

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MEMORIA DE TÍTULO

**ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD CARGA DE LOS TIPOS
VEGETACIONALES CON APTITUD PASTORAL DESTINADOS AL MANEJO
DE VICUÑA (*Vicugna vicugna* Mol.), EN EL ALTIPLANO DE LA PROVINCIA DE
PARINACOTA, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA**

NORA VIRGINIA FREDERICKSEN NEIRA

SANTIAGO, CHILE

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MEMORIA DE TÍTULO

**ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD CARGA DE LOS TIPOS
VEGETACIONALES CON APTITUD PASTORAL DESTINADOS AL MANEJO
DE VICUÑA (*Vicugna vicugna* Mol.), EN EL ALTIPLANO DE LA PROVINCIA DE
PARINACOTA, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA**

**CARRYING CAPACITY ESTIMATION OF VEGETATION TYPES WITH
PASTORAL APTITUDE ASSIGNED TO VICUNA (*Vicugna vicugna* Mol.)
MANAGEMENT, IN THE HIGHLANDS RANGES OF PARINACOTA PROVINCE,
ARICA AND PARINACOTA REGION**

NORA VIRGINIA FREDERICKSEN NEIRA

SANTIAGO, CHILE

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE AGRONOMÍA

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD CARGA DE LOS TIPOS VEGETACIONALES CON APTITUD PASTORAL DESTINADOS AL MANEJO DE VICUÑA (*Vicugna vicugna* Mol.), EN EL ALTIPLANO DE LA PROVINCIA DE PARINACOTA, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

NORA VIRGINIA FREDERICKSEN NEIRA

	Calificaciones
Profesores Guías	
Giorgio Castellaro G. Ingeniero Agrónomo, M. Sc.	7,0
Luis Morales S. Profesor de Cs. Naturales y Física, Dr.	7,0
Profesores Evaluadores	
Luis Faúndez Y. Ingeniero Agrónomo	7,0
Werther Kern F. Ingeniero Agrónomo, MBA.	7,0

SANTIAGO, CHILE

2010

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia, especialmente a mis padres Alfredo y Virginia, a quienes dedico este trabajo, por las oportunidades, el apoyo y el afecto permanente e incondicional que me han brindado no sólo durante el desarrollo de la presente Memoria, sino también a lo largo de toda mi vida. A mi hermana Consuelo, agradezco sus buenos consejos y su infinita paciencia para escucharme cada vez que lo necesité. A “los chicos”, Constanza y Alfredo, agradezco la comprensión que han tenido y la alegría que me han dado durante este proceso. A mis abuelas(os) su calidez y los valores que han sabido traspasar a la familia. A todos les agradezco el cariño, la paciencia y el enseñarme, con su ejemplo, a ser una mejor persona tanto en lo humano como en lo académico-profesional.

A mis compañeras(os) de carrera, en especial aquellas(os) con quienes me vinculé de manera más cercana, agradezco las vivencias compartidas las que constituyen un valioso recuerdo y que sin duda me han enriquecido como persona. En especial quisiera agradecer a Nicolás, Karla, Fiona, Pamela, María Jesús y Paulina, y a mis amigos de tiempos anteriores, Moisés, Evelyn, Rodolfo y Guillermo quienes, de diferente manera, fueron partícipes del logro de esta Memoria.

A mis profesores guías, Giorgio Castellaro y Luis Morales, agradezco la confianza que depositaron en mí para llevar a cabo esta Memoria, su apoyo y su preocupación constante. Agradezco asimismo al equipo de Fernando, Fidel, Francisco y Esteban, con quienes en más de alguna oportunidad compartimos información útil para este proyecto. También quisiera mencionar al profesor Luis Faúndez por sus valiosos aportes y mirada crítica en la revisión de este trabajo.

Finalmente agradecer a los “peluditos” de la casa, por las alegrías y su cariño sincero y sin palabras.

INDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	4
INTRODUCCIÓN	5
ANTECEDENTES GENERALES.....	5
CAPACIDAD DE CARGA: APROXIMACIÓN A LA METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN	8
OBJETIVOS	11
<i>Objetivo General</i>	11
<i>Objetivos Específicos</i>	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
ÁREA DE ESTUDIO	13
<i>Ubicación</i>	13
<i>Características Generales</i>	13
MATERIALES	17
MÉTODOS.....	20
<i>Resolución utilizada</i>	20
<i>Objetivo Específico 1</i>	21
Generación de base de datos climáticos y modelos digitales de terreno.....	21
Ajuste y espacialización de modelos topoclimáticos.....	23
Temperatura.....	24
Precipitación.....	24
Radiación solar	27
<i>Objetivo Específico 2</i>	27
Digitalización y verificación de carta de asociaciones vegetales.....	27
Inventariado y estimación de atributos de la vegetación.	29
Atributos por asociación.....	29
Atributos globales: Índice de área foliar	30
<i>Objetivo Específico 3</i>	32
Estimación de producción de materia seca.	32
<i>Determinación de la capacidad de carga</i>	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
OBJETIVO ESPECÍFICO 1	37
<i>Base de datos climáticos generada</i>	37
<i>Modelos topoclimáticos ajustados y cartografiados</i>	38
Temperatura.	38
Precipitación.	45
Radiación Solar.....	51
OBJETIVO ESPECÍFICO 2	55
<i>Asociaciones vegetales cartografiadas</i>	55
<i>Atributos de la vegetación inventariados y estimados</i>	57
Atributos por asociación	57

Índice de área foliar	67
OBJETIVO ESPECÍFICO 3	68
<i>Producción de materia seca estimada</i>	68
CAPACIDAD DE CARGA ESTIMADA.....	70
DISCUSIÓN GENERAL.....	74
CONCLUSIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXO I: EXISTENCIAS DE GANADO EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA.....	85
APÉNDICE I: BASES DE DATOS CLIMÁTICOS.....	87
APÉNDICE II: ANÁLISIS DE VARIANZA Y ESTADÍSTICAS DE MODELOS TOPOCLIMÁTICOS	91
APÉNDICE III: SUPERFICIE DE UNIDADES CARTOGRÁFICAS Y TÉRMINOS UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA Y CAPACIDAD DE CARGA	109

RESUMEN

El altiplano es una región ubicada en los Andes Centrales sobre los 3.000 – 3.500 msnm que, en términos productivos, ha sido catalogada como una zona de potencial ganadero y de producción de agua. El ganado doméstico del altiplano lo constituyen principalmente llamas, alpacas y ovinos, y el silvestre las vicuñas; camélido cuya población se ha incrementado notoriamente desde los 70', época de la que datan acciones tendientes a evitar su extinción. La determinación de una correcta carga animal es relevante para el manejo del pastoreo desde el punto de vista de la vegetación, del ganado doméstico, de la fauna silvestre y de los retornos económicos razón por la cual, en diferentes estudios, se ha intentado estimar la capacidad de carga (*CC*) del altiplano. El objetivo del presente trabajo fue estimar la *CC* media anual de praderas altiplánicas para vicuñas, en la Provincia de Parinacota, considerando mejoras respecto a aproximaciones anteriores. La metodología, basada en el contraste entre la energía provista por las praderas y la requerida por una vicuña anualmente, consideró la composición botánica; la producción de materia seca (*MS*), estimada en función de variables climáticas y la producción potencial; el valor energético de las especies vegetales de las praderas; las preferencias alimenticias y requerimientos energéticos de la vicuña; y la condición de las praderas. Todo lo anterior desarrollado en el marco de sistemas de información geográfica, a 90 m de resolución. Los resultados arrojaron altos montos de producción anual de *MS* para bofedales, con un máximo de 2.410 kg ha⁻¹, y valores generalmente bajo 600 kg ha⁻¹ para praderas de secano. La *CC*, en tanto, alcanzó un máximo de 1,45 unidades vicuña (*UV*) ha⁻¹ año⁻¹ para bofedales, y montos generalmente bajo 0,1 *UV* ha⁻¹ año⁻¹ para praderas de secano. El estudio da cuenta del importante rol de los bofedales en el manejo de las vicuñas y de una aparente sobreutilización de las praderas en términos de la *CC* total del área de estudio. La *CC* estimada es referencial, mayor investigación es requerida para validar al menos parte de la metodología usada.

Palabras claves: camélidos sudamericanos silvestres, praderas altiplánicas, topoclimatología, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

The aim of this study was to estimate the annual carrying capacity (*CC*) of highlands ranges for vicuna, in Parinacota Province. The used methodology is based in the relationship between the rangelands energy production and vicuna annual energy requirements, and it was derived from the rangeland botanical composition; the annual dry matter (*MS*) production, estimated as a function of climatological variables and potential production; the energetic values of rangelands species; the vicuna feeding preferences and energy requirements; and the rangelands condition. This was developed within the framework of a geographic information system (*SIG*), in a 90 m resolution. The results showed higher values of annual *MS* production for wetlands (also called *bofedales*) with a maximum of 2.410 kg ha⁻¹, and values generally below 600 kg ha⁻¹ for dryland ranges. The *CC* got a maximum value of 1,45 vicuna units (*UV*) ha⁻¹ year⁻¹ for *bofedales*, and values generally below 0,1 *UV* ha⁻¹ year⁻¹ for dryland ranges. The study shows the key role of *bofedales* in the vicuna management and an apparent rangeland overuse when the whole *CC* of the study area is considered. The estimated *CC* is referential; more investigation is necessary to validate at least part of the used methodology.

Key words: wild south american camelids, highlands ranges, topoclimatology, geographic information systems.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes Generales

El Norte Grande de Chile se ubica en los Andes Centrales, los que comprenden la zona andina de Perú, Bolivia, Argentina y Chile, situada entre las latitudes 8 y 27° S. Los Andes Centrales se caracterizan por la existencia de mesetas desérticas ubicadas por sobre los 3.500 m de altura, que en su conjunto forman lo que se denomina “Puna” o “Altiplano” (Jaksic *et al.*, 1997). En general, esta zona se caracteriza por poseer características ambientales rigurosas, entre las que destacan grandes fluctuaciones térmicas diarias, baja concentración de oxígeno, distribución irregular de precipitaciones con marcados periodos de aridez, alta radiación solar y suelos pobremente desarrollados con baja disponibilidad de nutrientes (Gastó *et al.*, 1993; Jaksic *et al.*, 1997).

El altiplano de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, posee algunas particularidades dadas por una exclusiva y variada flora y fauna asociadas con especies autóctonas singulares. Entre estas se encuentra la queñoa (*Polylepis tarapacana* Phil.), que se constituye como la única especie arborecente que crece sobre los 4.500 msnm, y la vicuña (*Vicugna vicugna* Mol.), animal silvestre de gran potencial económico salvado de su extinción mediante acciones gubernamentales de la Corporación Nacional Forestal, CONAF (Hernández, 1980). Además, este sector ha sido catalogado como un ecosistema frágil dada la sensibilidad que presentan los procesos asociados a la mantención y perpetuación ante cambios producidos por eventos catastróficos naturales o modificaciones introducidas por el hombre (CORFO, 1982; Jaksic *et al.*, 1997).

En cuanto a sus características productivas, esta zona es un área de potencial ganadero y de producción de agua (CORFO, 1982), por lo que la ganadería se presenta como el sustento alimentario y económico fundamental de las comunidades altoandinas, predominantemente de origen aymara, que lo habitan (Troncoso, 1982; De Carolis, 1987; Castellaro, 2005). El ganado existente está conformado principalmente por camélidos sudamericanos (CSA), es decir, llamas (*Lama glama* Linn.) y alpacas (*Lama pacos* Linn.), CSA domésticos y vicuñas, CSA silvestre, y en parte por ovinos (Troncoso, 1982; De Carolis, 1987; Castellaro, 2005). La alimentación de estos se basa en el forraje que producen las diferentes formaciones vegetales naturales del altiplano, siendo las principales el bofedal, el tolar y el pajonal. El bofedal, pradera hídrica azonal, se constituye como el principal recurso forrajero dada su mayor productividad y calidad nutritiva; el tolar y el pajonal por su parte, ambas praderas de secano, radican su importancia, a diferencia del bofedal, en la gran extensión que cubren, estableciéndose como un complemento alimenticio (CORFO, 1982; Troncoso, 1982; Troncoso, 1983; De Carolis, 1987; Ahumada y Faúndez, 2001; Castellaro, 2005).

La vicuña, en particular, ha sido objeto de manejo en el altiplano, por parte de la CONAF y otras instituciones, durante al menos 30 años, a través del desarrollo de numerosos proyectos apoyados por fondos nacionales e internacionales (Galaz, 2005), además de los diversos convenios internacionales de cooperación técnica, que Chile ha suscrito y que han abarcado distintas áreas del conocimiento de la especie (Tala e Iriarte, 2001 citados por Galaz, 2005). En cuanto al manejo mencionado, es posible diferenciar dos propósitos principales: recuperación y conservación de la población y uso sustentable.

El primero surge debido a una disminución histórica de la población de vicuñas, cuya gestación data aproximadamente de la época de la conquista española, con los respectivos cambios demográficos que esta supuso en el Norte Grande. Las variadas causas de disminución dieron pie a un clímax de descenso poblacional a fines de la década de los 60' (Galaz, 2005). Esta compleja situación determinó que a partir de 1970 la CONAF pusiera en marcha un programa de largo plazo de conservación de la vicuña y ecosistemas altiplánicos, creando como parte de éste el Parque Nacional Lauca en la Provincia de Parinacota, Región de Arica y Parinacota, donde la efectiva protección de la caza furtiva permitió incrementar varias veces la población de 600 animales existente al momento de la creación del área protegida (Glade y Cattán, 1987).

