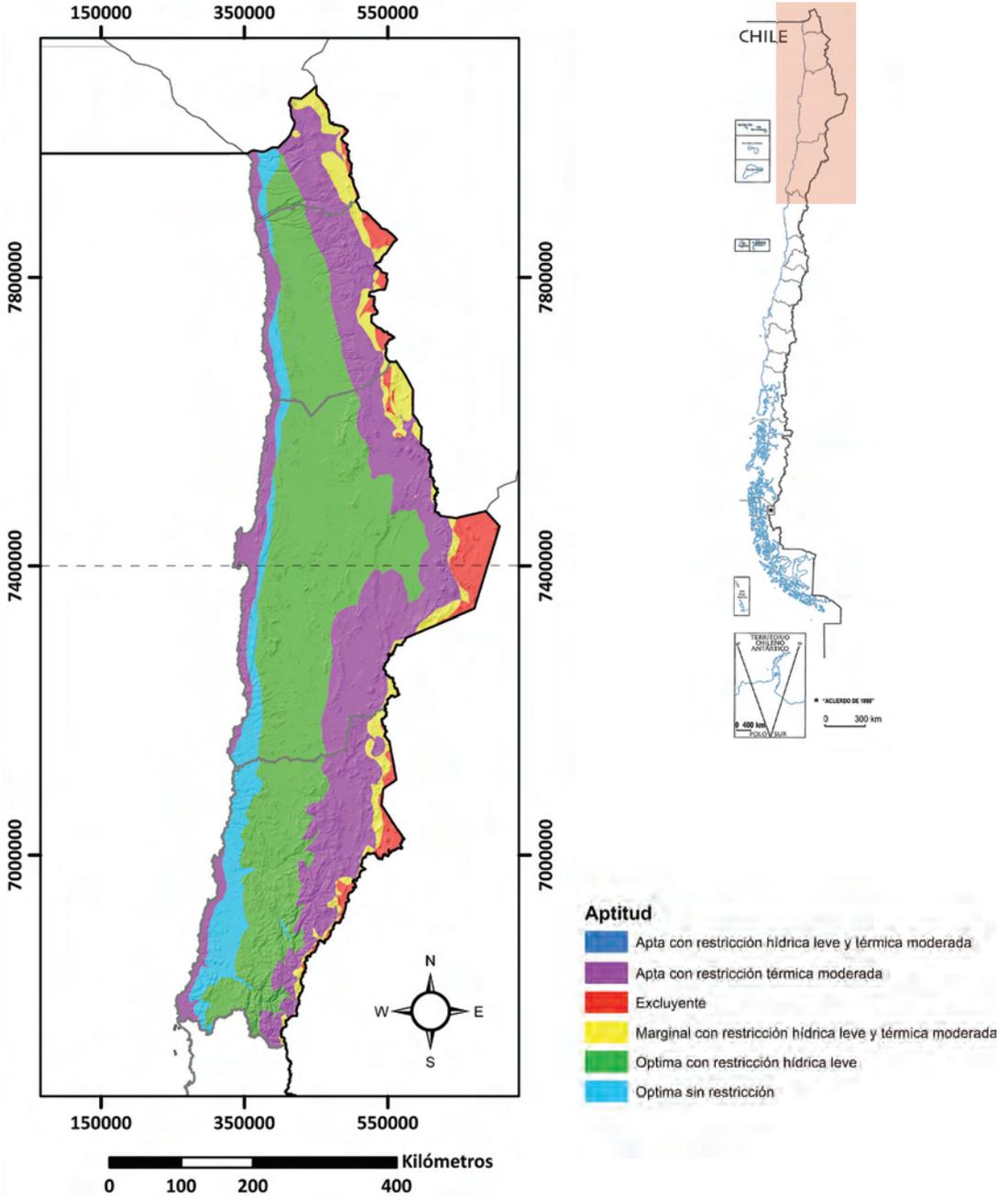


Figura 36. Proporción de la superficie de la macrozona norte según aptitud de tierra para biocombustibles líquidos y sólidos

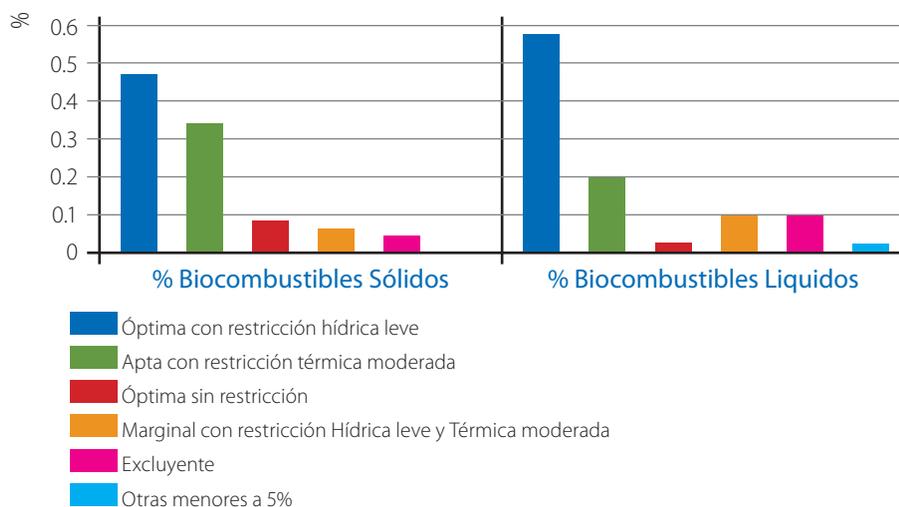


Tabla 10. Parámetros de zonificación de biocombustibles líquidos

Especie	Demanda hídrica [mm]		Rango termico [°C]	
	ET max (Enero)	ET max (Julio)	Tmax (Enero)	Tmin (Julio)
Higuerilla (<i>Ricinus communis</i>)	78,96	30,26	23,00	10,00
Jatropha (<i>Jatropha curcas</i>)	81,51	60,16	36,00	15,00
Jojoba (<i>Simmondsia chinensis</i>)	120,66	63,46	35,00	10,00
Chañar (<i>Geoffroea decorticans</i>)	68,59	42,26	27,10	9,10
Guindilla (<i>Guindilla trinervis</i>)	61,82	14,77	25,00	14,00

Tabla 11. Parámetros de zonificación de biocombustibles sólidos

Especie	Demanda hídrica [mm]		Rango termico [°C]	
	ET max (Enero)	ET max (Julio)	Tmax (Enero)	Tmin (Julio)
Atriplex (<i>Atriplex spp.</i>)	48,27	29,74	24,00	6,00
Pimiento (<i>Schinus molle</i>)	70,06	39,02	34,00	18,00
Algarrobo (<i>Prosopis chilensis</i>)	60,97	37,57	48,00	20,00
Tamarugo (<i>Prosopis tamarugo</i>)	44,46	27,39	35,00	8,00
Tara (<i>Caesalpinia spinosa</i>)	91,84	48,31	27,50	14,70

La zonificación agroclimática se realizó sobre una superficie de 30,16 Mha y muestra que el Norte Grande tiene actitud para el desarrollo de los cultivos energéticos. El análisis para las especies potenciales para la producción de biocombustibles líquido, mostró que el 57,1% de la superficie presenta aptitud óptima con restricción hídrica leve, 19,4% es apta con restricción térmica moderada, el 2,4% es óptima sin restricción, y un 10,0% excluyente (Figura 34 y 36). El análisis para las especies potenciales para la producción de biocombustibles sólidos, presentó que el 46,6% de la superficie presenta aptitud óptima con restricción hídrica leve, un 34,8% es apta con restricción térmica moderada, el 8,6% es óptima sin restricción, y un 4,4% excluyente (Figura 35 y 36).

La forestación de tierras degradadas con cultivos energéticos es de gran relevancia al analizar su potencial en el desarrollo de proyectos de mecanismos de desarrollo limpio (MDL), la vegetación actúa como sumidero de carbono (Pérez *et al.*, 2010), lo que permite la comercialización de certificados de emisiones reducidas asociadas al secuestro de carbono, considerando que un certificado de emisiones reducidas -bono de carbono- es equivalente a una tonelada de CO₂ secuestrada y que según los factores de emisión validados por el Ministerio de Energía en Chile, el consumo de 1000 litros de gasolina son equivalentes a 2,241 toneladas de CO₂ equivalente por concepto de emisiones directas (INAP-UCHILE, 2011), que en parte podrían ser mitigadas por la utilización de biocombustibles que generan emisiones de carácter biogénico.