El segundo propósito se enmarca en la idea de generar, una vez incrementada la población, una fuente de ingresos a partir de la fibra de vicuña, en una zona que tiene escasas posibilidades de desarrollo económico como es el altiplano. En este sentido, y como consecuencia de la recuperación poblacional en la década de los 70', en 1993 la CONAF elaboró el "Plan de Desarrollo de las Comunidades Aymarás mediante la utilización sustentable de la vicuña" (CONAF/UICN), documento que contiene las bases para un manejo sustentable de las poblaciones de vicuñas, orientado al mejoramiento de las condiciones de vida de la comunidad aymara (Galaz, 2005). Por otro lado, el desarrollo de esta etapa implicó un ordenamiento del territorio, el que se plasmó en la redelimitación y desafectación del Parque Nacional (PN) Lauca dando lugar, en 1983, a la creación de la Reserva Nacional (RN) Las Vicuñas y el Monumento Natural (MN) Salar de Surire en los terrenos desafectados, con lo cual se amplió el rango de opciones de manejo (CONAF, 1986).

Ciertamente el éxito del programa de recuperación ha sido notorio, sobre todo si se considera que el tamaño poblacional incrementó entre 1975 y 1992, de 2.000 a más de 20.000 animales en la provincia de Parinacota (Bonacic *et al.*, 2002). El mayor tamaño poblacional fue alcanzado en 1990 cuando éste se empinó cercano a las 23.000 vicuñas; a partir de entonces se ha observado una declinación poblacional (Bonacic *et al.*, 2002). Esta recuperación, así como la experiencia obtenida con respecto a la conservación y manejo de la especie dieron pie, el año 2002, al traspaso de las poblaciones de vicuña del altiplano de la actual región de Tarapacá al Apéndice II de CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres), lo que se constituyó como un paso particularmente importante para la gestión del camélido con miras al aprovechamiento de la fibra (Galaz, 2005). En la actualidad, tal como ha sido la tendencia histórica (Galaz, 2005), la población de vicuñas de la provincia de Parinacota es la más

numerosa del país, arrojando estimaciones recientes, año 2007, un total de 14.455 vicuñas para esta zona (CONAF, 2008), lo que constituye sobre el 90% de la población total.

La capacidad de carga (*CC*) es un concepto que ha recibido gran cantidad de definiciones y usos y que ha sido aplicado en distintas escalas (Bannister, 2002). En relación al manejo de praderas, éste puede ser entendido como “la carga animal óptima que puede soportar un pastizal conservando su estado o condición”, la que se diferencia de la carga animal (*CA*), debido a que esta última representa una decisión del productor que puede o no ser acertada de acuerdo a la *CC* del campo (Gastó *et al.*, 1993). La determinación de una correcta *CC* animal constituye la más importante de las decisiones que involucran el manejo del pastoreo desde el punto de vista de la vegetación, del ganado doméstico, de la fauna silvestre y de los retornos económicos (Holechek *et al.*, 2001).

La relevancia de esta medida para el manejo, ha sido patentada por la realización de diversos estudios de *CC* para el sector del altiplano, y parte de la precordillera, de la provincia de Parinacota (Troncoso, 1982; Troncoso, 1983; Castellaro *et al.*, 1998; Castellaro, 2003a; Castellaro, 2003b). Estos estudios han estimado la *CC* de unidades vegetales a través de distintas metodologías cuya base es el contraste entre el aporte de las praderas y los requerimientos nutricionales del camélido. Sin embargo, estos estudios no han considerado la producción anual de materia seca (*MS*) de las praderas, la cual es requisito para su estimación (Castellaro, 2005), o bien la han estimado a través de modelos, pero abarcando superficies pequeñas respecto a la extensión de las praderas de la zona. La falta de mediciones de terreno de la producción de *MS* para praderas altiplánicas del país (Castellaro, 2005; Castellaro, 2007) y de estudios relativos a los requerimientos nutricionales, hábitos alimenticios y composición botánica de la dieta de la vicuña para el altiplano chileno (Castellaro, 2005; Galaz, 2005; Castellaro, 2007), han constituido hasta el presente un obstáculo para la obtención de medidas más precisas.

La protección de la vicuña, si bien los buenos resultados en cuanto a su conservación, ha tenido otras repercusiones principalmente en la zona de mayor concentración de la especie. Así, Galaz (2005) señala efectos negativos en el sistema productivo de las comunidades andinas de Putre, General Lagos y Colchane, comunas incluidas dentro de las más pobres del país, derivados entre otros, de la degradación de las praderas producto del incremento de la *CA*. Ahumada y Faúndez (2001), por su parte, dan cuenta de una sobreutilización aparente de las praderas del PN Lauca, producto del incremento de la *CA*. Además de lo mencionado, la vegetación altiplánica, en particular los bofedales, acusa presiones derivadas no sólo de la actividad ganadera o de la fauna silvestre, sino también de la extracción de agua para la minería y para las grandes ciudades costeras (Ahumada y Faúndez, 2001; Galaz, 1998, citado por Bonacic *et al.*, 2002).

En vista de lo anterior, la presente memoria tiene como objetivo estimar la *CC* promedio anual de las praderas altiplánicas de la provincia de Parinacota, sujetas a manejo de la vicuña, en base al método descrito por Castellaro (2007), el que ha sido aplicado en módulos de manejo de vicuña del sector. Respecto a estudios anteriores destaca, en el presente, la incorporación de un modelo de simulación de producción de *MS* anual para una

basta extensión de praderas de la zona y la consideración de una mayor variabilidad espacial de los términos que determinan la *CC*, aspectos que se ven favorecidos por el uso herramientas de percepción remota y el desarrollo del estudio en el marco de sistemas de información geográfica (SIG).

Capacidad de Carga: aproximación a la metodología de estimación

A continuación se enseñan aspectos generales de la metodología propuesta por Castellaro (2007), dada su reciente publicación, y los mecanismos para abordarla en el presente estudio.

De acuerdo a la metodología indicada, la *CC* por unidad de superficie puede ser estimada como el cociente entre el aporte energético anual que provee una pradera y los requerimientos de una vicuña para el mismo periodo, cociente que es modificado por factores que ayudan a precisar el forraje que puede ser aprovechado por el ganado.

Para determinar la energía que una pradera puede producir en un año es necesario conocer en primer lugar la producción de MS anual. La producción de MS en un periodo determinado o productividad primaria neta, puede ser entendida como “la tasa de almacenamiento de materia orgánica en los tejidos vegetales, que excede la respiración vegetal durante el periodo de medición” (Odum y Warret, 2006). Dada su aparente similitud, es preciso hacer la distinción entre biomasa o cosecha en pie y productividad primaria neta. La primera hace referencia a la cantidad total de materia orgánica por unidad de área en un momento dado, mientras que la segunda corresponde a la tasa de producción por unidad de área en un momento dado (Odum y Warret, 2006).

Según la metodología a utilizar, la producción anual de MS puede ser estimada en función de la producción potencial de MS de la pradera y factores derivados de variables climáticas medias que la modifican. La fracción de producción de MS de especies consumidas por el ganado, junto con la concentración de la energía metabolizable promedio de las mismas, permite estimar la energía anual de la pradera por unidad de superficie, para ser posteriormente contrastada con los requerimientos anuales de una vicuña estándar o unidad vicuña. Sin embargo, de la fracción de producción de MS señalada no toda puede ser aprovechada por los animales, por lo cual es preciso considerar otros factores que la modifican y, consecuentemente, modifican la *CC* de la pradera.

Dentro de los factores mencionados se tienen, en primer lugar aquellos relacionados con el costo ecológico de cosecha. De acuerdo a Juanicotena (1999, citado por Arenas, 2008), el costo ecológico de cosecha es “la energía invertida por el cosechador en el proceso de cosecha, incluyendo la totalidad de los gastos que directa o indirectamente debe invertir el animal en el proceso”. Este puede diferir entre las distintas especies y clases de animal y, para un mismo animal, según las características del ambiente en que esté cosechando (Troncoso, 1983). De esta manera, praderas con una misma energía metabolizable por

unidad de superficie pueden tener un distinto costo ecológico de cosecha según las características del lugar en que se ubiquen. Acorde con lo anterior, los factores contemplados a este respecto corrigen la *CC* de acuerdo a la pendiente del terreno, la distancia a fuentes de agua de bebida y la preferencia de la vicuña por ciertos tipos de pradera.

En segundo lugar se encuentra el factor que modifica la *CC* de acuerdo a su uso apropiado, el que a su vez depende de la condición de la pradera. La condición puede ser entendida como “la productividad del tejido vegetal útil en un momento determinado, en relación a la productividad potencial del sitio” (Gastó *et al.*, 1993), es decir, para evaluar la condición se está midiendo cuán alejado se encuentra el pastizal, en el momento de estudio, con respecto a su máximo nivel de desarrollo (FAO, 1996). De acuerdo al método de Huss (FAO, 1996) es posible establecer clases de condiciones de praderas basadas en la composición relativa de especies “deseables”, “menos deseables” e “indeseables”, lo que implica clasificar las especies de la unidad vegetal dentro de las categorías señaladas, donde:

- Especies deseables: son aquellas plantas generalmente perennes, muy palatables y que se encuentran en campos bien manejados o zonas protegidas del pastoreo.
- Especies menos deseables: son aquellas plantas de importancia secundaria en campos de buena condición. Aumentan con el descanso o el rezago de la pradera y tienen una mayor habilidad para resistir los efectos del sobrepastoreo, por lo cual reemplazan a las especies deseables cuando la condición del campo desmejora.
- Especies indeseables: son aquellas plantas que no son pastoreadas aun en condiciones de pastoreo excesivo. Tienden a dominar en las praderas sobrepastoreadas y son generalmente plantas invasoras, tóxicas, duras y espinosas.

De esta manera, praderas con dominancia de especies deseables se encontrarán en un alto nivel de desarrollo, y por tanto presentarán una condición excelente; situación contraria es aplicable a praderas con dominancia de especies indeseables (FAO, 1996). El factor de uso apropiado, por su parte, busca el aprovechamiento de las praderas de modo que el pastoreo sea una herramienta para mejorar su estado productivo, a través de brindar a las especies deseables una adecuada oportunidad para que crezcan y se propaguen (Arenas, 2008), lo que opera a través de devaluaciones crecientes de *CC* en la medida que la condición de las praderas disminuye.

En vista de lo anterior, se observa que distintos aspectos de la metodología se basan en la clasificación o atributos de las especies de las unidades vegetales, lo que implica conocer la composición botánica de las mismas. Puesto que este estudio no considera labores de terreno, esta será considerada, como primera aproximación, a partir de la información provista por trabajos realizados en la zona.

Como se señaló más arriba, la producción anual de MS es función de variables climáticas, las cuales serán abordadas a partir de la generación y espacialización de modelos topoclimáticos. De acuerdo a K. Knoch (Peña, 1975, citado por Romero y Vinagre, 1985), el análisis topoclimático o topoclimatología puede ser definido(a) como una “climatología de terreno”, la que supone la delimitación de un área y una escala de representación que permita establecer relaciones entre los atributos de masas de aire: temperatura, humedad, velocidad y dirección, con los principales componentes del relieve característico de una cuenca (altura, exposición, pendiente, localización y cubierta vegetal). En el caso de Chile, es preciso señalar la utilidad que tiene el explorar variantes metodológicas que complementen la reducida base de datos disponible (Romero y Vinagre, 1985).

De acuerdo a Goodale *et al.* (1998), si bien existen una serie de métodos para generar mapas a partir de datos puntuales, ecuaciones de regresiones simples, que relacionan el clima con su ubicación dentro de una grilla y su altura, pueden resumir parte importante de la variación espacial de datos climatológicos. Estudios que han estimado y espacializado la distribución de variables climáticas hídricas y térmicas, mensuales y/o anuales, a partir de datos puntuales, en función de variables fisiográficas, han observado resultados satisfactorios, especialmente dentro de los rangos de validez de los modelos, en la zona norte (Canessa, 2006), centro (Romero y Vinagre, 1985) y sur del país (Díaz, 2006), en escalas 1:100.000 e inferiores; y en otros países (Goodale *et al.*, 1998). Respecto a la estimación del comportamiento espacial de variables energéticas (radiación solar mensual, anual, entre otras), debido a escasez de estaciones meteorológicas, algunos estudios han utilizado aproximaciones basadas en el uso de modelos empíricos generados a partir de mediciones más frecuentes realizadas por estaciones, como las horas de sol por día (Goodale *et al.*, 1998), o bien han considerado el uso de modelos más complejos de carácter mecanístico (Canessa, 2006); lo que no ha quitado que algunas variables utilizadas hayan sido explicadas en función de la fisiografía.

Sin duda, dentro los elementos más importantes a la hora de producir resultados con variabilidad espacial en el presente estudio, se encuentra el uso de algunos términos (altitud, pendiente, etc.) a modo de modelos digitales de terreno (MDT), el uso de imágenes satelitales a través de técnicas de teledetección¹ y el desarrollo del estudio en el marco de los SIG. Los MDT pueden ser entendidos como “una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”, para los cuales existe una serie de estructuras para el almacenamiento de datos (Felicísimo, 1994). La teledetección, contemplada para la delimitación de unidades y la estimación de índices de vegetación para el cálculo de diferentes términos de la metodología, es la técnica que permite la obtención de información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Chuvienco, 2002); en particular para este estudio, se entienden los instrumentos como aquellos montados sobre plataformas espaciales.

¹ También conocida como percepción remota o “remote sensing”.

Los SIG, por su parte, pueden ser definidos como un “un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (NCGIA, 1990, citada por Escobar, s.a.). Éstos tienen la capacidad de gestionar los dos elementos que conforman los datos geográficos: la observación o entidad, referida a la localización y el atributo o variable, referido a las características asociadas a cada entidad (Escobar, s.a.).

Dentro de los SIG existen dos formas de representación de los datos: la vectorial, en la cual las unidades básicas de información geográfica son los puntos, líneas y polígonos; y la raster, en la cual la superficie a representar se divide en filas y columnas formando una malla o rejilla regular, donde cada celda o píxel guarda tanto las coordenadas de localización como el valor temático (Escobar, s.a.). De acuerdo a la revisión realizada por Felicísimo (1994), la estructura de datos en formato raster se adapta mejor para la representación espacial de variables continuas, además de tener gran afinidad con el tratamiento digital de imágenes, cuya estructura de datos es muy similar (Chuvieco, 2002).

Según Chuvieco (2002), los SIG se constituyen como elementos protagonistas del análisis espacial, al integrar información geográfica sea cual sea su procedencia. En este sentido, tanto la teledetección como el desarrollo de MDT, pueden considerarse como una aportación a los SIG, puesto que ambos permiten la entrada de nueva información a trabajos o estudios con componentes geográficos (Felicísimo, 1994; Chuvieco, 2002). Asimismo, los SIG también han supuesto un apoyo importante para el tratamiento de los MDT, y el análisis de imágenes satelitales (Felicísimo, 1994; Chuvieco, 2002).

Finalmente, cabe mencionar que si bien los SIG poseen muchas potencialidades, éstos son herramientas para la mejor gestión de la información disponible sobre el territorio, es decir, no pueden por sí solos generarla (Chuvieco, 2002). De ahí la relevancia de contar con información de buena calidad, y no sólo de soportes físicos o lógicos poderosos, para la resolución de problemas.

Objetivos

Objetivo General

Determinar la capacidad de carga de las diferentes asociaciones vegetales con aptitud pastoral destinadas al manejo de vicuña (*Vicugna vicugna* Mol.), en una zona del altiplano y la precordillera de la Provincia de Parinacota, Región de Arica y Parinacota.

Objetivos Específicos

- Generar y cartografiar modelos topoclimáticos que describan la variación espacial de la pluviometría, la radiación solar y la temperatura.
- Generar una cartografía de las asociaciones vegetales del área de estudio y una base de datos de las mismas que sintetice la información disponible.
- Implementar un modelo de simulación, bajo un sistema de información geográfica, que estime la productividad primaria de las diferentes asociaciones vegetales del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Ubicación

El área de estudio, Figura 1, corresponde a la misma utilizada en el trabajo de Hernández (1980). Esta zona se encuentra en el altiplano, y en menor proporción en la precordillera, de la provincia de Parinacota, región de Arica y Parinacota, aproximadamente entre los 17°45' y 19°00' latitud sur y los 69°00' y 69°45' longitud oeste, abarcando gran parte de la comuna de Putre. El área presenta altitudes variables, sobrepasando la mayor parte los 3.000 metros sobre el nivel del mar (msnm), con valores máximos en torno a los 6.000 msnm (estimado a partir de modelo digital de elevaciones, DEM).

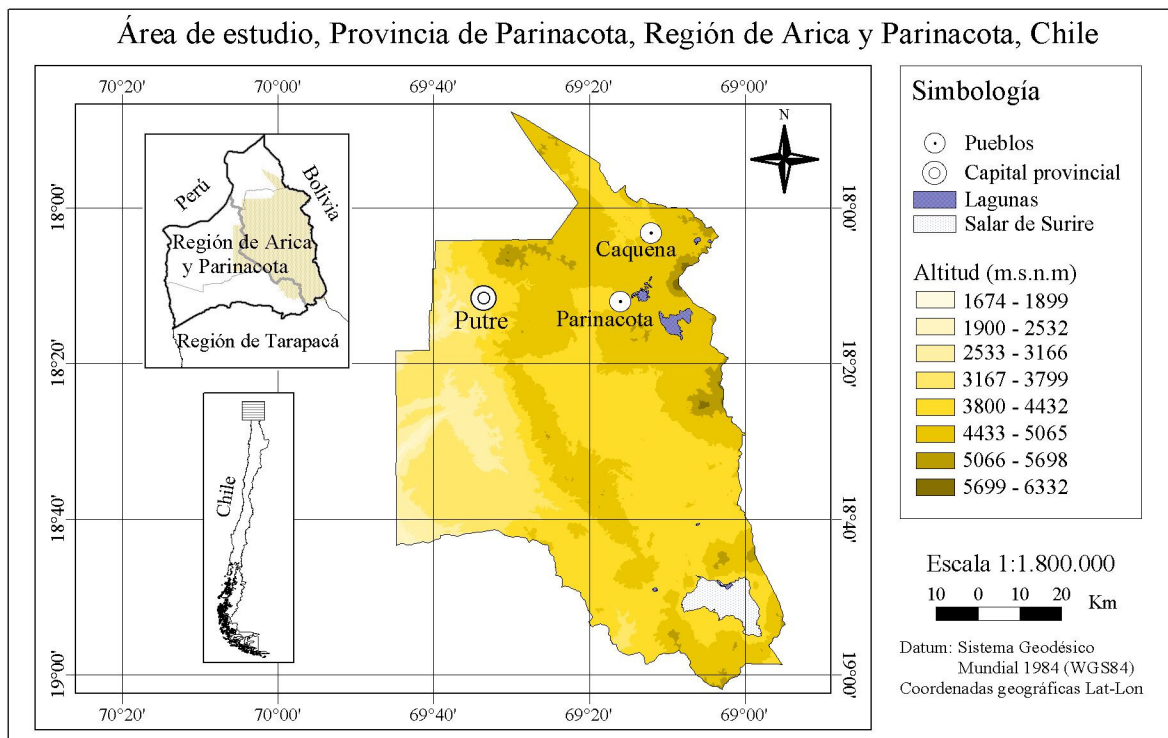


Figura 1. Área de estudio. Provincia de Parinacota. Región de Arica y Parinacota.

Características Generales

El área de estudio corresponde administrativamente a los límites del PN Lauca (520.000 ha) y una zona aledaña correspondiente principalmente a precordillera, antes del DS (Decreto

Supremo) N° 29 de 1983 bajo el cual, como se sugirió en la Introducción, se fijaron nuevos límites al PN, se desafectaron terrenos y se crearon dos nuevas áreas silvestres protegidas: la RN Las Vicuñas y el MN Salar Surire (CONAF, 1986). De esta manera, en la actualidad el área de estudio comprende estas tres áreas silvestres protegidas además de sectores aledaños hacia la precordillera y hacia el norte (sector de Caquena), observando una superficie aproximada de 674.000 ha. Cabe mencionar que estas tres áreas silvestres protegidas, dadas sus particulares características, han recibido reconocimiento internacional, conformando la llamada Reserva de la Biósfera Lauca desde 1983 (CONAF, 1986).

En cuanto al clima de la zona, las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá se encuentran sometidas a la influencia permanente del anticiclón del Pacífico sur oriental (PSO), lo que genera una gran estabilidad atmosférica. Precisamente el encuentro entre las masas de aire descendentes del anticiclón, con la superficie relativamente fría del océano, acentuada por la corriente de Humboldt y las áreas de surgencia de agua fría, genera una inversión térmica con límite ubicado entre los 800 – 900 msnm. Esta inversión, expresada en un enfriamiento de la capa superficial de la atmósfera, genera nubosidad tipo estratocúmulos entre los 800 – 1200 msnm, la que penetra algunos kilómetros hacia el continente de acuerdo a un ciclo diario de avance retroceso. También debido a la inversión, unido al brusco enfriamiento nocturno, se generan neblinas o camanchacas que penetran el continente hasta los 900 – 1.000 msnm (CORFO, 1982).

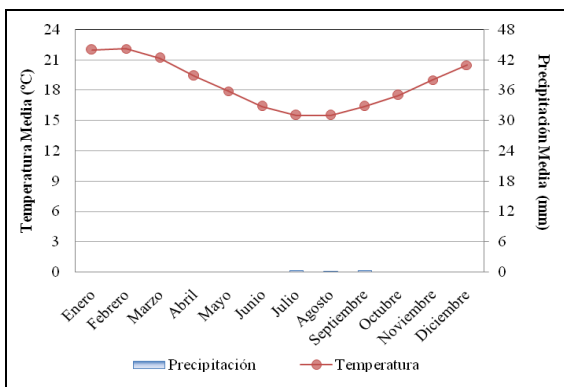
En la precordillera y el altiplano, en tanto, el efecto del anticiclón se atenúa permitiendo incursiones estivales de masas de aire tropical portadoras de nubes y precipitaciones, las que a su vez disminuyen en la medida que las masas de aire descargan su humedad en el altiplano. Esto, unido al descenso obligado de estas masas por las laderas precordilleranas, produce un calentamiento de las mismas, el que va secando el aire a niveles inferiores a 20 – 30% de humedad relativa en el límite pampa-cordillera. Así, por lo expresado y por la presencia de la inversión térmica en la zona litoral, que limita la penetración de nubosidad al interior de las regiones se generan, al centro de éstas, condiciones de sequedad y transparencia atmosférica lo que, ligado a la relativa verticalidad de los rayos, produce una intensa radiación solar (CORFO, 1982).

El régimen térmico del litoral se caracteriza por una oscilación diaria que no sobrepasa los 10 °C, por una temperatura del mes más fría superior a 10°C y máximas que rara vez sobrepasan los 28 °C. Hacia la pampa las temperaturas medias no se modifican de forma notoria, siendo el incremento de la oscilación diaria lo que hace la diferencia. Este sector no es homogéneo, presentando al sur de la región de Tarapacá una zona más cálida, similar al litoral, en la cual se origina un sector de oasis (Pica, Esmeralda, Mantilla). Con el incremento de altura, las temperaturas medias comienzan a descender, manteniéndose en el altiplano bajo los 6 °C durante todo el año, siendo negativas durante varios meses. El régimen hídrico de las regiones mencionadas se caracteriza por presentar, tanto en la pampa como el litoral, precipitaciones anuales inferiores a 5 mm, sin un patrón de distribución bien definido. Con esto se genera un gran déficit hídrico que sólo permite la existencia de vegetación en sectores que cuentan con características particulares de humedad. A medida

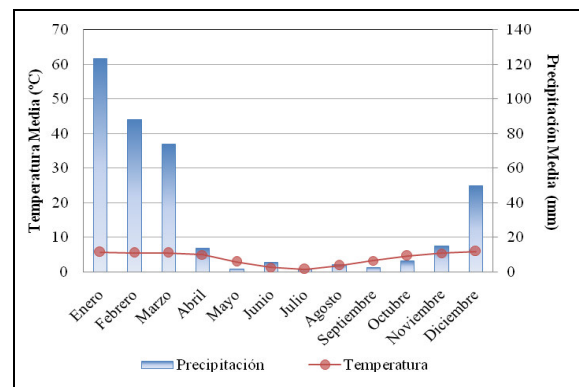
que se asciende la precipitación incrementa desde 10 mm en el límite de la pampa con la precordillera hasta magnitudes superiores a los 200 mm en el altiplano, caracterizándose por un régimen estival. Este incremento de precipitación reduce el déficit hídrico, lo que permite el crecimiento de vegetación resistente a la sequía. Finalmente, el régimen radiativo se caracteriza por una fuerte radiación solar en la depresión intermedia, por influencia anticiclónica, con montos más atenuados en el litoral y la cordillera debido a la alta frecuencia de nubes y a la nubosidad estival, respectivamente. Montos promedios anuales para el litoral se encuentran entre $380 - 430 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$; $500 - 550 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para la pampa y valores levemente bajo las $500 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$, para la precordillera y el altiplano (CORFO, 1982).

La Figura 2 muestra dos climogramas en los cuales es posible apreciar parte de las características climáticas descritas, para dos zonas geomorfológicas contrastantes de las regiones. El área de estudio, en particular, corresponde mayormente a las características de la Figura 2b.

(a) Climograma estación Arica
 Latitud: $-18,5^\circ$ /Longitud: $-70,3^\circ$ ^{1/}
 Altitud: 100 msnm



(b) Climograma estación Chungará Ajata
 Latitud: $-18,2^\circ$ /Longitud: $-69,2^\circ$ ^{1/}
 Altitud: 4570 msnm



^{1/} Datum WGS84, coordenadas geográficas Latitud/Longitud.

Figura 2. Climogramas de estaciones meteorológicas representativas de (a) zona litoral y (b) altiplano, de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. Fuente: Elaboración propia con recursos de Oficina Meteorológica de Chile (1965-1967), CORFO (1982) y DGA (citada por Castellaro, 2003a).

Respecto a la vegetación, el área de estudio se sitúa mayoritariamente en los ecosistemas clasificados por Ahumada y Faúndez (2001) como praderas altiplánicas. Estas corresponden a sistemas vegetacionales de distribución zonal que se ubican entre los 3.500 y los 4.500 msnm, se distribuyen entre la región de Arica y Parinacota y la parte norte de la región de Atacama e incluyen los terrenos de pastoreo ubicados en la precordillera andina, los que responden a una fisonomía de matorral. Se establecen en un ambiente fuertemente restrictivo en cuanto a condiciones climáticas, lo que determina un corto período de crecimiento.