Actualmente Chile cuenta con una agricultura altamente tecnificada, situándose para algunos rubros entre los países con mejores rendimientos de producción en el mundo (ODEPA, 2007), además de contar con una amplia gama de instrumentos del Estado para el fomento agrícola, lo que favorece el desarrollo de cultivos energéticos. Las características climáticas de la macrozona norte permiten el desarrollo de cultivos oleaginosos, cuyas semillas tienen un alto contenido de aceites que pueden ser utilizados para la elaboración de biodiesel, asimismo, permiten el desarrollo de algunas especies nativas de hábito arbustivo cuya biomasa puede ser empleada como leña (Iglesias y Taha, 2010), constituyendo una alternativa para la desertificación técnica, ambiental y económicamente favorable.

Bibliografía

- » Achten, W.M.J., L. Verchot, Y.J. Franken, E. Mathijs, V.P. Singh, R. Aerts and B. Muys. 2008. *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass and Bioenergy* 32(12): 1063-1084.
- » Aguilera, J.M., A. Fretes and R. San Martín. 1986. Characteristics of Guindilla oil (*Valenzuela trinervis* Bert.). *Journal of the American Oil Chemists' Society* 63(12): 1568.
- » Aguilera, L.E., J.R. Gutiérrez y R.J. Moreno. 1998. Vesículo arbuscular micorrizae associated with saltbushes *Atriplex* spp. (Chenopodiaceae) in the Chilean arid zone. *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 291-302.
- » Aljaro, M.E. and G. Montenegro. 1981. Growth of dominant Chilean shrubs in the Andean Cordillera. *Mountain Research and Development* 1(3-4): 287-291.
- » Al-Turki, T.A., S. Omer and A. Ghafoor. 2000. A synopsis of the genus *Atriplex* L. (Chenopodiaceae) in Saudi Arabia. *Feddes Repertorium* 111(5-6): 261-293.
- » Anjani, K. 2012. Castor genetic resources: a primary gene pool for exploitation. *Industrial Crops and Products* 35(1): 1-14.
- » Anónimo. 2003. *Schinus molle* L. Nota Técnica N° 147. Disponible en: <<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0009S/a0009s147.pdf>>.
- » Anónimo. 2012a. Ficha de antecedentes de especie: *Prosopis chilensis*. ID: 581. Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile. Disponible en: <www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/fichas9proceso/Prosopis_chilensis.pdf>.
- » Anónimo. 2012b. Ficha de antecedentes de especie: *Prosopis tamarugo*. ID: 585. Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile. Disponible en: <www.mma.gob.cl/clasificacionespecies/fichas9proceso/Prosopis_tamarugo.pdf>.
- » Ashraf, M. 2004. Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants. *Flora* 199(5): 361-376.
- » Ashraf, M., H.R. Athar, P.J.C. Harris and T.R. Kwon. 2008. Some prospective strategies for improving crops salt tolerance. 45-110. In: D.L. Sparks (ed.). *Advances in Agronomy*. Volume 97. Elsevier. 400 p.
- » Athar, H.R. and M. Ashraf. 2009. Strategies for crop improvement against salinity and drought stress: an overview. 1-16. In: M. Ashraf, M. Ozturk and H.R. Athar (eds.). *Salinity and water stress, improving crop efficiency*. Springer. 246 p.
- » Ayers, R. y D. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura la Alimentación. Roma, Italia. 173 p.
- » Bar, Yoel. s/a. *Salinidad en Cultivos Agrícolas*. 21 p.
- » Banco Mundial. 2010. Chile: Diagnostico de gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiental y Desarrollo Sostenible. Región para Latino América y el Caribe. 92 p.
- » Bastías, E., M. Díaz and P. Pacheco. 2011. Caracterización del maíz "Lluteño" (*Zea mays* L. tipo amylacea) proveniente del norte de Chile, tolerante a NaCl y exceso de boro, como una alternativa para la producción de bioenergía. *Idesia* 29(3): 7-16.
- » Bauder, T.A., R.M. Waskom and J.G. Davis. 2004. Irrigation water quality criteria. *Irrigation Crop Series* N° 0.506. Colorado State University Cooperative Extension. Disponible en: <www.ext.colostate.edu/PUBS/crops/00506.pdf>.
- » Becerra, P. y L. Faúndez. 2001. Vegetación del desierto interior de Quillagua, Región de Antofagasta (II), Chile. *Chloris Chilensis* 4(2). Disponible en: <www.chlorischile.cl>.
- » Benedetti, S. y S. Perret. 1992. Manual de forestación, zonas áridas y semiáridas. Instituto Forestal, División Silvicultura. Corporación de fomento de la producción (CORFO). Manual N°21. 135 p.
- » Benzioni, A., E. Shiloh and M. Ventura. 1999. Yield parameters in young jojoba plants and their relation to actual yield in later years. *Industrial Crops and Products* 10(2): 85-95.
- » Bhen, K. 1942-1943. Flora de Chile. Las Familias Euforbiáceas, Aextoxicáceas y Calitriquneas. *Revista Chilena de Historia Natural*. Santiago, Chile. 145-196.

- » Biswas, S., N. Kaushik and G. Srikanth. 2006. Biodiesel: technology and business opportunities - An insight. 303-330. In: B. Singh, R. Swaminathan and V. Ponraj (eds). Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence - focus on *Jatropha*. Rashtrapati Nilayam, Hyderabad, India, June 9-10, 2006. New Delhi, India.
- » Botti, C., L. Prat, L. Cánaves, E. Doussoulin, C. Barriga, X. López y G. Covarrubias. 1997. Manejo y rentabilidad de plantaciones clonales de Jojoba. En: Valdebenito, G. y S. Benedetti. 1997. Forestación y silvicultura en zonas áridas y semiáridas de Chile. Instituto forestal, filial CORFO. 19-33 p.
- » Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218(4571): 443-448.
- » Bravo, S., C. Kunst, R. Grau and E. Aróz. 2010. Fire-rainfall relationships in Argentine Chaco savannas. *Journal of Arid Environments* 74(10): 1319-1323.
- » Brigham, R.D. 1993. Castor: return of an old crop. 380 - 383. In: Janick, J. and J.E. Simon (eds.). *New Crops*. John Wiley and Sons Ltda., New York, United States. 710 p.
- » Buckman, H. y N. Brady. 1977. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Montaner y Simon. Barcelona, España. 590 p.
- » Burkart, A. 1976. A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). *Journal of Arnold Arboretum* 57: 450-525.
- » CADE-IDEPE. 2004a. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Loa. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- » CADE-IDEPE. 2004b. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Elqui. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- » CADE-IDEPE. 2004c. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Lauca. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- » CADE-IDEPE. 2004d. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Lluta. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- » Cámara de Diputados, República de Chile. 2012. Boletín 8603-01. Proyecto de Ley de Fomento Forestal que Modifica y Extiende el DL N° 701.
- » Canals, R.S., J. Peralta y E. Zubiri. 2007. Familia Chenopodiaceae, *Atriplex halimus* L.: Orgaza, Colza. Flora pratense y forrajera cultivada en la península Ibérica. Departamento de Producción Agraria, Universidad Pública de Navarra, España. Disponible en: <www.unavarra.es/servicio/herbario/pratenses/htm/inicio.htm>.
- » Cappillino, P., R. Kleiman and C. Botti. 2003. Composition of Chilean jojoba seeds. *Industrial Crops and Products* 17(3): 177-182.
- » Castillo, J.C. y G.A. Moreno. 2002. Semillas forestales del bosque nativo chileno. Editorial Universitaria. 242 p.
- » Chiffelle, I., A. Huerta, M. Celis and J.E. Araya. 2013. Proximal analysis and insecticidal effects of extracts from pepper tree (*Schinus molle*) leaves on elm leaf beetle (*Xanthogaleruca luteola*) larvae. *Industrial Crops and Products* 43: 523-528.
- » Centro de Despacho Económico de Carga-Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC). 2010. Catastro de medios de generación. Santiago, Chile. Disponible en: <www.cdec-sic.cl/est_opera_publica.php#C24>.
- » Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). 2007. Uso eficiente del agua en la Industria Minera y Buenas Prácticas. Acuerdo Marco de Producción Limpia Sector Minería.
- » Comisión Económica para Latinoamérica y el Caribe (CEPAL). 2007a. Biocombustibles y su impacto potencial en la estructura agraria, precios y empleo en América Latina, Unidad de Desarrollo Agrícola, División de Desarrollo Productivo y Empresarial.