Dos tipos de praderas conforman mayoritariamente este tipo de vegetación: pajonales y tolares, las que también se establecen como comunidades mixtas de tolar-pajonal (CORFO, 1982; Ahumada y Faúndez, 2001). Los pajonales corresponden a una fisonomía en la que dominan, homogénea o heterogéneamente, formaciones de pastos en “champas” o “manojos” (gramíneas o poáceas), hemicriptófitos, con hojas rígidas y más o menos punzantes y que, en asociaciones florísticas más o menos puras, dominan extensas áreas principalmente de pendientes suaves y regulares, en donde los suelos son secos, arenosos, con escasa participación rocosa y se ubican en posiciones más o menos áridas. Características de esta zona son las especies del género *Festuca*, *Stipa* y *Deyeuxia*. Los tolares constituyen formaciones arbustivas ubicadas en sectores con balance hídrico y térmico más favorable, fondos de valles y orillas de vegetación tipo bofedal y presentan escaso desarrollo de estratas herbáceas utilizables como forraje, el cual se encuentra determinado por especies provenientes de formaciones vecinas. Características en la composición botánica del tolar son especies del género *Parastrephia*, *Baccharis* y *Fabiana*.

En la zona existen además humedales, pradera azonal, comúnmente señalados como bofedales. Éstos crecen entre los 4.000 y 4.500 msnm y se constituyen como la formación natural de mayor importancia ganadera, no obstante ocupar una superficie geográfica considerablemente menor que las anteriores. Los bofedales componen una formación herbácea, en que destacan especies de los géneros *Oxychloe*, *Werneria*, *Deyeuxia* y *Carex*, que crece principalmente en fondos de valles o quebradas y, secundariamente, en depresiones de laderas de poca pendiente, ocupando suelos de turba alcalina, profundos, hidromórficos, generalmente sobresaturados y con escurrimientos subsuperficiales o superficiales permanentes (Troncoso, 1982; CORFO, 1982). Presentan cierto grado de variabilidad que responde en gran medida a la altitud en que se encuentran, a los tipos de suministro hídrico y a la calidad (salinidad) de las fuentes de agua (CORFO, 1982; Troncoso, 1982; Ahumada y Faúndez, 2001).

De bajo interés pratense, no así ecológico, y con menor significación en la fisonomía de las praderas altiplánicas, es posible mencionar al Queñoal y al Llaretal (CORFO, 1982; Ahumada y Faúndez, 2001). El Queñoal, formación arborescente con participación en diferentes grados de especies del género *Polylepis* se ubica en ambientes con sustratos arenosos con bloques rocosos en superficie y en laderas de diferentes exposiciones y pendientes. El Llaretal, por su parte, asociado a Queñoales o puros, se ubica aproximadamente a partir de los 4.000 msnm, en situaciones rocosas, con sustratos edáficos variables, generalmente en posiciones fisiográficas expuestas a insolación directa, caracterizándose por la presencia de *Azorella compacta* (Llaretal). El Queñoal destaca por ser la única unidad arbórea natural capaz de crecer a más de 4.000 msnm; su uso principal ha consistido en la producción de combustible y en la elaboración de objetos artesanales (CORFO, 1982).

La totalidad del área de estudio ha sido caracterizada con mayor detalle por Hernández (1980) y Troncoso (1982), en base a grandes unidades cartográficas, definidas como asociaciones vegetales. Estos trabajos constituyen la base de información de vegetación

para la presente memoria, dada la buena representación del área de estudio que proveen (Castellaro, 2007)².

En la Figura 3 es posible observar algunas imágenes de la vegetación reseñada.

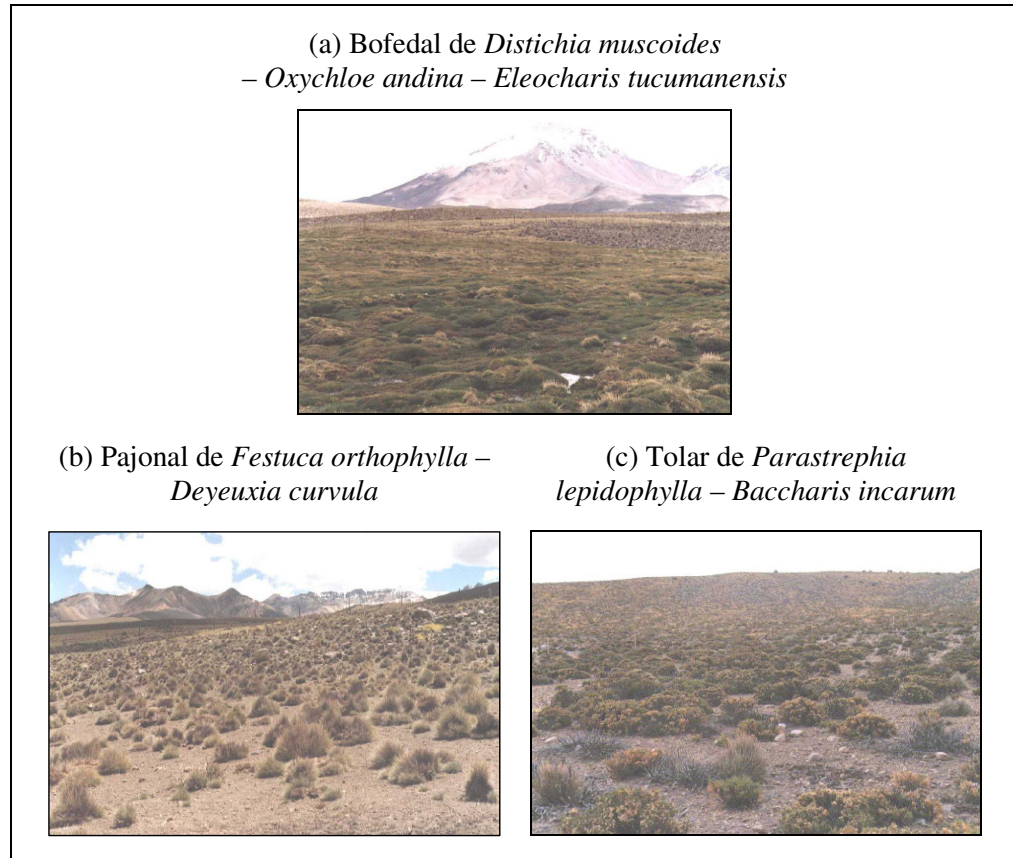


Figura 3. Praderas de (a) bofedal, (b) pajonal y (c) tolar, observadas el año 2002, en sector del altiplano de la Provincia de Parinacota, Región de Arica y Parinacota. Fuente: Castellaro (2003a).

Materiales

Para la realización de este trabajo de memoria los principales materiales fueron:

1) Modelo digital de elevación (DEM) de la Región de Arica y Parinacota y de Tarapacá: Se utilizó la versión 4 del DEM generado y distribuido por el “CGIAR Consortium for Spatial Information” (CGIAR-CSI). Los datos de altitud de este modelo, son el resultado del procesamiento del DEM del “Shuttle Radar Topographic Mission” (SRTM), producido

² Giorgio Castellaro G., Ingeniero Agrónomo, M. Sc., Universidad de Chile, Dpto. de Producción Animal, 2007 (comunicación personal).

originalmente por la NASA, para completar aquellas zonas carentes de información. El DEM presenta una resolución espacial de 90 m (pixel con lado equivalente a 90 m), se encuentra en Datum Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84), coordenadas geográficas latitud/longitud y fue descargado del sitio web del CGIAR-CSI.

2) Datos de pluviometría, radiación solar y temperatura media mensual y anual de estaciones meteorológicas de las regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá, y zonas adyacentes, donde las fuentes fueron:

- “Análisis de los ecosistemas de la I Región de Chile” (CORFO, 1982): documento que presenta una serie de estudios relativos a ecosistemas de la ex I Región (actuales regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá). El capítulo “Zonificación de los Recursos Climáticos de la I Región” posee, entre otros, información de precipitación y radiación solar media mensual, y temperaturas medias, mínimas y máximas para una serie de estaciones de las regiones mencionadas. Carece de información relativa a los periodos considerados para los valores promedio de precipitación y radiación solar.
- “Evaluación de las praderas de los terrenos destinados al manejo en cautiverio de vicuñas” (Castellaro, 2003a): informe de Consultoría que contiene información de precipitación promedio mensual de la Dirección General de Aguas (DGA), para las regiones de Arica y Parinacota, y de Tarapacá; y de temperaturas promedios mensuales para el altiplano de dichas regiones. Los períodos de observaciones considerados son variables, siendo para todos los casos iguales o superiores a 15 años.
- “Balance Hídrico de Chile” (DGA, 1987): estudio que presenta, entre otras variables, datos de temperatura y precipitación promedios, anual y mensual, para estaciones climatológicas del país pertenecientes a distintos organismos (DGA, Dirección Meteorológica de Chile (DMCH), ENDESA y Servicio Agrícola Ganadero (SAG)). Para las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, en particular, presenta datos de precipitación para un período de 20 años: desde 1961 a 1980. Los datos de temperatura presentan periodos variables.
- “Pluviometría de Chile” (Oficina Meteorológica de Chile, 1965-1967): documento compuesto por tres fascículos, de los cuales se utilizaron el I y el III. El I presenta la pluviometría promedio mensual y anual para una selección de 137 estaciones que presentan la mayor cantidad y calidad de información (una o más treintenas de observaciones), desde Arica a Cabo San Isidro. El III presenta los totales mensuales de agua caída para 349 estaciones que no aparecen el primer fascículo y cuyos periodos son menores a 30 años.
- “Información climatológica de estaciones chilenas” (Aceituno *et al.*, s.a.): sitio web que presenta información de valores medios anuales y mensuales de temperaturas y

precipitaciones para estaciones chilenas seleccionadas. No da cuenta de los periodos de las observaciones de las variables.

- “Datos agroclimatológicos para América Latina y el Caribe” (FAO, 1985): Documento que presenta información climatológica variada para países ubicados en la región mencionada en el título. Entre la información climatológica de interés para este trabajo se encuentra la precipitación, la temperatura y la radiación solar media mensual. Si bien carece de los periodos de observación para la generación de las variables medias, se señala en el documento que la información corresponde por lo general a periodos de 30 años para precipitación y de 10 años para temperatura.
- “Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile” (CNR-CIREN, 1997): Estudio que presenta información climatológica variada para estaciones del país. Algunas poseen la cantidad de años considerados para los promedios mensuales. Otras variables corresponden a estimaciones generadas en el estudio (p. ej. radiación solar).
- Nómina de estaciones meteorológicas I y II Región (DGA, 2007): Documento que posee las ubicaciones, altitudes, vigencia y tipo de estaciones pertenecientes a la DGA.

3) Cartas de precipitación de las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá: Se utilizaron cartas en dos formatos:

- Cartografía vectorial, isoyetas anuales, proveniente de diferentes estudios.
- Superficies raster de precipitación media mensual y anual desarrolladas por Hijmans *et al.* (2005), en base a modelos que consideraron estaciones de gran parte del planeta. Las superficies poseen una resolución espacial aproximada de 1 km, se encuentran en Datum WGS84 y coordenadas geográficas latitud/longitud. Fueron descargadas del sitio web Worldclim.

4) Imágenes satelitales:

- Imágenes LANDSAT 5 TM (“Thematic Mapper”) del área de estudio, correspondientes a meses estivales de 2008, resolución espacial de 30 m, nubosidad igual o inferior a 10% en los cuatro cuadrantes que conformaron cada imagen, con corrección radiométrica. Estas imágenes fueron descargadas del sitio web del “Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais” (INPE) de Brasil y correspondieron a los siguientes Path/Row: 001/073 (01-02-2008), 002/073 (08-02-2008), 002/072 (22-11-2008).

- Imágenes de Google Earth: imágenes de resolución variable (mayor que la anteriormente señalada, para el área de estudio), con antigüedad de uno a tres años. Se encuentran en Datum WGS84 y coordenadas geográficas latitud/longitud.

5) Asociaciones vegetales del área de estudio: Se utilizó la carta analógica, escala 1:250.000, desarrollada por Hernández (1980) y actualizada por Troncoso (1982). Se utilizaron además una serie de estudios, incluyendo los mencionados, para la caracterización de las especies de las asociaciones (Lailhacar, 1990; Castellaro, 2003a y b; entre otros).

6) Programas computacionales y equipos: Para la presente memoria se utilizaron los siguientes programas:

- Idrisi®, versión 14.0 (Kilimanjaro)
- Arcview GIS®, versión 3.2
- CoordTrans®, versión 2.3 (versión gratuita)
- Google Earth®, versión 5.0.1 (versión gratuita)
- Microsoft Office® (Word y Excel)
- Microsoft Visual Basic®, versión 6.3
- Statgraphics Plus®, versión 5.1

El equipo utilizado fue un computador personal, CPU 2.40 GHz, 760 MB de RAM.

Métodos

Resolución utilizada

La unidad más pequeña de información que se debe incluir en un mapa temático, frecuentemente, recibe el nombre de mínima unidad cartografiada (MUC), y se encuentra condicionada por la escala de trabajo. La MUC, a diferencia del mínimo objeto que puede observarse en una imagen, debe ser de mayor tamaño pues de lo contrario existe el riesgo de aumentar el error considerablemente (Chuvieco, 2002).

A este respecto resulta pertinente distinguir entre dos conceptos: identificación y detección. El primero hace referencia al reconocimiento de las características de un determinado objeto, mientras que el segundo sólo implica determinar su existencia. En este sentido es claro que la primera labor requiere mayor resolución que la segunda, puesto que sólo será reconocible algo con tamaño muy superior al del píxel (al menos cinco veces), mientras que puede ser incluso inferior al tamaño del píxel para ser detectado (Chuvieco, 2002).

Dado que en el presente trabajo se contempla la caracterización de asociaciones vegetales en base a la carta de Hernández (1980), se determinó que era preciso poder identificar la

asociación de menor superficie de esta carta (MUC) la que, posterior a su digitalización y actualización mediante imágenes satelitales³, se estimó en 25 ha.

De esta manera, debido a lo mencionado en el párrafo anterior y tomando en cuenta la resolución espacial del DEM, material que constituye la base digital raster de este estudio, se optó por una resolución de 90 m para el trabajo. Esta resolución permite que la MUC sea más de cinco veces superior al tamaño del pixel, lo que facilita la caracterización de las unidades vegetales.

Si bien el presente estudio considera el uso de materiales cartográficos en diferentes escalas, dentro de los principales, distribución espacial de estaciones meteorológicas correspondiente a una escala variable pero gruesa, carta de asociaciones vegetales en escala 1:250.000 y DEM con resolución espacial de 90 m, correspondiente a su vez a una escala 1:100.000 (Díaz, 2006), se estima que, dada su importancia en la metodología para la estimación de *CC*, la escala del estudio correspondería a aquella señalada para la carta de asociaciones vegetales, es decir, se encontraría en torno a 1:250.000.

Finalmente es preciso mencionar que, teniendo como base el DEM, el sistema de referencia utilizado para el trabajo fue el Datum WGS84, con coordenadas geográficas latitud/longitud.

Objetivo Específico 1

Generación de base de datos climáticos y modelos digitales de terreno. Esta etapa consistió básicamente en la recopilación, selección, homogenización y organización de información de temperatura, precipitación y radiación solar media mensual de estaciones meteorológicas pertenecientes a la región de Arica y Parinacota, de Tarapacá y zonas aledañas. Se incluyó también dentro de esta etapa la generación de MDT's que conformaron las variables independientes de los modelos topoclimáticos.

Para la recopilación de datos climáticos medios se utilizaron las fuentes mencionadas en los Materiales, siendo la base de esta tarea los trabajos de CORFO (1982) y de Castellaro (2003a), principalmente en lo relativo a datos térmicos e hídricos, constituyéndose el resto de las fuentes como material complementario.

Las estaciones, además de los datos climáticos, poseen información adicional que permite su contextualización geográfica y temporal (ubicación en un sistema de referencia, altitud, periodo de registro para la generación de la variable media y, de tratarse de una fuente secundaria, la fuente original). En particular, la localización de las estaciones en un mismo

³ Si bien la digitalización y verificación de la cartografía de Hernández (1980) fue un paso previo de relevancia para el establecimiento de la resolución, para efectos de la organización de este trabajo, dicho proceso se detalla en la metodología correspondiente al segundo objetivo específico.

sistema de referencia reviste especial relevancia para el ajuste de modelos topoclimáticos. Dado que muchas estaciones carecen de la totalidad de la información mencionada, y son espacializadas utilizando distintos datos geodésicos, proyecciones y husos, fue preciso llevar a cabo, además de un proceso de selección, una homogenización de las referencias geográficas de las estaciones al sistema de referencia del presente estudio.

La selección de estaciones se llevó a cabo en base a la coherencia en la ubicación geográfica y a la extensión, si es que la poseían, de los registros considerados para la determinación del valor medio de la variable climática. Para verificar el primer criterio, las estaciones fueron espacializadas considerando las coordenadas de origen, sobre cartografía con sistema de referencia conocido. Estaciones coherentes con hitos (red de drenaje, altitud, asentamientos humanos), o con diferencias menores, fueron seleccionadas, traspasando su referencia a la referencia del estudio. Estaciones contempladas en la Nómina de estaciones (DGA, 2007), situadas dentro del periodo de vigencia establecido en el documento, fueron referenciadas de acuerdo al mismo, traspasando luego dicha información a la referencia del estudio. Estaciones con diferencias menores, pero necesarias de corregir (p. ej. desplazamientos hacia el mar de estaciones costeras) fueron corregidas; no así estaciones que presentaron diferencias considerables y dificultad de contraste con hitos mencionados, las cuales fueron descartadas. Respecto al periodo de registro, se seleccionaron aquellas estaciones que, de presentarlo, ostentaron el periodo más extenso. Si bien la recomendación estándar es que, para comprender las variaciones temporales regulares, es preciso contar con estaciones que registren un periodo relativamente largo, entre 10 y 30 años (Romero y Vinagre, 1985), en este caso se utilizaron estaciones que presentaron menos años para evitar dejar sin representación algunas zonas.

También relativo a la selección, y en base a ajustes preliminares de los modelos topoclimáticos, fueron excluidas del estudio estaciones que arrojaron diferencias notorias respecto al comportamiento esperado, en base a estaciones cercanas y cuyo comportamiento no pudo ser verificado más allá de los datos señalados por la fuente.

De esta manera, una vez escogidas las estaciones y homogeneizadas las referencias, se procedió a su organización a modo de una base de datos, la cual quedó constituida por la siguiente información:

- Nombre de la estación.
- Ubicación y altitud.
- Valores promedio mensual y anual de la variable climatológica.
- Periodo considerado.
- Fuente.

Los MDT's, generados en base al DEM fueron los siguientes: latitud (LAT), longitud (LON), ambos en grados sexagesimales; distancia al litoral (DL) y distancia a cuerpos de

agua y salares (DCA), en kilómetros. De los dos últimos MDT's se extrajeron los valores respectivos para cada estación los cuales fueron añadidos a la base de datos.

Para la visualización y espacialización de estaciones meteorológicas fue utilizado el programa Arcview®. El programa CoordTrans® fue utilizado para los cambios de sistemas de referencias y, para la generación de MDT's y extracción de valores de los mismos, fue utilizado el programa Idrisi®.

Ajuste y espacialización de modelos topoclimáticos. La generación de mapas de temperatura, precipitación y radiación solar media mensual se realizó para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá y se basó en la construcción de ecuaciones topoclimáticas mediante relaciones multivariadas, capaces de describir la variación espacial del parámetro durante una unidad de tiempo determinada.

De esta manera, los datos de ubicación y relieve recopilados para las estaciones meteorológicas, a modo de factores lineales, cuadráticos y sus combinaciones, fueron usados para generar regresiones múltiples explicativas de las variables climáticas, en el programa Statgraphics Plus®. La elección del grado de los polinomios que determinaron espacialmente la variable dependiente, se basó en la búsqueda de modelos preferentemente simples y en que fuese posible, al menos en parte, interpretar su configuración (Goodale *et al.*, 1998; Canessa, 2006)⁴. La Ecuación 1 señala la forma genérica para el caso de un modelo de dos variables independientes:

$$Y(x_1, x_2) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde $Y(x_1, x_2)$ representa a una variable climatológica en un periodo de tiempo cualquiera, x_1 y x_2 son variables predictoras fisiográficas que pueden ser latitud, longitud, distancia al litoral, pendiente, entre otras y b coeficientes a determinar.

Para el ajuste de los modelos, y abogando por su sencillez, las variables independientes fueron sometidas a un proceso de selección a través del método de regresión paso a paso o "stepwise regression" provisto por el programa. Para todos los modelos y sus respectivos coeficientes, la bondad de ajuste fue calculada con una significancia estadística del 95% ($P < 0,05$).

La evaluación del ajuste de los modelos se llevó a cabo en base a las estadísticas de las regresiones y al análisis de varianza de los mismos. En los Resultados se presenta un resumen de lo señalado que, además del diagrama de dispersión, considera (Statgraphics Plus 5.1, 1994-2001):

⁴ Cabe señalar que estos modelos corresponden a modelos empíricos los cuales, más que explicar los mecanismos que operan en la realidad, reúnen una serie de relaciones con la finalidad de predecir una respuesta. De ahí que no siempre sea posible una cabal interpretación de los mismos.

- Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}): medida de la proporción de variabilidad de “y”, que es explicada por el modelo. El valor fluctúa entre 0 – 100. En particular, el coeficiente ajustado, es adecuado para la comparación de modelos con diferente número de variables independientes.
- Error estándar (ES) de la estimación: medida de la cuantía del error en el pronóstico de un valor de “y” para un valor individual de “x”. Explica la desviación estándar de los residuales.

Para la espacialización de los modelos ajustados, las ecuaciones explicativas de las variables climáticas fueron calculadas en el programa Idrisi®, utilizando los MDT's de las variables fisiográficas como variables independientes, con lo que se obtuvo una serie de superficies raster climáticas en la misma resolución y sistema de referencia del DEM.

Finalmente, se llevó a cabo una inspección visual de las cartas topoclimáticas para verificar su adecuación respecto a tendencias señaladas para la zona, lo que incluyó el contraste con isolíneas desarrolladas por otros autores. Para esto último, se generaron cartas de isolíneas a partir de las superficies raster obtenidas, procurando considerar los mismos valores de las isolíneas utilizadas en los trabajos que sirvieron de comparación.

Temperatura. En base a lo descrito en el apartado anterior, fue ajustado un total de 13 modelos topoclimáticos, de los cuales 12 fueron explicativos de la temperatura media mensual (TMM) y uno de la temperatura media anual (TMA). Las variables independientes utilizadas fueron LAT, LON, ALT, DL y DCA.

A partir de la carta de TMA fue generada una carta de isotermas medias anuales, la que se utilizó para contrastar los resultados de los modelos con otros estudios. En todos los casos la unidad de medida utilizada correspondió a grados Celsius.

Precipitación. El ajuste de modelos y espacialización de precipitación media mensual (PMM) en la zona se llevó a cabo teniendo como guía la metodología utilizada por Canessa (2006) en la región de Coquimbo. En este trabajo se consideró el uso de estaciones meteorológicas e isoyetas, a partir de las cuales se ajustó y espacializó un modelo de precipitación media anual (PMA). La PMM, por su parte, fue estimada por el autor en base a la carta de PMA y a un coeficiente de aporte mensual a la misma. En este trabajo, la decisión de incrementar las fuentes de información con isoyetas, se debió al fuerte contraste de los montos pluviométricos de la zona (Figura 2), siendo insuficientes las estaciones para considerar dichas particularidades al momento de generar los modelos.

Así, el ajuste y espacialización de modelos topoclimáticos de PMM se ciñó a los siguientes pasos: generación de superficie raster de PMA a partir de interpolación de isoyetas, determinación y extracción de una muestra representativa de valores de la anterior, ajuste

de un modelo topoclimático de PMA en base a estaciones y valores extraídos de la carta interpolada, espacialización de modelo y, finalmente, generación de cartas de PMM.

Para la generación de la superficie raster de PMA, fue elaborada en primer lugar una carta resumen de isoyetas a partir de la selección de isolíneas, provenientes de estudios de la zona, que mejor retrataron la información dada por las estaciones. Esta carta fue posteriormente interpolada mediante la función “Triangulated irregular Network” (TIN), de Idrisi®, obteniéndose así un mapa continuo de PMA para ser utilizado como fuente de extracción de información. La utilización de este método de interpolación obedeció a buenos resultados observados y a características propias del algoritmo como la posibilidad de retratar de mejor manera cumbres y zonas depresionales, la posibilidad de ceñirse a las isolíneas de origen y a la rápida operación que ofrece, debido a que ha sido diseñado para esto (Eastman, 2003).

Mediante pruebas preliminares, se observó una dificultad para ajustar un modelo para la zona en términos globales, presumiblemente ligada a los contrastes de la variable. Por esta razón, antes de la determinación de la muestra a extraer, se dividió el área en dos sectores, de acuerdo a las características indicadas en la literatura y evidenciadas también en los datos de estaciones. Así, el sector 1 representó la zona correspondiente a la costa y la pampa hasta aproximadamente los 2.000 msnm, mientras que el sector 2 representó la zona correspondiente a la precordillera, altiplano y altas cumbres, todo esto por sobre los 2.000 msnm. La divisoria entre estas dos zonas dio cuenta aproximadamente de la isoyeta 10 mm, lugar a partir del cual la pluviometría experimenta un rápido ascenso derivado de las precipitaciones convectivas estivales presentes en el altiplano (CORFO, 1982).

Para determinar el tamaño de muestra (n ; n° de pixeles) a extraer de cada sector, se utilizó la siguiente ecuación (Chuvienco, 2002):

$$n = \frac{z^2 \cdot s^2}{L^2 + \frac{z^2 \cdot s^2}{N}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde N corresponde al tamaño del sector (n° de pixeles), z al valor de la distribución de probabilidades normal (1,96 para 95%), L al error aceptado (5% en este caso) y s^2 a la varianza muestral.

De esta manera el tamaño muestral para el sector 1 fue de 1.190 pixeles y para el sector 2 de 518 pixeles, siendo las diferencias atribuibles a la mayor variabilidad del sector 1. Para cada uno de los puntos mencionados se extrajo a continuación, un valor de PMA a partir de la carta interpolada, e información correspondiente a variables fisiográficas (LAT, LON, ALT y DL⁵) a partir de los MDT's. Cabe mencionar que el tamaño muestral incluyó las

⁵ En este caso, a diferencia de la TMM, no se consideró la DCA ya que se consideraron estaciones del extrajero para las cuales no se dispuso de esta información.

estaciones meteorológicas, siendo considerados los puntos en lugares carentes de las mismas.

Con esto se procedió al ajuste de los modelos topoclimáticos de PMA para cada sector como se indicó en procedimiento general. El modelo correspondió a la forma descrita en la Ec. 1 para el sector 1 y a la forma descrita en la Ec. 3, para el sector 2. Esta última ecuación representa la forma despejada de una regresión múltiple entre los logaritmos naturales de la variable dependiente y las variables independientes, modelo que fue capaz de retratar de manera adecuada la PMA para el sector. Lo anterior se basó en indagaciones previas, en zonas del país, en las que se observaron buenos resultados al ajustar modelos de este tipo con datos en escala logarítmica (Morales, 2009)⁶.

$$PMA = \exp(b_0) \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot x_3^{b_3} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde x_1 , x_2 y x_3 corresponden a variables fisiográficas obtenidas a partir de los MDT's y b_0 , b_1 , b_2 y b_3 , son los coeficientes de la regresión múltiple.