- » Comisión Económica para Latinoamérica y el Caribe (CEPAL). 2007b. Producción de biomasa para combustibles líquidos: El potencial de América Latina y el Caribe, Unidad de Desarrollo Agrícola, En imprenta.
- » Comisión Nacional de Energía (CNE). 2009. Prospección eólica en zonas de las regiones de Atacama, de Coquimbo y el Maule. 21 p.
- » Comisión Nacional de Energía (CNE). 2011a. Balance nacional de energía año 2010. Santiago, Chile. Disponible en <www.minenergia.gob.cl>. Visitado el 10 de Octubre de 2011
- » Comisión Nacional de Energía (CNE). 2011b. Capacidad Instalada por Sistema Eléctrico Nacional. Disponible en: <www.cne.cl>.
- » Corporación Nacional Forestal (CONAF). 1999. Mapa preliminar de la desertificación en Chile por comunas. Ministerio de Agricultura.
- » Corporación Nacional Forestal (CONAF). 1999. Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile.
- » Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2007. Agenda Internacional OPANCCD-Chile. Programa de Trabajo PANCCD-Chile 2007. Disponible en: <[http://otros.conaf.cl/shop_image/CFFCN/Informes%202008%20\(2\)/Agenda%20Internacional%202007%20OPANCCD-Chile.pdf](http://otros.conaf.cl/shop_image/CFFCN/Informes%202008%20(2)/Agenda%20Internacional%202007%20OPANCCD-Chile.pdf)> Leído el 22 de abril de 2013.
- » Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2011. Balance de Gestión Integral. Ministerio de Agricultura. 99 p.
- » Davis Jr., F.T., V. Olalde-Portugal, L. Aguilera-Gómez, M.J. Alvarado, R.C. Ferrera-Cerrato and T.W. Boutton. 2002. Alleviation of drought stress of Chile ancho pepper (*Capsicum annum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico. *Scientia Horticulturae* 92(3-4): 347-359.
- » De Lorenzo-Cáceres, J.M. 2011. *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze. Disponible en: <www.arbolesornamentales.es>.
- » Dehgan, B. and G.L. Webster. 1979. Morphology and infrageneric relationships of the genus *Jatropha* (Euphorbiaceae). Volume 74. University of California Press, United States. 73 p.
- » Demirbas, A.H. y Demirbas, I. 2007. Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management* 48(8): 2386-2398.
- » Di Castri, F. y E. Hayek. 1976. Bioclimatología de Chile. Vicerrectoría Académica, Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 163 p.
- » Dirección General de Aguas (DGA). 2010. Pronostico de disponibilidad de agua temporada de riego 2010-2011. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- » Donoso, C. 2008. Ecología forestal : el bosque y su medio ambiente. Santiago, Ed. Universitaria. 369 p.
- » Dostert, N., J. Roque, G. Brokamp, A. Cano, M.I. la Torre y M. Weigend. 2009. Factsheet: datos botánicos de tara. Perú Biodiverso, Lima, Perú. 10 p.
- » Duke, J. 1983. [on line]. *Ricinus communis* L. Handbooks of energy crops. Unpublished. Center for New Crops & Plants Products, University of Purdue, Indiana, United State. Disponible en: <www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/dukeindex.html>.
- » DWAF (Department of Water Affairs & Forestry). 1996. South African Water Quality Guidelines, volume 4: Agricultural use: Irrigation, Volume 5: Agricultural Water Use: Livestock Watering. Second Edition.
- » Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science*. 69: 123-133 p.
- » Escobar, F. y P. Aceituno. 1998. Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile central durante el Invierno. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines* 27 (3): 753 – 459 p.
- » Essington, M. 2004. Soil and water chemistry: An integrative approach. CRC Press. 534 p.
- » Eynard, C. and L. Galetto. 2002. Pollination ecology of *Geoffroea decorticans* (Fabaceae) in central Argentina dry forest. *Journal of Arid Environments* 51(1): 79-88.
- » Falasca, S. y A. Ulberich. 2006. Potencial de Argentina para la Producción de Tártago (*Ricinus communis* var *communis*). 9 p.

- » Fundación para la Innovación Agraria (FIA). 2006. Desarrollo de un sistema económico para la reducción de la concentración de boro en aguas de varias cuencas problemáticas de la zona norte hasta niveles que viabilicen su uso en el riego para permitir una agricultura diversificada. Informe final proyecto precursor: Ministerio de Agricultura - FIA & Universidad de Tarapacá.
- » Figueroa, L., Tapia, L., Bastías, E., Escobar, H. y Torres, A. 1998. Niveles de boro en el agua de riego utilizada en olivicultura del norte de Chile. Pp. 167-188. En: Memorias del Taller Internacional Gestión de la Calidad del Agua y Control de la Contaminación en América Latina y el Caribe. Food and Agricultural Organization (FAO). Arica, Chile - Tacna, Perú. 30 septiembre- 4 octubre.
- » Flowers, T.J. 2004. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany* 55(396): 307-319.
- » Flowers, T.J., P.F. Troke and A.R. Yeo. 1977. The mechanism of salt tolerance in halophytes. *Annual Review of Plant Physiology* 28: 89-121.
- » Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1993. Desarrollo sostenible de tierras áridas y lucha contra la desertificación. Departamento FO. V0265.
- » Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2005. Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry Paper No. 147 Roma.
- » Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2008. Biocombustibles y seguridad alimentaria. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Disponible en <www.fao.org/co/articbiocomb.pdf>.
- » Galera, F.M. 2000. Las especies del género *Prosopis* (Algarrobos) de América latina con especial énfasis en aquellas de interés económico. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) y SECYT, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Córdoba, Argentina. 269 p.
- » García, N. y C. Ormazábal. 2008. Árboles nativos de Chile. Enersis y Fundación Huinay. Santiago, Chile. 202 p.
- » Gelabert, L. P., A. Asouti y E. A. Martí. 2011. The ethnoarchaeology of firewood management in the Fang villages of Equatorial Guinea, central Africa: implications for the interpretation of wood fuel remains from archaeological sites. *Journal of Anthropological Archaeology* 30 (3): 375-384 p.
- » Gobierno de Chile. 2010. Tercer Informe Objetivos del Milenio. 164 p.
- » Gobierno de Chile. 2012a. Estrategia Nacional de Energía. 38 p.
- » Gobierno de Chile. 2012b. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. 40 p.
- » González, S. 1994. Geoquímica de metales pesados en Chile. pp: 137-149. En: Simposio sobre contaminación ambiental. Impacto ambiental de metales pesados en Chile. INIA. 261 p.
- » Gonzales, J. A., R. Velasco y C. Pérez. 2000. Dimensión socioeconómica de la degradación del suelo en Chile. *Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 94: 94-104.
- » González, I., Mueña, V., Cisternas, M., Neaman, A. 2008. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncavi, Chile Central. *Revista Chilena de Historia Natural* 81, 279-291.
- » Goytia-Jiménez, M.A., C.H. Gallegos-Goytia y C.A. Núñez-Colín. 2011. Relación entre variables climáticas con la morfología y contenido de aceite de semillas de higuera (*Ricinus communis* L.) de Chiapas. *Revista Chapingo, Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente* XVII(1): 41-48.
- » Habit, M.A., D. Contreras y R.H. González. 1980. *Prosopis tamarugo*: arbusto forrajero para zonas áridas. Programa regional de producción de alimentos básicos oficina regional para América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Santiago, Chile. 143 p.
- » Hall, A.E. 2001. *Crop responses to environment*. CRC Press, United States of America. 227 p.
- » Helfgott, S., S. Vargas, A. Gutierrez, y M. Salvatore. 2010. Aptitud de tierras y oportunidades para el desarrollo rural en Perú. 25 – 26 p. En: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO). 2010. Bioenergía y seguridad alimentaria BEFS. Compendio Técnico Volumen I. Documento de trabajo del medio ambiente y recursos naturales (29): 149 p.

- » Heller, J. 1996. Physic nut. *Jatropha curcas* L.: promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute, Rome. Rome, Italy. 66 p.
- » Hillel D. 1998. Movement of solutes and soil salinity en: "Environmental Soil Physics". Academic Press, New York. 243-268.
- » Hoffman, A. 1998. Flora silvestre de Chile, zona central. 4ta edición. Ediciones Fundación Claudio Gay. 255 p.
- » Howard, L.F. and R.A. Minnich. 1989. The introduction and naturalization of *Schinus molle* (pepper tree) in Riverside, California. *Landscape and Urban Planning* 18(2): 77-95.
- » Ibañez, C., S. Palomeque & F. Fontúrbel. 2004. Elementos principales del suelo, geodinámica y dinámica de los principales componentes del suelo. En: Fontúrbel, F., C. Ibañez & G. Abruzzese (eds). *El Recurso Suelo : Bases Edafológicas, Problemática, Administración y Contaminación*. CD-ROM Interactivo. Ed. Publicaciones Integrales, La Paz. ISBN: 99905-0-450-4.
- » Iglesias, M.R. y A.H. Barchuk. 2010. Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido (Argentina). *Ecología Austral* 20: 71-79.
- » Iglesias y Taha. 2010. Monografías de especies anuales, arbustivas y acuícolas con potencial energético en Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.
- » Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 1996. La salinidad del suelo y del agua de riego y su relación con los cultivos. Cartilla Divulgativa 5.
- » Instituto Nacional de Asuntos Públicos de la Universidad de Chile (INAP-UCHILE). 2011. Informe final, determinación de los factores de emisión para los alcances 1 y 2 de la estimación de huella de carbono. Programa de estudios e Investigaciones en energía para la división de desarrollo sustentable. Subsecretaría de energía. 170 p.
- » Instituto Nacional de Normalización (INN). 1999. NCh1333.Of78, Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos. Norma Chilena Oficial "Requisitos de calidad del agua para diferentes usos" Instituto
- » Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- » Iponga D.M., S.J. Milton and D.M. Richardson. 2008. Superiority in competition for light: a crucial defining the impact of the invasive alien tree *Schinus molle* (Anacardiaceae) in South African savanna. *Journal of Arid Environments* 72(5): 612-623.
- » Iponga, D.M., S.J. Milton and D.M. Richardson. 2009. Reproductive potential and seedling establishment of the invasive alien tree *Schinus molle* (Anacardiaceae) in South Africa. *Austral Ecology* 34(6): 678-687.
- » Jaksic, F., P. Marquet y H. González. 1997. Una perspectiva en el uso del agua en el Norte Grande. *Estudios Públicos* (68): 25 p.
- » Jiménez, J. s/a. Cambio climático e impacto en el país y en la región del Biobío. Centro de Ciencias Ambientales, EULA, Chile.
- » Joerdens-Roettger, D. 2007. Piñon (*Jatropha curcas*). Cultivo con valor energético. *Revista Agroenfoque* 21: 24-26.
- » Kayani, S.A., H.H. Naqvi, I.P. Ting and J. Kumamoto. 1990. Effect of salinity on fatty acid and fatty alcohol composition during the germination of *Jatropha curcas* L. seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 38(5): 1269-1271.
- » Kheira, A.A.A. and N.M.M. Atta. 2009. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficits: yield, water use efficiency and oilseed characteristics. *Biomass and Bioenergy* 33(10): 1343-1350.
- » Krishnamurthy, L., R. Serraj, C.T. Hash, A.J. Dakheel and B.V.S. Reddy. 2007. Screening sorghum genotypes for salinity tolerant biomass production. *Euphytica* 156(1): 15-24.

- » Kumar, A. and S. Sharma. 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): a review. *Industrial Crops and Products* 28(1): 1-10.
- » Lamarque, A.L., D.M. Maestri, J.A. Zygadio and C.A. Guzmán. 2000. Chemical evaluation of *Geoffroea decorticans* seeds as source of oil and protein. *Grasas y Aceites* 51(4): 241-243.
- » Labra, F. 2009. Zonificación agroecológica preliminar para el establecimiento de áreas potenciales de cultivo de *Jatropha curcas* L. con fines bioenergéticos entre las regiones de Antofagasta y Valparaíso. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 138 p.
- » Lapa, P.C. 2004. Aprovechamiento integral y racional de la tara *Caesalpinia spinosa* - *Caesalpinia tinctoria*. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG* 7(14): 64-73.
- » Levy, J. G. 2000. Interdisciplinary aspects of soil science. Sodicity. In: *Handbook of soil science*. M.E. Sumner (Ed.). CRC Press.
- » Liu, I.S. 2009. Monografía para el cultivo de la tara *Caesalpinia spinosa* (Molina) Kuntze. Perú Biodiverso, Lima, Perú. 32 p.
- » López, B. s/a. Efecto de la salinidad en suelo y planta. Informe de Diplomado en Fertirrigación.
- » Luebert, F. y R. Gajardo. 2000. Vegetación de los Andes áridos del norte de Chile. *Lazaroa* 21: 111-130.
- » Luebert, F. y P. Plissock. 2006. Sinopsis bioclimática de Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 316 p.
- » Luzio, W. 1990. The soils of the desertic and arid regions of Chile. In: Kimble, J.M. *Proceedings of the Sixth International Soil Correlation Meeting (VI ISCOM)*. Characterization, Classification and Utilization of Cold Aridisols and Vertisols USDA, Soil Conservation Service, National Soil Survey Center. Lincoln, N.E. p.: 104-111.
- » Luzio, W. y S. Alcayaga. 1992. Mapa de Asociaciones de grandes grupos de suelo. *Revista Agricultura Técnica* 52(4): 347 – 353 p.
- » Luzio, W. 1997. Clasificación de suelos. Universidad de Chile. 19 p.
- » Luzio, W. 2010. Suelos de Chile. Departamento de Ingeniería y Suelos, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 364 p.
- » Maas, E.V., G.J. Hoffman, G.D. Chaba, J.A. Poss and M.C. Shannon. 1983. Salt sensitivity of corn at various growth stages. *Irrigation Science* 4(1):45-57.
- » Maestri, D.M., R.H. Fortunato, C.A. Guzmán, M.M. Torres and A.L. Lamarque. 2002. Seed compositional studies of some species of Papilionoideae (Leguminosae) native to Argentina. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 82(3): 248-251.
- » Maestri, D.M., R.H. Fortunato, J.A. Greppi and A.L. Lamarque. 2001. Compositional studies of seeds and fruits from two varieties of *Geoffroea decorticans*. *Journal of Food Composition and Analysis* 14(6): 585-590.
- » Malanoux, M., E.H. Sène y N. Atzmon. 2007. Bosques, árboles y agua en las tierras áridas: un equilibrio delicado. *Unasyva*, Vol. 58: 24-29 p.
- » Martínez Raya, A. 1996. Evaluación y manejo de suelos salinos y sódicos. En Aguilar et. al. (eds). *Evaluación y Manejo de suelos*. Junta de Andalucía.
- » Marzal, C. 2012. Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Elqui. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de La Serena. Facultad de ingeniería. Departamento de obras civiles. 137 p.
- » Medina, C. and L. Cardemil. 1993. *Prosopis chilensis* is a plant highly tolerant to heat shock. *Plant, Cell and Environment* 16(3): 305-310.
- » Meyer, S. 2008. *Atriplex* L. *Satbush*. 283-290. In: F.T. Bonner and R.P. Karrfalt (eds.). *The woody plant seed manual*. Agriculture Handbook. 727. Forest Service, Department of Agriculture, Washington D.C., United States. 1.223 p.
- » Ministerio de Agricultura. 1974. Decreto Ley N° 701, que Regula la actividad forestal e incentiva la reforestación.
- » Ministerio de Bienes Nacionales. 2011a. Chile: Superficie Territorio Fiscal. 19 p.