El modelo ajustado de PMA de cada sector fue espacializado en su área de pertinencia - los límites para el cual fue creado - a lo que se añadió un pequeño borde de traslape que fue promediado entre las imágenes de cada sector para generar una zona de gradiente entre ambos. Con esto, se obtuvo una imagen global de PMA de la zona, sobre la cual fue aplicado un filtro de media (7x7) para, en conjunto con la intersección, suavizar la franja de unión de los distintos sectores. Al igual que en el caso de la TMM, con el objeto de evaluar el ajuste, se generó una carta de isoyetas medias anuales.

Para la generación de cartas de PMM se utilizaron las cartas de PMM generadas por Hijmans *et al.* (2005), señaladas en los Materiales. Estas cartas fueron normalizadas de acuerdo a la PMA (suma de las cartas de todos los meses), obteniéndose 12 cartas de aporte mensual a la misma que fueron llevadas a la resolución del estudio. Así, para cada mes, la PMM fue finalmente estimada como el producto entre la superficie raster de aporte mensual y la superficie de PMA generada. Si bien Canessa (2006) utilizó, para la generación de cartas de PMM, 12 coeficientes globales que representaron el promedio del aporte mensual de las estaciones a la PMA, en este caso se optó por lo señalado anteriormente ya que el valor promedio de aporte de las estaciones, presentó gran variabilidad observándose coeficientes de variación sobre 100% en varios meses del año.

La unidad utilizada para modelos y cartas de precipitación fueron los milímetros (mm).

⁶ Luis Morales S., Profesor de Cs. Naturales y Física, Dr., Universidad de Chile, Dpto. de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, 2009 (comunicación personal).

Radiación solar. Al igual que en el caso de la PMM, fue ajustado un modelo topoclimático de radiación solar media anual (RSMA), monto total anual de RS, utilizando como variables independientes la LAT, LON, ALT y DL⁷.

Una vez espacializada la carta de RSMA, la radiación solar media mensual (RSMM) para cada mes fue calculada como el producto entre un coeficiente de aporte global para la zona, estimado para cada mes como el promedio del aporte mensual de las estaciones meteorológicas a su respectiva RSMA, y la superficie raster de RSMA. Los coeficientes considerados se basaron en el hecho de que el aporte mensual de las estaciones fue bastante homogéneo presentando, para los respectivos meses, coeficientes de variación que no superaron el 15%, siendo para la mayor parte iguales o inferiores a 10%.

De esta manera, fue generado un total de 13 cartas de radiación solar: 12 de RSMM y una de RSMA. Además, y con el objeto de evaluar la espacialización, se generó a partir de la carta de RSMA, una carta de isolíneas de RSMA. La unidad de medida utilizada correspondió a $\text{kcal cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ para las superficies raster y vectorial anual, la que fue transformada para cada mes a $\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$, unidad original de las estaciones meteorológicas, para efectos de su uso en el modelo de producción de MS anual.

Objetivo Específico 2

Digitalización y verificación de carta de asociaciones vegetales. El propósito de esta etapa fue la digitalización, georreferenciación y verificación, respecto a condiciones más recientes, de la carta de Hernández (1980). Para esto fue de gran importancia la ayuda que las imágenes satelitales Landsat 5 TM proveyeron y, secundariamente, la de imágenes satelitales de mayor resolución de Google Earth®.

De acuerdo a lo anterior, el primer paso fue la digitalización de la carta mediante escáner, su conversión a formato vectorial y, posteriormente, su georreferenciación al sistema de referencia del estudio en base a cartografía e imágenes con sistema de referencias conocidos; todo esto con ayuda de programas SIG. Inicialmente, la unidad más pequeña presentó una superficie aproximada de 50.625 m^2 ($0,81 \text{ mm}^2$ en escala 1:250.000), lo que es bastante exiguo si se lo compara con los criterios generalmente utilizados para MUC a escala del mapa (Chuvienco, 2002), razón por la cual unidades de tamaño muy reducido fueron revisadas como se explica más adelante.

La verificación de la carta se llevó a cabo mediante análisis visual de imágenes satelitales, asistida por ordenador. De acuerdo a Chuvienco (2002), el análisis visual es una buena alternativa para actualizar cartografías existentes. Este análisis, según el mismo autor, emplea claves de identificación similares a la fotointerpretación clásica (tono, textura, tamaño, localización, forma, etc.). Dado que la cartografía objeto de este apartado

⁷ Por las mismas razones expresadas para la precipitación, se consideró una cantidad más limitada de variables independientes, respecto a las consideradas en la temperatura.

presentaba una clasificación previa y lo que se pretendía era básicamente verificar algún tipo de cambio en los límites de las unidades, esta metodología se presentó como una opción adecuada para realizar dicha tarea.

Las imágenes satelitales utilizadas para la verificación debían permitir la caracterización de las unidades vegetales de la carta de Hernández (1980), por lo cual su selección se basó en que éstas contaron con las siguientes características satisfactorias para este propósito:

- Resolución: El tamaño de pixel de estas imágenes, $30 \cdot 30 \text{ m}^2$, fue varias veces inferior a la MUC presente en la cartografía de Hernández (1980), lo que se consideró adecuado para reconocer las características a nivel intra e inter unidades.
- Fecha de obtención de las imágenes: Las imágenes correspondieron a meses del periodo lluvioso estival del año 2008. El crecimiento activo de las praderas ocurre básicamente en este tiempo (Troncoso, 1982; Ahumada y Faúndez, 2001) y son las praderas de secano las mayormente afectadas por la estacionalidad, ya que las de bofedal poseen escurrimientos subterráneos y superficiales (Troncoso, 1982). Dado que a mayor vigor de la vegetación, más clara es su discriminación frente a otros tipos de cubierta (Chuvienco, 2002), la fecha mencionada se presentó como la más adecuada para llevar a cabo la tarea.
- Nubosidad: las imágenes seleccionadas contaron con un mínimo de nubosidad, 0 – 10%, lo que permitió una muy buena visualización.

Con estas imágenes, previa corrección atmosférica, geométrica y unión de los distintos cuadrantes, a modo de un mosaico, para visualización completa del área de estudio, se realizaron dos composiciones de tres bandas en “falso color”⁸: una conocida como “infrarrojo color”, en la que se adjudican las bandas de colores primarios rojo (R), verde (V) y azul (A) a las bandas infrarrojo cercano (IRC), R y V; y otra en la que se adjudican

⁸ De acuerdo a Chuvienco (2002), el color es un elemento básico para la interpretación visual de imágenes, dado que el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas que a la intensidad luminosa (Barret y Curtis, 1999a, citados por Chuvienco, 2002) y por el incremento de información que supone la mezcla de varias bandas del espectro. El color que aprecian nuestros ojos es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distinta longitud de onda, pudiendo nuestros ojos percibir estas últimas en el rango entre 0,4 y 0,7 μm . La energía recibida es separada en tres componentes que constituyen los colores primarios: rojo, verde y azul, a partir de los cuales puede reconstruirse cualquier otro color del arcoíris. Cuando combinamos las bandas espectrales rojo, verde y azul (RVA), aplicando a cada una de ellas los tres colores primarios en ese mismo orden, obtenemos una impresión similar al color que percibimos o “color natural”; asignación que puede ser modificada adjudicando los colores primarios RVA a tres bandas espectrales cualesquiera, en el orden que se estime más oportuno, dando lugar a composiciones denominadas “falso color”. Estas últimas, si bien no se ajustan a los colores apreciados por nuestros sentidos, pueden ser mucho más interesantes desde el punto de vista de la interpretación temática de la imagen (Chuvienco, 2002). Las imágenes satelitales representan distintas bandas espectrales medidas por un sensor, las que a su vez dan cuenta de un rango de longitudes de onda con comportamiento similar. Las longitudes de onda que representan las bandas del sensor TM de Landsat utilizadas en este caso fueron: Banda 2 (0,52-0,60 μm), Banda 3 (0,63-0,69 μm), Banda 4 (0,76-0,90 μm) y Banda 5 (1,55-1,75 μm).

las bandas RVA a una banda del IRC, una del infrarrojo medio (SWIR) y una del R, respectivamente (Chuvienco, 2002). Estas composiciones tienen la potencialidad de que la vegetación sana puede ser observada en color rojo, el que contrasta con el resto de las coberturas y se explica por la alta reflectividad de la vegetación en el IRC. Además, la segunda composición permite distinguir con distinto color, vegetación con menor vigor y diferenciar superficies que en el visible presentan apariencia similar (p. ej. nubes y nieve).

La verificación y corrección de la carta de vegetación se llevó a cabo mediante la sobreposición de la misma sobre las composiciones de imágenes satelitales y se basó en características tales como color, textura y contexto espacial de las unidades. Este proceso estuvo apoyado por una carta de isolíneas de altitud cada 30 m generada a partir del DEM y el “pattern” de fotointerpretación elaborado por Hernández (1980) para la determinación de las asociaciones del área.

Para verificar si las unidades más pequeñas correspondían efectivamente a unidades vegetales, se calculó el área de todos los polígonos y, considerando que la MUC no debe ser inferior a 4 mm² medidos a escala del mapa (Chuvienco, 2002), se revisaron aquellos que presentaron una superficie igual o inferior a esta. Posteriormente, la cartografía fue depurada en base a este criterio, eliminando las unidades inferiores al tamaño señalado.

Una vez finalizados los procedimientos anteriores, las asociaciones vegetales fueron tipificadas de acuerdo a los cambios añadidos a éstas por Troncoso (1982), los que dijeron relación principalmente con los nombres de las asociaciones y con la fusión de algunos límites.

Inventariado y estimación de atributos de la vegetación. Esta etapa tuvo el propósito de complementar la base de datos espacial de las asociaciones vegetales con atributos utilizados posteriormente como insumos para la estimación de la producción de MS anual y la CC. Se consideró también dentro de este punto la estimación del índice de área foliar (IAF).

Es importante mencionar que esta fase contó con la colaboración de Faúndez (2009)⁹ quien prestó asistencia en temas relativos a taxonomía vegetal y a los hábitos de crecimiento de las especies.

Atributos por asociación. Los atributos inventariados para cada asociación fueron los siguientes:

- Tipo de pradera.
- Especies vegetales que la componen.

⁹ Luis Faúndez Y., Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile, Dpto. de Producción Agrícola (área Fitotecnia), 2009 (comunicación personal).

- Porcentaje de participación de las especies.
- Clasificación de las especies según respuesta ecológica al pastoreo.
- Concentración de energía metabolizable promedio de especies “deseables” y “menos deseables”.
- Participación de especies leñosas en la asociación.

Se señala a continuación el proceso seguido para la determinación de los principales atributos:

La composición botánica de las asociaciones, fue obtenida tomando como base el estudio de Troncoso (1982) y secundariamente, en aquellas zonas no consideradas en el trabajo de éste, el estudio de Hernández (1980). Los nombres de las especies recopiladas para cada asociación fueron actualizados y/o corregidos utilizando como guía bases de datos taxonómicas (chilebosque.cl, s.a.; Tropicos.org, 2009) y conocimiento de experto (Faúndez, 2009).

El porcentaje de participación de las especies en la composición botánica, fue obtenido utilizando como guía los estudios ya señalados (Hernández, 1980; Troncoso, 1982), los que fueron verificados y, cuando procedió, corregidos. Con los resultados de la composición botánica y participación de especies, fue rectificadas la tipificación de las asociaciones vegetales de la carta generada, considerando para el nombre de éstas las tres primeras especies con más de 10% de participación, las que se dispusieron en orden decreciente de acuerdo al valor porcentual presentado en su respectiva asociación.

Como se mencionó en la Introducción, para la determinación del porcentaje de especies palatables y la condición, es preciso llevar a cabo una clasificación de las especies de acuerdo a su respuesta ecológica al pastoreo. Por esta razón las especies establecidas para cada asociación fueron clasificadas como “deseables”, “menos deseables” e “indeseables”. La energía metabolizable promedio (*MD*; MJ kg⁻¹ de MS), por su parte, fue estimada para las especies clasificadas como “deseables” y “menos deseables”. Cabe señalar que tanto la respuesta al pastoreo como los valores de *MD* de las especies se basaron en diversos estudios de evaluación nutritiva de las mismas, de preferencias alimenticias del ganado, o bien estudios que incluyeron observaciones al respecto (Troncoso, 1982; Lailhacar, 1990; Ahumada y Faúndez, 2001; Castellaro, 2003a; Castellaro, 2003b; Benítez *et al.*, 2006).

Atributos globales: Índice de área foliar. El Índice de área foliar (*IAF*; m² de hoja m⁻² de suelo) es una variable clave concerniente, funcionalmente, a la producción de la biomasa de las plantas, al microclima de la canopia, a la intercepción de agua, a la extinción de radiación y al balance de carbono (Van Wijk and Williams, 2005, citado por Fan *et al.*, 2009). Dentro de los métodos tradicionales para estimar el *IAF* se encuentra la cosecha de vegetación de cierta superficie y la medición del área de un lado de la hoja directamente, método que consume gran cantidad de tiempo y es destructivo (Fan *et al.*, 2009). Sin embargo la estabilidad, la capacidad de repetición de las mediciones y la cobertura global de técnicas que la percepción remota otorga, ha conducido a una amplia utilización de estas

mediciones, para la obtención de esta y otras variables, en estudios de la superficie terrestre y procesos atmosféricos (Liang, 2004).