- » Ministerio de Bienes Nacionales. 2011b. Balance de Gestión Integral. 50 p.
- » Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. 2008. Ley N° 20.257, que Introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales.
- » Ministerio de Energía. 2012. Ley N° 20.571, que Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales.
- » Ministerio de Energía, 2013. Mediciones de la radiación solar en el norte de Chile. Disponible en: <http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/renovables_noconvencionales/Tipos_Energia/energia_solar.html>
- » Ministerio de Desarrollo Social. 2011. Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN). Disponible en: <http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/layout/doc/casen/publicaciones/2011/CASEN_2011.pdf>
- » Ministerio de Medio Ambiente. 2011a. Informe del Estado del Medio Ambiente. Capítulo 9. Suelos para Uso Silvoagropecuario. 30 p.
- » Ministerio de Medio Ambiente. 2011b. Informe del Estado del Medio Ambiente. Capítulo 8. Recursos Hídricos. 50 p.
- » Ministerio de Obras Públicas. 2011. Cuenta Pública Sectorial. 40 p.
- » Molina, E. G. y A. V. Little. 1981. Geoecology of the Andes: the natural science basis for research planning. Mountain Research & Development, 1, pp. 115-144.
- » Mooney, H.A., S.L. Gulmon, P.W. Rundel and J. Ehleringer. 1980. Further observations on the water relations of *Prosopis tamarugo* of the northern Atacama Desert. *Oecologia* 44(2): 177-180.
- » Munns, R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist* 167(3): 645-663.
- » Munns, R. and M. Tester. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *The Annual Review of Plant Biology* 59: 651-681.
- » Muñoz-Schick, M., R. Pinto, A. Mesa y A. Moreira-Muñoz. 2001. "Oasis de niebla" en los cerros costeros del sur de Iquique, Región de Tarapacá, Chile, durante el evento El Niño 1997-1998. *Revista Chilena de Historia Natural* 74(2): 389-405.
- » Navarro y Navarro, 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 487 p.
- » Navas, L.E. 1976. Flora de la Cuenca de Santiago de Chile. Tomo II: Dicotyledoneae-Archichlamydeae. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, Chile. 599 p.
- » Neumann, P.M. 2008. Coping mechanisms for crop plants in drought-prone environments. *Annals of Botany* 101(7): 901-907.
- » Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2005. Panorama de la agricultura chilena. Ministerio de agricultura. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 85 p.
- » Oficina de Estudios Y Políticas Agrarias (ODEPA). 2007. Contribución de la política agraria al desarrollo de los biocombustibles en Chile. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 140 p.
- » Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2012. Macroeconomía y agricultura chilena. 9 p.
- » Ogunniyi, D.S. 2006. Castor oil: a vital industrial raw material. *Bioresource Technology* 97(9): 1086-1091.
- » Ojeda, E. y R. Mesa. 2008. *Schinus molle* L. Falso pimentero. Gobierno de Canarias. Disponible en: <www.interreg-bionatura.com/especies/pdf/Schinus%20molle.pdf>.
- » Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). 2006. Fichas técnicas productos frescos y procesados. Disponible en: <www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/AE620s/index.htm>.
- » Paneque M., C. Román-Figueroa, R. Vásquez-Panizza, J.M. Arriaza, D. Morales y M. Zulantay. 2011. Bioenergía en Chile. M. Paneque (ed.). Santiago, Chile. 124p.

- » Patiño, J. 2008. Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. *Revista Energética* (39): 16 p.
- » Peng, S. and A.M. Ismail. 2004. Physiological basis of yield and environmental adaptation in rice. 83-140. In: H.T. Nguyen and A. Blum (eds.). *Physiology and biotechnology integration for plant breeding*. Marcel Dekker, United States of America. 628 p.
- » Pedrosa, D.M., N.E. de Macedo, L. Soares, S. Wellington e A. Bezerra. 2007. Rendimiento e eficiência agronômica do consórcio da Mamoneira com cereais e fíjao caupi no semi-árido nordestino. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas, Campina Grande* 11(3): 145-162.
- » Peña y Salazar, 1993. Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas-Dirección General de Aguas (MOP/DGA). SDT N° 3.
- » Pérez, J., N. Saliendra, K. Akshalov, D. Johnson y E. Laca. 2010. Land use influences carbon fluxes in northern Kazakhstan. *Rangeland Ecology Manage* (63): 82 – 93 p.
- » Pinto, R. y F. Luebert. 2009. Datos sobre la flora vascular del desierto costero de Arica y Tarapacá, Chile, y sus relaciones fitogeográficas con el sur de Perú. *Gayana Botánica* 66(1): 28-49.
- » Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 1999. ¿Qué es la desertificación? [En línea]. Oficina Regional para América Latina y El Caribe. 9 p. Disponible en: <www.rolac.unep.mx/deselac/esp>.
- » Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2011. Lucha contra la desertificación en Chile. Programa de Recuperación ambiental comunitario para combatir la desertificación PNUD/GEF/PPS-UE.
- » Quaranta, G. 2007. Agricultura de secano. *Land Care in Desertification Affected Areas From Science Towards Application. Serie C* (4): 1 – 11.
- » Queensland Government. 2011. Pepper tree, *Schinus molle* var. *areira*. Disponible en: <http://keyserver.lucidcentral.org/weeds/data/03030800-0b07-490a-8d04-0605030c0f01/media/Html/Schinus_molle_var_areira.htm>
- » Recalde, E. y L. Durán. 2009. Cultivos Energéticos Alternativos. Centro Iberoamericano de Investigación y Transferencia de Tecnología en Oleaginosas. 178 p.
- » Reynolds, M.P., A. Mujeeb-Kazi and M. Sawkins. 2005. Prospects for utilizing plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought- and salinity-prone environments. *Annals of Applied Biology* 146(2): 239-259.
- » Rhoades, J.D. s/a. Evidence of the potential use of saline water for irrigation. *CIHEAM - Options Méditerranéennes*. 133-146 p.
- » Richards, L. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. *Handbook 60*, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, EE.UU. Febrero, 1954. 172 p.
- » Ridder, N.A y J Boonstra. 1994. Analysis of water balance. En: "Drainage Principles and Applications. ILRI Publication 16". 2a ed. Holanda. 601-634.
- » Rivera, H. 1996. Rendimiento y poder calorífico de la leña de diferentes especies y procedencias del género *Atriplex*. Memoria Ing. Forestal, Escuela de Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 123 p.
- » Rodríguez, M. 1989. *Geografía Agrícola de Chile*. Editorial Universitaria. 317 p. y mapas.
- » Rogers, M.E., A.D. Craig, R.E. Munns, T.D. Colmer, P.G.H. Nichols, C.V. Malcolm, E.G. Barret-Lennard, A.J. Brown, W.S. Semple, P.M. Evans, K. Cowley, S.J. Hughes, R. Snowball, S.J. Bennett, G.C. Sweeney, B.S. Dear and M.A. Ewing. 2005. The potential for developing fodder plant for the salt-affected areas of southern and eastern Australia: an overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 45(4): 301-329.
- » Román C., K. Vásquez, G. Martínez, G. Lillo, R. Fuster, A. de la Fuente, J.M. Uribe, L.O. Faúndez y M. Paneque. 2012. Cultivos Energéticos: una apuesta de Futuro. M. Paneque (ed.). 2 Edición. Santiago, Chile. 224p.