En el presente trabajo, el *IAF* se estimó en función del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*), de acuerdo al modelo señalado por Liang (2004). Este asume que la relación entre el *NDVI* y el *IAF* es lineal y que el máximo valor de *NDVI* en una estación corresponde al *IAF* máximo de la cobertura vegetal (Justice, 1986, citado por Liang, 2004). El modelo se indica en la Ecuación 4:

$$IAF = IAF_{\max} \left(\frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde,

IAF: Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada.

máx, min, i: máximo, mínimo, valores del periodo observado respectivamente.

El *NDVI*, por su parte, fue estimado a partir de las imágenes Landsat 5 TM, empleadas en la etapa “Digitalización y verificación de la carta de asociaciones vegetales”. La ecuación utilizada fue la siguiente (Chuvieco, 2002):

$$NDVI = \left(\frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

Donde,

ρ_n : Reflectividad en el infra rojo cercano (IRC).

ρ_r : Reflectividad en el rojo (R).

Este índice, tal como muchos de los cocientes para discriminar masas vegetales, se basa en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación, en el cual gran parte de la energía recibida en el rango del visible es absorbida por la hoja, ocurriendo el efecto contrario en el rango del IRC. De ahí el contraste entre la baja reflectividad del R y la alta del IRC, contraste que permite separar, con relativa claridad, la vegetación sana de otras cubiertas. Otro de los aspectos interesantes del *NDVI* es que sus valores fluctúan entre -1 y 1, lo que facilita su interpretación (Sobrino, 2000; Chuvieco, 2002). Para el presente trabajo, el rango de *NDVI* utilizado para la generación del *IAF* se convino en 0 – 0,96, el que se basó en los valores del índice presentados en zonas con vegetación del área de estudio, zonas que a su vez fueron corroboradas con imágenes satelitales de mayor resolución. El IAF_{\max} , en tanto, fue establecido de manera preliminar en base a referencias del índice señaladas en otros estudios (Luo *et al.*, 2004; Wilson and Meyers, 2007).

Finalmente, la resolución espacial del *IAF* (30 m) fue llevada a la resolución del estudio para su utilización en las siguientes etapas.

Objetivo Específico 3

Estimación de producción de materia seca. La producción anual promedio de fitomasa (*PMST*; kg de MS ha⁻¹) fue estimada en base al modelo desarrollado y utilizado por Castellaro (2007), el cual fue compatibilizado para funcionar en un entorno de SIG raster, mediante el establecimiento de una rutina programada en lenguaje Visual Basic de Excel®.

El modelo señalado, es un modelo simple que procesa promedios mensuales de precipitación (mm mes⁻¹), temperatura (°C día⁻¹) y radiación solar (cal cm⁻² día⁻¹), que en este caso estuvieron representados por las cartas topoclimáticas generadas. El modelo supone una producción potencial diaria de MS de 82 kg ha⁻¹ día⁻¹ para praderas de bofedales y, para las praderas de secano, una producción potencial de la misma cuantía que es modificada de acuerdo al porcentaje de especies leñosas¹⁰ y a la eficiencia relativa de transformación de la radiación solar interceptada en producción de MS del estrato arbustivo/arbóreo y herbáceo. La producción potencial calculada es modificada de acuerdo a multiplicadores, valores entre cero y uno, que reflejan el grado de cobertura del *IAF* de la cubierta vegetal, la temperatura y la restricción hídrica. Finalmente, la *PMST* es estimada como la suma de los valores mensuales de producción de MS.

La superficie raster de *PMST* así obtenida fue contrastada, a modo de evaluación, con valores señalados para estudios realizados en la zona.

Determinación de la capacidad de carga

En base a lo obtenido en las etapas anteriores, la *CC* fue finalmente estimada, utilizando programas SIG, según el modelo que se indica a continuación (Castellaro, 2007):

$$CC = \left(\frac{PMST \cdot PSP \cdot MD \cdot FCDiet \cdot FUA}{REQEMUV} \right) \cdot Fpend \cdot FDagua \quad \text{Ec. 6}$$

Donde,

- PMST* : producción anual promedio de MS (kg de MS ha⁻¹).
- PSP* : proporción de especies palatables (suma de aquellas consideradas como “deseables” y “menos deseables) (0 – 1).
- MD* : concentración de energía metabolizable promedio de las especies palatables (MJ kg⁻¹ de MS).
- FCDiet* : factor de corrección de la producción de MS que toma en cuenta el aporte que significa el tipo de pradera a la dieta global del herbívoro (0 – 1).
- FUA* : factor de uso apropiado del pastizal (0 – 1).

¹⁰ Cabe señalar que originalmente Castellaro (2007) considera especies herbáceas y arbustivas, sin embargo, dado que las asociaciones vegetales presentaron en su composición botánica algunas especies arbóreas, se modificó la metodología original agrupando especies arbustivas y arbóreas en la categoría “especies leñosas”.

- REQEMUV* : requerimiento anual de energía metabolizable de la unidad vicuña (UV) (MJ año⁻¹).
- Fpend* : factor de corrección de acuerdo a las limitaciones impuestas por la pendiente del terreno de pastoreo (0 – 1).
- FDagua* : factor de corrección de acuerdo a las limitaciones impuestas por la distancia a las fuentes de agua de bebida (0 – 1).

Respecto a lo anterior, la *MD* fue estimada para cada asociación como un promedio ponderado entre el porcentaje de participación en la composición botánica de las especies palatables y la concentración energética media de las mismas.

El coeficiente *FCDiet*, en tanto, es un factor que considera el aporte que efectúa el tipo de pradera a la dieta global de la vicuña, siendo un indicador de las preferencias alimenticias de la misma. Los valores asignados fueron de 0,69 para bofedales, 0,24 para pajonales y 0,07 para tolares y las restantes asociaciones con menor valor forrajero, basándose en los estudios de dietas de CSA efectuados por Castellaro *et al.* (2004). Dado que las asociaciones vegetales son grandes unidades cartográficas, algunas presentaron estratas pertenecientes a tolares y a pajonales. En estos casos el valor de *FCDiet* fue estimado como un promedio ponderado entre el porcentaje de especies representativas de un tipo de pradera y el valor del coeficiente propio de la misma.

Como se mencionó en el capítulo introductorio a la metodología de estimación de la *CC*, el *FUA* es estimado en base a la condición de la pradera, lo cual implica el cálculo de un porcentaje de condición de la misma y su tipificación dentro de un rango de porcentajes, equivalentes a clases de condición. En este caso se calcularon dos porcentajes de condición a partir métodos alternativos, método de Huss (FAO, 1996) y método de Florez (2005), generando dos resultados diferentes de *CC*.

El método de Huss (FAO, 1996), es un método sencillo que permite estimar clases relativas de condición del pastizal en base a la clasificación de las plantas en relación a su respuesta ecológica al pastoreo. La guía para determinar el porcentaje de condición establece un porcentaje máximo permisible para los distintos tipos de especies. Así, las especies “no deseables”, o invasoras, tienen un porcentaje máximo permisible de 0%, las especies “menos deseables” o crecientes, de 30%, y las especies “deseables”, de 100%. Lo anterior se sustenta en las características del potencial natural¹¹ de una serie de praderas, que han sido reveladas por investigaciones, demostraciones y aplicaciones prácticas.

De esta manera, el valor porcentual que representan las especies de una determinada clasificación ecológica es contrastado con los máximos permisibles. Cuando el porcentaje de participación de las especies dentro de una categoría de clasificación ecológica es inferior al máximo permisible, dicha categoría recibe un puntaje equivalente al porcentaje

¹¹ Se utiliza *potencial natural* para significar “la comunidad vegetal máxima que un medio ambiente particular es capaz de producir”, encontrándose dentro de sus características el estar en su punto más alto de productividad (FAO, 1996).

de participación señalado. Cuando el porcentaje de participación de las especies en una categoría excede el máximo permisible, el puntaje asignado a la categoría es el máximo permisible. Finalmente el porcentaje de condición de la pradera es establecido como la suma entre el puntaje obtenido para las categorías de especies “deseables” y “menos deseables”, observando las especies “indeseables” un valor nulo dado su máximo permisible.

El método propuesto por Florez (2005), cuyas bases fueron desarrolladas para praderas altoandinas de Perú, considera el uso de cuatro índices de cuya combinación lineal resulta el puntaje de condición de la pradera. Los índices mencionados son:

- Calidad (*D*): corresponde al porcentaje de especies decrecientes o deseables que existe en la pradera.
- Índice Forrajero (*IF*): corresponde a una medida del porcentaje total de especies decrecientes y acrecentantes que existen en la pradera, las que son consideradas como palatables y por ello consumibles por el ganado.
- Suelo desnudo, rocas y pavimento de erosión (*BRP*): indica el porcentaje de estos elementos que se observan en la pradera.
- Índice de vigor (*V*): se determina en función de la altura de especies indicadoras respecto de la altura máxima de las mismas, medida en las mejores condiciones para su desarrollo óptimo.

Así, la condición puede ser calculada como una combinación lineal de los índices, utilizando una ponderación diferente para cada uno, como se indica en la ecuación 7¹².

$$\text{Condición} = 0,5 \cdot D + 0,2 \cdot IF + 0,2 \cdot (100 - BRP) + 0,1 \cdot V \quad \text{Ec. 7}$$

En la Ec. 7 se utiliza el término $(100 - BRP)$ para estimar lo que equivaldría a la cobertura vegetal, razón por la cual fue estimado a partir de la aproximación utilizada por Castellaro (2007) para el cálculo de la cobertura en función del *IAF*, la que fue elaborada a su vez en base al estudio de Rickert *et al.* (2000).

$$\text{Cobertura} = (1 - \exp^{-0,65 \cdot IAF}) \cdot 100 \quad \text{Ec. 8}$$

Donde,

Cobertura : cobertura vegetal (%).

IAF : índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

¹² Cabe señalar que el índice de vigor, *V*, no pudo ser considerado puesto que no se contó con la información necesaria para estimarlo, por esta razón la ponderación de la Ec. 7 fue recalculada a fin de considerar el resto de los índices con la ponderación original.

Independiente del método de condición utilizado, y de acuerdo al porcentaje de condición obtenido, fue asignada a la pradera una clase de condición, a partir de la cual fue establecido el *FUA* respectivo. Lo anterior se detalla en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clases de condición y factor de uso apropiado (*FUA*) asignados a las praderas para la estimación de la capacidad de carga.

Porcentaje de condición	Clase de condición	<i>FUA</i>
76 – 100	Excelente	0,5
51 – 75	Buena	0,5
26 – 50	Regular	0,3
1 – 25	Pobre	0,1
0	Pésima	0,0

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Castellaro (2007).

Para el *REQEMUV* se consideró 3.649,6 MJ año⁻¹, energía que representa los requerimientos de una hembra vicuña adulta durante un ciclo productivo de un año (Castellaro, 2005).

En cuanto a las limitaciones impuestas por la pendiente y considerando la inexistencia de datos específicos para vicuñas, se utilizaron los coeficientes propuestos para la especie caprina (González, 1998, citado por Arenas, 2008). La superficie raster de pendientes fue derivada del DEM y sirvió como base para el cálculo del factor de ajuste por pendiente. Las limitaciones impuestas por la distancia a fuentes de agua de bebida se estimaron en base a una superficie raster de distancia a fuentes de agua y coeficientes elaborados a partir del trabajo Davies (2003), quien estudió, entre otros, la relación espacial de grupos de vicuñas en torno a un cuerpo de agua en el altiplano peruano. Cabe señalar que como aproximación a la distancia a fuentes de agua, en la superficie raster, se utilizó la distancia a unidades vegetales tipificadas como bofedales. Los factores de corrección empleados se muestran en los Cuadros 2 y 3.

Cuadro 2. Factor de corrección de la capacidad de carga según limitaciones impuestas por la pendiente del terreno.

Distrito	Pendiente %	Factor de corrección ^{1/}
Plano	0,5 – 10,5	1,0
Ondulado	10,5 – 34,5	0,9
Cerrano suave	34,5 – 47,5	0,8
Cerrano inclinado	47,5 – 66,5	0,6
Montano suave	66,5 – 95,5	0,4
Montano inclinado	> 95,5	0,2

^{1/} Factor de corrección propuesto para caprinos.

Fuente: González (1998, citado por Arenas, 2008).

Cuadro 3. Factor de corrección de la capacidad de carga según limitaciones impuestas por la distancia a fuentes de agua de bebida.

Rangos de distancia km	Factor de corrección
0 – 1	1,000
1 – 2	0,200
2 – 3	0,109
3 – 4	0,073
4 – 5	0,036
5 – 9	0,018
> 9	0,000

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Davies (2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Objetivo Específico 1

Base de datos climáticos generada

Si bien la base de datos climáticos no constituye un resultado propiamente tal, se incluye parte de lo obtenido a fin de mejorar la comprensión de lo que se exhibe en las próximas páginas.

Como resultado de la sistematización de información climatológica se obtuvo una base de datos con 28 estaciones de temperatura media mensual, 38 con datos de precipitación media mensual y 17 con datos de radiación solar media mensual; de las cuales dos, tres y ocho respectivamente, constituyeron estaciones de la zona adyacente a las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. Dicha base de datos se encuentra, en detalle, en los Cuadros 22 al 24 del Apéndice I.