- » Román C., K. Vásquez, R. Valenzuela, G. Martínez, G. Lillo, L. Morales, R. Fuster, A. de la Fuente, J.M. Uribe, L.O. Faúndez y M. Paneque. 2009. Cultivos Energéticos: una apuesta de Futuro. M. Paneque (ed.). Santiago, Chile. 224p.
- » Ronen, E. 2008. Microelementos en la agricultura. Red Hidroponía, Boletín N° 38. Lima, Perú.
- » Rosas, M.R. 1989. El género *Atriplex* (Chenopodiaceae) en Chile. *Gayana Botánica* 46(1-2): 3-82.
- » Rosende, R., I. Ulloa, E. Cuevas y J. Donoso. 1985. Composición química de las maderas y cortezas de tamarugo (*Prosopis tamarugo* Phil.) y algarrobo (*Prosopis alba* Gris.) de la Pampa del Tamarugal. En: M.A. Habit. Mesa Redonda Internacional sobre *Prosopis tamarugo* Phil. Arica, Chile, Junio 11-15, 1984. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Santiago, Chile.
- » Sadzawka, A. 2006. Propiedades físico-químicas de los suelos I y II. Adsorción e intercambio iónico. pp: 91-157. En: Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Luzio W. y M. Casanova (eds.). Santiago, Chile. 393 p.
- » Salazar, C. 2003. Situación de los Recursos Hídrico en Chile. Third World Center for Water Management & Fundación Nippon.
- » Santibáñez y Uribe. 1990. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Ingeniería y Suelos, Laboratorio de Agroclimatología. Santiago, Chile. 65 p.
- » San Martín, R., T. de la Cerda, A. Uribe, P. Basilio, M. Jordán, S. Prehn and M. Gebauer. 2010. Evaluation of guindilla oil (*Guindilla trinervis* Gillies ex Hook. et Arn.) for biodiesel production. *Fuel* 89(12): 3758-3790.
- » Scholz, V. and J.N. da Silva. 2008. Prospects and risks of the use of Castor oil as a fuel. *Biomass and Bioenergy* 32(2): 95-100.
- » Schulze, E.D. 1986. Whole-plant responses to drought. *Australian Journal of Plant Physiology* 13(1): 127-141.
- » Scofield, S. C. 1936. The salinity of irrigation water. *Smithsn. Inst. Ann. Rpt.* 1936: 275-287 p.
- » Seigler, D.S., M. Cortes and J.M. Aguilera. 1987. Chemical components of *Guindilla* seeds (*Valenzuela trinervis*). *Biochemical Systematics and Ecology* 15(1): 71.
- » Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). 2011. Balance de Gestión Integral. Ministerio de Minería. 74 p.
- » Sherrard, M.E. and H. Maherali. 2006. The adaptive significance of drought escape in *Avena barbata*, an annual grass. *Evolution* 60(12): 2478-2489.
- » Silva, R.A., R.E.L. de Ruiz y S.O. Ruiz. 2004. Estudio fitoquímico de flores de *Geoffroea decorticans* (Gill. Ex Hook. et Arn.) Burk, Leguminosaeae (Fabaceae). *Acta Farmacéutica Bonaerense* 23(4): 524-526.
- » Singh, L., S.S. Bargali and S.L. Swamy. 2006. Production practices and post-harvest management in *Jatropha*. 252-267. In: B. Singh, R. Swaminathan y V. Ponraj (eds). *Proceedings of the biodiesel conference toward energy independence - focus on Jatropha*. Rashtrapati Nilayam, Hyderabad, India, June 9-10, 2006. New Delhi, India.
- » Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2ª. Ed. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 869 p.
- » Sudzuki, F. 1985. Utilización de la humedad ambiental por *Prosopis tamarugo* Phil. En: M.A. Habit. Mesa Redonda Internacional sobre *Prosopis tamarugo* Phil. Arica, Chile, Junio 11-15, 1984. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Santiago, Chile.
- » Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). 2010. Información de gestión del sector sanitario 2009. Santiago, Chile.
- » Tanji K.K (ed). 1990. Leaching fraction and root zone salinity control. En: "Agricultural Salinity Assessment and Management". ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No 71. USA 237-261.

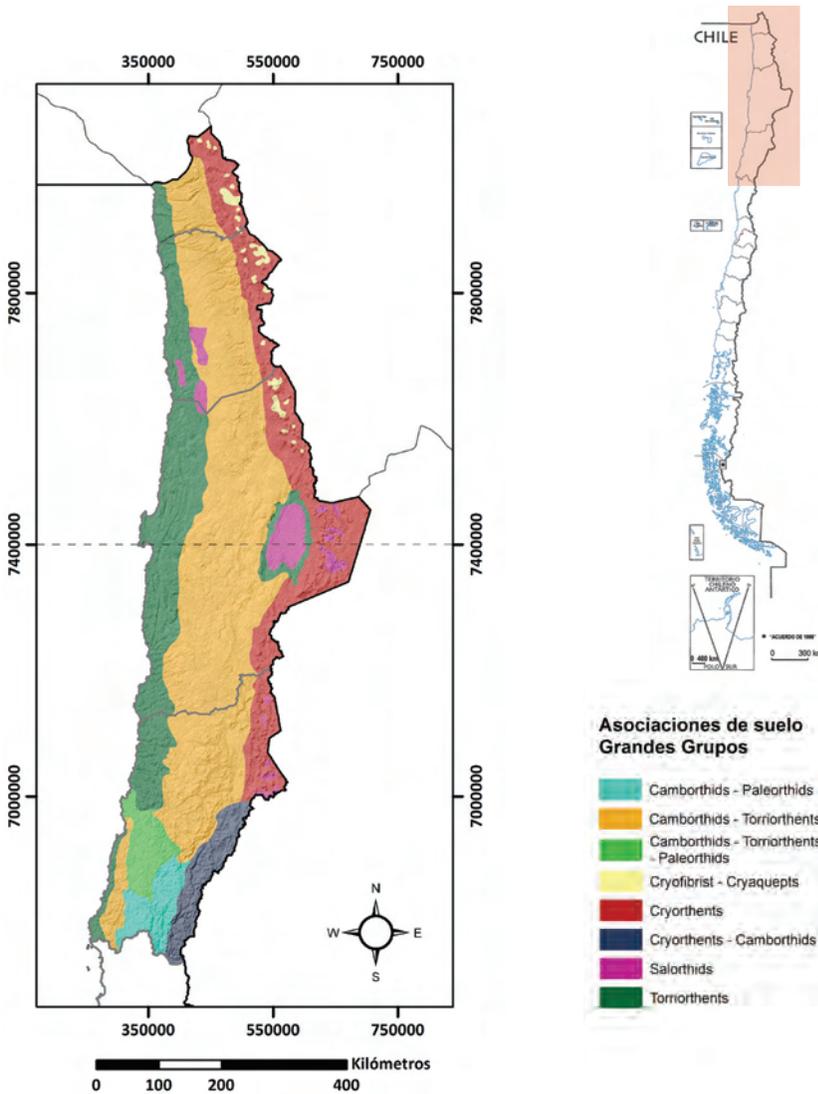
- » Tapia, Y., O. Díaz, C. Pizarro, R. Segura, M. Vines, G. Zúñiga y E. Moreno-Jiménez. 2013. *Atriplex atacamensis* and *Atriplex halimus* resist As contamination in pre-andean soils (northern Chile). *Science of the Total Environment* 450-451: 188-196.
- » Toledo, R., V. Coria, J. Bautista, H. Muñoz, J. Vidales, J. Castillo y F. Gracia. 2006. Guía técnica para la producción de Higuera (Ricinus communis L. var. Mirante 10) en Michoacán. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Gobierno de México 31 p.
- » Troll, C. 1958. The cordilleras of the tropical Americas: aspects of climatic, phytogeographical and agrarian ecology. Pp. 15-56. En C. Troll (Ed), *Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical Americas*. Dummelers Verlag, Bonn.
- » Unidad de Diagnóstico Parlamentario (UDP). 2012. La desertificación en Chile. Departamento de evaluación de la ley. Valparaíso, Chile.
- » United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). 1994. Intergovernmental negotiating committee for the elaboration of an international convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. United Nations, New York, USA.
- » Universidad de Chile - Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). 2005. Criterios de calidad de suelo agrícola. 188p. En: *Criterios de calidad de suelos y aguas de riego*. SAG. Disponible en:
- » <www2.sag.gob.cl/biblioteca_digital/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/inicio.htm>
- » Universidad de Chile - SAG (Servicio Agrícola y Ganadero). 2006. Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. Informe Final. Dirección de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 254 p.
- » Uphof, J.C.TH. 1941. Halophytes. *Botanical Review* 7(1): 1-58.
- » Uribe J.M.; A. de la Fuente, R. Cabrera y M. Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Santiago, Chile. 232p.
- » USDA (United States Department of Agriculture). 1948. The Quality of Water for Irrigation Use. Technical Bulletin N° 962. Septiembre.
- » Van Boven, M., P. Daenens, K. Maes y M. Cokelaere. 1997. Content and composition of free sterols and free fatty alcohols in jojoba oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45(4): 1180-1184.
- » Van Hoorn, J.W y J.G. Alphen. 1994. Salinity Control. En: "Drainage Principles and Applications. ILRI Publication 16". 2a ed. Holanda. 533-600.
- » Vargas, H. y D. Bobadilla. 2000. Insectos asociados al bosque de Tamarugo. Pp. 283-318. En: A. Baldini y L. Pancel. *Agentes de daño en el bosque nativo*. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 408 p.
- » Vázquez-Yanes, C., I.B. Muñoz, M.I.A. Silva, M.G. Días y C.S. Dirzo. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno de México e Instituto de Ecología, Universidad Nacional de México (UNAM). 266 p.
- » Walther, GR, Post, E, Convey, P, Menzel, A, Parmesan, C, Beebee, TJC, Fromentin, JM, Hoegh-guldberg, O, Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389-395.
- » Wisniak, J. 1994. Potential uses of jojoba oil and meal - a review. *Industrial Crops and Products* 3(1): 43-68.

ANEXO 1.

Taxonomía. Grandes Grupos de Suelos.

La representación de los Grandes Grupos de Suelos permite contar con información generalizada sobre este recurso a nivel país. Las unidades cartográficas ubican espacialmente los suelos comprendidos entre las regiones de Arica y Parinacota y de Atacama.

Figura 37. Grandes Grupos de Suelos Regiones Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama (Luzio, 1990).



Torriorthents: Suelos de desarrollo limitado. Delgados, sobre roca, muy estratificados, sin horizontes evolucionados. Se asocian a sectores costeros entre la Región de Arica y Parinacota y la Región de Coquimbo. Fisiográficamente ocupan sectores de la cordillera de la costa y áreas sedimentarias de terrazas marinas.

Camborthids-Torriorthents: Suelos más evolucionados representados por Aridisols, con horizonte cámbico textural, estructural o de color (Camborthids). Se han desarrollado a partir de sedimentos de texturas medias a gruesas y son delgados (menos de 50 cm) o moderadamente profundos (de 51 a 100 cm). Se consideran como Depresión Intermedia entre las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y parte de la Región de Atacama, y según Rodríguez (1989), es una enorme llanura desértica entre los 1.000 y 2.500 m.s.n.m.

Cryorthents: Suelos sin desarrollo, de texturas gruesas y muy delgados. Incluye suelos derivados de material volcánico. Presentan poca evolución dada la temperatura y humedad que determinan un grado muy bajo de meteorización de los vidrios volcánicos. Tiene, casi sin alterar, propiedades de los materiales parentales. Se consideran como suelos del Altiplano y Cordillera de los Andes entre la Región de Arica y Parinacota y parte de la Región de Atacama.

Salorthids (Cuencas Sedimentarias o Salares): Suelos muy estratificados donde se alternan capas de arcillas, carbonato de calcio, arena, horizontes petrocálcicos y otros. Los niveles de salinidad son muy elevados. Son sectores ubicados en la costa, depresión intermedia y en la alta cordillera entre las regiones de Arica y Parinacota y de Atacama, en áreas normalmente

deprimidas respecto del relieve regional.

Cryofibrist-Cryaquepts: Algunos corresponden a suelos orgánicos y otros a suelos minerales con alto contenido de materia orgánica. En esta unidad se ubica la mayor parte de los sectores conocidos como Bofedales. Son suelos que se ubican entre la Región de Arica y Parinacota y parte de la Región de Antofagasta sobre los 3.000 m.s.n.m. en la alta cordillera. También se pueden encontrar en sectores cordilleranos más al sur pero ocupan superficies menores y con menor significación desde el punto de vista productivo.

Camborthids-Torriorthents-Paleorthids: Es la continuación de la unidad cartográfica Camborthids-Torriorthents. Son suelos con un horizonte petrocálcico dentro de 1 m de profundidad. Se consideran como la parte norte de la Depresión Intermedia en la Región de Atacama.

Camborthids-Paleothids: Es la continuación de la unidad cartográfica de Paleorthids. Son suelos de desierto evolucionados, unos con horizonte cámbico y otros con horizonte petrocálcico. Se consideran como la parte sur de la Depresión Intermedia en la Región de Atacama. Se ubican en amplias llanuras y en el límite entre la región desértica (extrema aridez) y la región árida (semiaridez), con aumento de la precipitación y la cubierta vegetal.

Cryorthents-Camborthids: Son suelos de escaso desarrollo producto de materiales parentales gruesos asociados con Aridisols que presentan un grado mayor de desarrollo representado por la presencia de un horizonte cámbico. Son suelos ubicados en los sectores altos de precordillera y Cordillera de los Andes al sur de la Región de Atacama, en posición de cerros escarpados con pendientes fuertes.

ANEXO 2.

Criterios para analizar calidad del suelo

pH

Tabla 12. Clasificación de suelos respecto al pH (Sadzawka, 2006).

Rango de pH	Término descriptivo
< 3,5	Ultra ácido
3,6 - 4,4	Extremadamente ácido
4,5 - 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido
5,6 - 6,0	Moderadamente ácido
6,1 - 6,5	Débilmente ácido
6,6 - 7,3	Neutro
7,4 - 7,8	Débilmente alcalino
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 - 9,0	Fuertemente alcalino
> 9,0	Muy fuertemente alcalino

Salinidad y sodicidad.

Tabla 13. Clasificación de Suelos respecto a la Salinidad y Sodicidad (Sadzawka, 2006)

Clasificación del suelo	CE (dS/m)	RAS
Nomal	Menor a 4	Menor a 13
Salino	Mayor o igual a 4	Menor a 13
Salino-sódico	Menor a 4	Mayor o igual a 13
Sódico	Mayor o igual a 4	Mayor o igual a 13

Contenidos de B, Cu, Mn y Mo esperados en suelos

Tabla 14. Contenido de elementos Boro, Cobre, Manganeso y Molibdeno esperados para el norte del país.

Características	Elemento			
	Boro (B)	Cobre (Cu)	Manganeso (Mn)	Molibdeno (Mo)
Contenido total (mg L ⁻¹)	2 - 270	2 - 250	20 - 10.000	0,2 - 40
Contenido total reportado Chile (mg L ⁻¹)	20 - 33 (2)	12 - 60 (1)	326 - 880 (2)	0,05 - 2 (2)
Disponibilidad pH	Mod. Alcalino	Neutro a ácido	Ácido	Alcalino

Adaptado de diversas fuentes. (1) Valor informado en la Región de Atacama; (2) Valor informado en la Región de Coquimbo.

ANEXO 3.

Criterios de Análisis de Calidad de Agua de Riego

Norma Chilena NCh1333 Of.78.

Requisitos para calidad de las aguas destinadas a riego

Concentraciones límite superiores permisibles para elementos químicos, parámetros físico-químicos y biológicos

Tabla 15. Estándar para agua de riego según la norma nacional NCh1333 Of.78 (INN, 1999).

Elemento	Unidad	Límite máximo
pH		5,5 - 9,0
Aluminio	mg L ⁻¹	5
Arsénico		0,1
Bario		4
Berilio		0,1
Boro		0,75
Cadmio		0,01
Cianuro		0,2
Cloruros		200
Cobalto		0,05
Cobre		0,2
Cromo		0,1
Flúoruro		1
Hierro		5
Litio		2,5
Litio (citrícos)		0,075
Manganeso		0,2
Mercurio		0,001
Molibdeno		0,01
Níquel		0,2
Plata		0,2
Plomo		5
Selenio		0,02
Sulfatos		250
Vanadio	0,1	
Zinc	2	
Sodio porcentual	% de Na	35
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1000

Tabla 16. Clasificación de calidad de agua de acuerdo a su CE según la norma nacional NCh1333 Of.78 (INN, 1999).

Clasificación	Conductividad Eléctrica (CE) ds/m
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	CE < 0,75
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	0,75 < CE < 1,5
Agua que puede tener efecto adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	1,5 < CE < 3
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	3 < CE < 7,5

DWAF

A nivel internacional, Sudáfrica, a través de South African Water Quality Guideline (DWAF, 1996) propone un enfoque distinto para el desarrollo de estándares de calidad para agua de riego. Esta institución asocia niveles de restricciones de uso del agua de riego a rangos de concentraciones de elementos químicos en ésta. Este enfoque, más flexible, define dos niveles de concentración de riego. El primer nivel caracteriza las aguas sin restricciones para riego de todo tipo de cultivos. El segundo nivel define aguas con restricciones severas, que pueden ser ocupadas a corto plazo y relacionarse con un estudio específico del sitio regado.

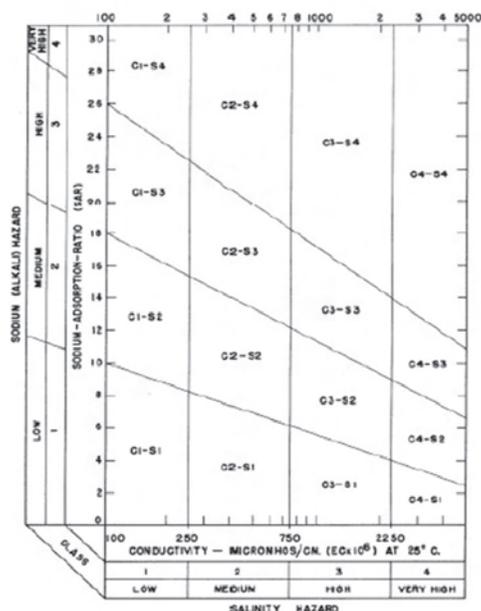
Entre estas dos concentraciones el agua, según este esquema, puede ser empleada según distintos criterios (tiempo de riego, textura del suelo, pH, tipo de cultivo, etc.). Esta propuesta podría complementar la norma nacional NCh 1333 Of.78 y precisar en caso de no cumplimiento de ésta, cual es el grado de restricción que puede presentar el recurso hídrico utilizado como fuente de riego.

Criterios y antecedentes utilizados por este estándar.

- **Boro, cloro y sodio:** Para estos elementos los rangos de concentraciones en agua de riego se relacionan con un listado de especies de cultivos clasificados según tolerancia al elemento. En esta situación, la concentración máxima permitida fluctúa en función de la especie considerada, según su tolerancia específica.
- Para el boro se indica que un agua con una concentración inferior a 0,5 mg L⁻¹ puede ser utilizada sin restricciones como fuente de riego. Para el caso de los cloruros este umbral corresponde a 100 mg L⁻¹. Respecto al sodio, el DWAF indica un umbral de uso sin restricción de 115 mg L⁻¹.
- **Cobre:** Un agua con una concentración inferior a 0,2 mg L⁻¹ de cobre puede ser utilizada sin restricción como fuente de riego; este nivel es equivalente al mencionado en la norma nacional NCh1333 Of.78. Una concentración de 5 mg L⁻¹ es informada por el DWAF como umbral sobre el cual el recurso hídrico se puede usar sólo en el corto plazo y en función las características específicas del sitio considerado (entre otros factores se menciona el pH como parámetro de importancia).

- **Manganeso:** Un agua con una concentración inferior a $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de manganeso pueden ser utilizadas sin restricción como fuente de riego; este nivel es equivalente al mencionado en la norma nacional NCh1333 Of.78. Una concentración de 10 mg L^{-1} es informada como umbral sobre el cual el recurso hídrico se puede utilizar sólo en el corto plazo y en función las características específicas del sitio considerado.
- **Molibdeno:** Aguas con una concentración inferior a $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ de molibdeno puede ser utilizada sin restricción como fuente de riego; este nivel es equivalente al mencionado en la norma nacional NCh1333 Of.78. Una concentración de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$ es mencionada como umbral sobre el cual el recurso hídrico se puede usar sólo en el corto plazo y en función las características específicas del sitio considerado.
- **Sulfatos:** EL DWAF no considera a los sulfatos en el listado de los parámetros normados. En los documentos técnicos relativos a la metodología de desarrollo de estándares se señala que los sulfatos no presentan una toxicidad específica en plantas. La principal acción de esta molécula se asocia al principio de osmosis, generando un incremento de la salinidad del suelo que puede ocasionar estrés hídrico en plantas. Por lo anterior el sulfato no se considera como elemento en sí, pero dentro del conjunto de sales y el parámetro normado corresponde a la conductividad específica o a los sólidos totales disueltos que reflejan la salinidad del agua.
- **Conductividad Eléctrica (CE):** Es un indicador de la salinidad del agua que puede generar, mediante fenómenos osmóticos, estrés hídrico en plantas (plasmólisis). El DWAF informa que un agua con una CE inferior a $0,4 \text{ ds m}^{-1}$ puede ser utilizada sin restricción como fuente de riego y un agua con una CE superior $5,4 \text{ dS m}^{-1}$ puede utilizarse solamente en especies tolerantes, con un manejo específico de la salinidad del suelo. Se define como tolerante los cultivos que no presentan disminución de rendimiento con una CE del agua de riego entre 6 a 10 dS m^{-1} y como moderadamente tolerante los cultivos que no presentan disminución de rendimiento con una CE del agua de riego entre 3 a 6 dS m^{-1} .
- **Relación de Adsorción de Sodio (RAS):** La RAS se relaciona con problemas de sodicidad del suelo. Los suelos sódicos pueden presentar pérdida de estructura que genera una disminución de la tasa de infiltración del agua. Debido a la competencia del sodio con otras sales, la disminución de la tasa de infiltración inducida por la RAS es directamente asociada a la salinidad y se ve mitigada con altos valores de CE. El DWAF indica que un agua con una RAS inferior a 2 puede ser utilizada sin restricción como fuente de riego y no induce toxicidad asociada al sodio en cultivos y no genera efectos negativos en suelos y un RAS superior a 15 induce toxicidad en gran parte de los cultivos.

Figura 38. Diagrama para la clasificación de las aguas para riego (Richards, 1954)



USDA

El United States Department of Agriculture (USDA) tiene un diagrama para la clasificación de aguas para riego que está basado en la Conductividad Eléctrica en mmhos/cm (equivalente a dS/m) y en la relación de adsorción de sodio.

De acuerdo a esto los peligros asociados a la salinidad se clasifican desde baja (C1) a alta (C4) salinidad, y a sodicidad de baja (S1) a alta (S4) (Richards, 1954). Estas clases representan riesgos asociados a la salinización o sodificación del suelo a partir de los aportes de sales y sodio provenientes del agua de riego (Figura 36).

i. Clases de salinidad

Agua de baja salinidad (C1): Puede usarse para riego de la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero éste se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

Agua de salinidad media (C2): Puede usarse siempre y cuando haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de salinidad, se pueden producir las plantas moderadamente tolerante a las sales.

Agua altamente salina (C3): No puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo, por lo tanto, seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.

Agua muy altamente salina (C4): No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso, se deben seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.

ii. Clases de sodicidad

Esta clasificación se basa primordialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo.

Agua baja en sodio (S1): Puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

Agua media en sodio (S2): En suelos de textura fina el sodio representa un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

Agua alta en sodio (S3): Puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que éstos necesitarán prácticas especiales de manejo (buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para substituir el sodio intercambiable; sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta salinidad.

Agua muy alta en sodio (S4): Es inadecuada para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

Debe considerarse además otras características, como boro y concentración de bicarbonatos, ya que uno u otra hacen variar la calidad del agua.

iii. Concentración de boro en la calidad del agua

Las concentraciones tóxicas de boro que se encuentran en algunas aguas de riego obligan a tener precaución a este elemento para establecer su calidad.

Tabla 17. Límites permisibles de boro para aguas de riego, cantidades en mg L⁻¹ (Scofield, 1936)

CLASE	Cultivos sensibles	Cultivos semitolerantes	Cultivos tolerantes
1	< 0,33	<0,67	<1,00
2	0,33 a 0,67	0,67 a 1,33	1,00 a 2,00
3	0,67 a 1,00	1,33 a 2,00	2,00 a 3,00
4	1,00 a 1,25	2,00 a 2,50	3,00 a 3,75
5	>1,25	>2,50	>3,75

iv. Concentración de bicarbonatos en la calidad del agua

La clasificación de calidad de agua en relación al contenido de bicarbonatos presentes en ella (Eaton, 1950):

No buena para riego (carbonato de sodio residual > 2,5 meq/L)

Dudosa para riego (1,25 meq/L < carbonato de sodio residual < 2,5 meq/L)

Buena para riego (carbonato de sodio residual < 1,25 meq/L)

Se considera que las buenas prácticas de manejo y la aplicación de mejoradores químicos, podría permitir el uso de las aguas dudosas para riego.

FAO

De acuerdo al criterio utilizado por la Food and Agriculture Organization (FAO) para el cálculo del grado de restricción del agua de riego en función de salinidad e infiltración, se utiliza la siguiente Tabla (Ayers y Westcot, 1987).

Tabla 18. Estimación de problemas potenciales por salinidad e infiltración.

Problema potencial	Grado de restricción		
	Ninguna	Ligera a moderada	Severa
Salinidad			
CE (dS/m)	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
SDT* (mg L ⁻¹)	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltración			
RAS	CE		
0-3	> 0,7	0,7 - 0,2	< 0,2
03-jun	> 1,2	1,2 - 0,3	< 0,3
06-dic	> 1,9	1,9 - 0,5	< 0,5
dic-20	> 2,9	2,9 - 1,3	< 1,3
20-40	> 5,0	5,0 - 2,9	< 2,9
pH	6,5 a 8,4		

*SDT: Sólidos Disueltos Totales