En la Figura 4 es posible apreciar la distribución espacial de las estaciones ubicadas en las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. A partir de esto y de las altitudes de las estaciones presentes en la base de datos (incluyendo las de zonas adyacentes), fue posible dilucidar algunas características en la distribución de las mismas. Así, en el caso de las estaciones meteorológicas de temperatura y precipitación, se observó una concentración hacia el norte del paralelo 19°, donde se ubicaron en torno al 50% de las estaciones. Respecto a las altitudes, si bien el amplio rango abarcado para todas las variables climáticas, entre 8 y 4.500 msnm aproximadamente, al considerar como referencia arbitraria los 2.000 msnm, se observó que las estaciones de precipitación presentaron un marcado patrón, ubicándose el 78% de éstas sobre dicho nivel. El mismo análisis, considerando una altitud de 3.000 msnm, arrojó que alrededor del 68% de las estaciones de precipitación se encontraron sobre este nivel.

Puesto que las estaciones constituyen la información de entrada para la generación de los modelos topoclimáticos, una distribución muy heterogénea de las mismas implica que probablemente los modelos retratarán mejor algunas zonas, aquellas que proporcionan mayor información, que otras. En este sentido, zonas climáticas muy particulares y/o con gradientes muy marcados, con bajas o nulas densidades de estaciones, podrían ser las más perjudicadas a la hora de ser descritas por los modelos.

Dificultades relativas a la distribución estaciones meteorológicas no constituyen una novedad en estudios que han tenido el propósito de estimar la distribución espacial de variables climáticas a partir de datos puntuales de estaciones (Goodale *et al.*, 1998; Hijmans *et al.*, 2005; Canessa, 2006; Díaz, 2006), lo que en varios casos ha estado ligado a la escasez de las mismas, circunstancia que ha obligado a utilizar otro tipo de fuentes de

información, como isolíneas en el caso de Canessa (2006) y el presente estudio, para suplir esta falencia.

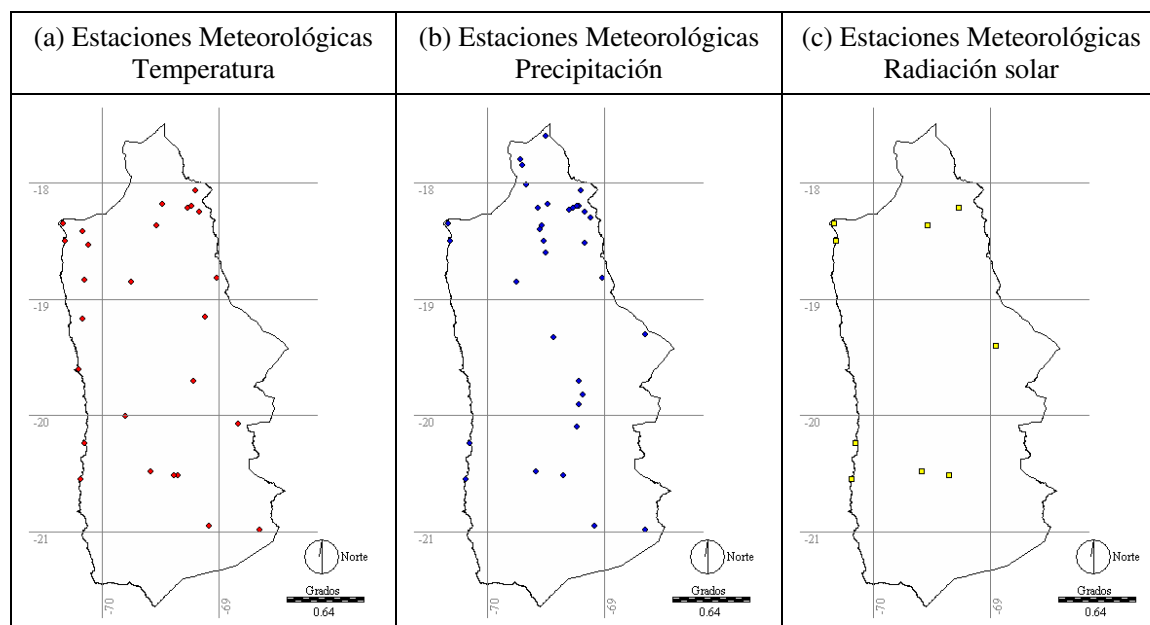


Figura 4. Distribución espacial de estaciones meteorológicas, de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, de (a) temperatura, (b) precipitación y (c) radiación solar, utilizadas para el ajuste de modelos topoclimáticos. Fuente: Elaboración propia en base a recursos de CORFO (1982), DGA, citada por Castellaro (2003a), Oficina Meteorológica de Chile (1965 – 1967), Aceituno *et al.* (s.a.), DGA (1987), CNR – CIREN (1997).

Modelos topoclimáticos ajustados y cartografiados

Temperatura. Un total de 13 modelos topoclimáticos de temperatura, 12 correspondientes a TMM y uno a la TMA, fueron generados según la metodología descrita. De acuerdo a los análisis de varianza y las estadísticas de las regresiones todos los modelos, junto a sus respectivos coeficientes, fueron significativos al nivel de confianza definido. Los modelos explicaron gran parte de la variabilidad espacial de la temperatura, fluctuando sus R^2_{aj} entre un 95 y un 98%. Los ES de la estimación fluctuaron entre 0,9 y 1,4 °C, señalando menores valores en los meses estivales. Los diagramas de dispersión arrojaron un buen ajuste entre datos observados y estimados, sobretudo en meses estivales, coincidiendo con lo anterior. Lo mencionado es posible observarlo en el Cuadro 4 y la Figura 5. Los análisis de varianza y estadísticas de las regresiones se encuentran en detalle en los Cuadros 25 al 37 del Apéndice II.

En el Cuadro 5 se detallan los coeficientes para las variables independientes seleccionadas para los modelos. Se observan, de manera casi constante, las variables DL, la DL^2 y la ALT^2 , las que se presentaron con coeficiente positivo para la primera y negativo para la segunda y la tercera. Una relación con coeficiente positivo para una variable y negativo

para el cuadrado de la misma, indica una respuesta creciente hasta cierto punto a partir del cual ésta se torna decreciente. Este punto, para el caso de la TMM y TMA, señala aproximadamente la zona fronteriza entre la depresión intermedia y la precordillera, es decir, entre los 2.000 – 3.000/3.500 msnm, lo cual es coherente con el descenso gradual de temperatura al incrementarse la altitud, y que se hace patente a medida que se avanza hacia la precordillera (CORFO, 1982).

Cuadro 4. Coeficientes de determinación ajustados (R^2_{aj}) y error estándar (ES) de la estimación, de modelos topoclimáticos de temperatura media mensual y anual, ajustados para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá (n = 28).

Mes/Año	R^2_{aj}	ES
	%	mm
Enero	98,211	0,993
Febrero	98,681	0,862
Marzo	98,093	0,981
Abril	96,144	1,367
Mayo	96,967	1,297
Junio	97,576	1,135
Julio	96,331	1,421
Agosto	96,309	1,388
Septiembre	95,830	1,441
Octubre	96,529	1,262
Noviembre	96,059	1,320
Diciembre	96,735	1,248
Anual	97,710	1,073

Para los modelos y sus respectivos coeficientes: $P < 0,05$

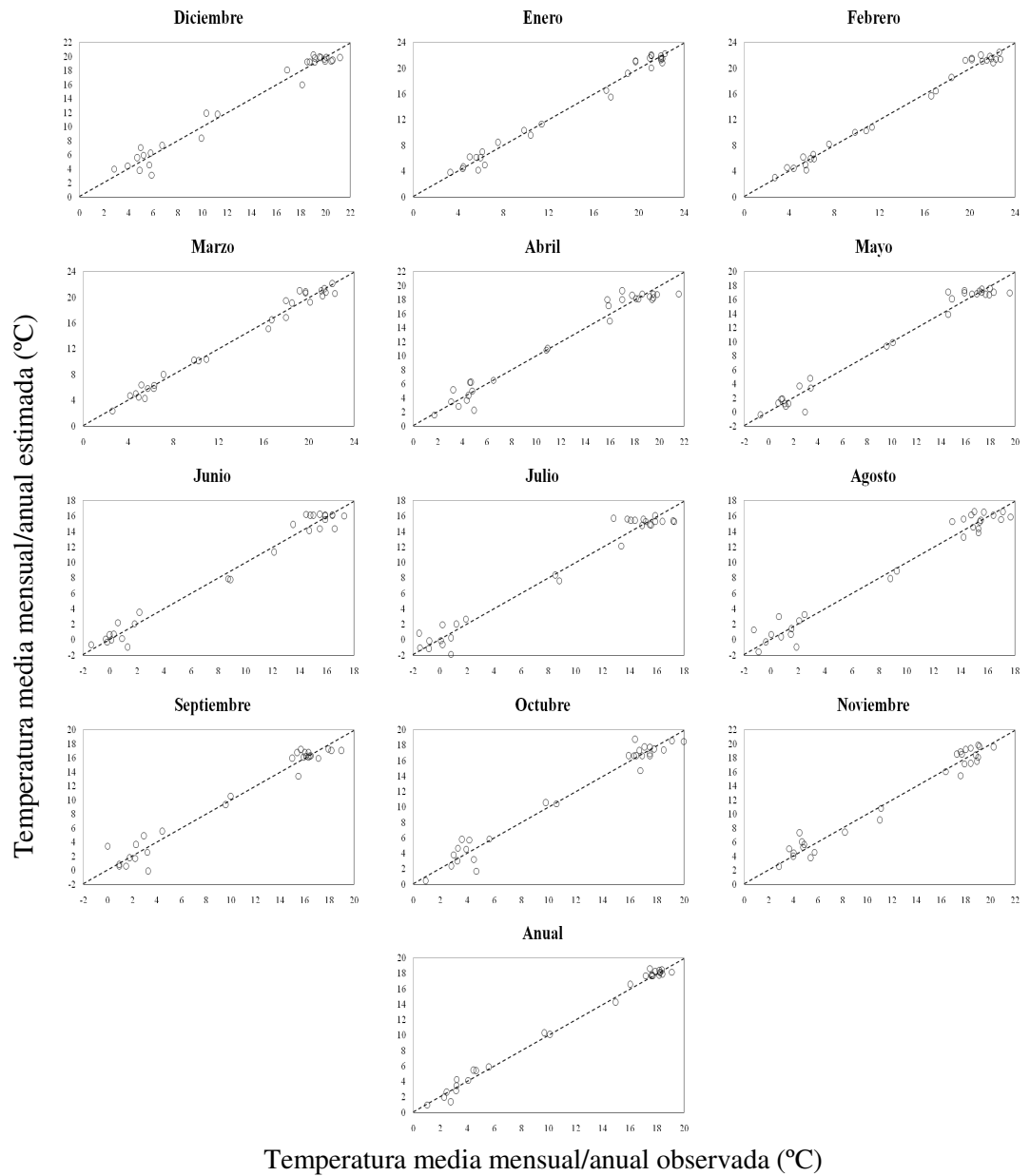


Figura 5. Diagramas de dispersión de datos de temperatura media mensual y anual de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, y de zona aledaña ($n = 28$). En la abscisa valores observados de estaciones meteorológicas y en la ordenada valores estimados a partir de modelos topoclimáticos. La línea 1:1 describe el calce perfecto.

Cuadro 5. Coeficientes obtenidos para los modelos topoclimáticos de temperatura media mensual y anual, ajustados para las regiones de Arica y Parinacota, y de Tarapacá (n = 28).

Mes	Coeficientes																
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇	b ₈	b ₉	b ₁₀	b ₁₁	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₁₅	b ₁₆
Ene	50,318	-41,067							-4,414·10 ⁻⁴	7,643·10 ⁻⁵			-0,606				
Feb	21,261				7,582				-0,001		0,106			2,884·10 ⁻⁴			
Mar	-618,246		-9,084		11,888				-0,002		0,166			2,844·10 ⁻⁴			
Abr	18,011				0,047			-8,483·10 ⁻⁷	-2,547·10 ⁻⁴								
May	16,658				0,037	2,994		-7,417·10 ⁻⁷	-3,787·10 ⁻⁴			0,043					
Jun	16,064							-6,585·10 ⁻⁷	-2,214·10 ⁻⁴							3,948·10 ⁻⁴	
Jul	-14.132,0		-406,432				-2,919	-8,384·10 ⁻⁷									1,709·10 ⁻⁵
Ago	13,211				0,063			-7,637·10 ⁻⁷	-3,955·10 ⁻⁴						-0,003		
Sep	15,913			0,007				-1,479·10 ⁻⁶						2,326·10 ⁻⁴			
Oct	16,603				0,067			-8,674·10 ⁻⁷	-3,346·10 ⁻⁴								
Nov	16,299				5,452	0,051			-1,267·10 ⁻³		0,076			2,485·10 ⁻⁴			
Dic	19,260				0,038			-8,616·10 ⁻⁷	-1,890·10 ⁻⁴								
Anual	17,710				0,041			-8,591·10 ⁻⁷	-2,301·10 ⁻⁴								

Para los modelos y sus respectivos coeficientes: P < 0,05

b ₀ :	Constante	b ₄ :	DL	b ₈ :	DL ²	b ₁₂ :	LAT·LON	b ₁₆ :	ALT·DCA
b ₁ :	LAT	b ₅ :	DCA	b ₉ :	LON·ALT	b ₁₃ :	LAT·ALT		
b ₂ :	LON	b ₆ :	LON ²	b ₁₀ :	LON·DL	b ₁₄ :	LAT·DCA		
b ₃ :	ALT	b ₇ :	ALT ²	b ₁₁ :	LON·DCA	b ₁₅ :	DL·DCA		

La espacialización de los modelos mensuales se presenta en la Figura 6. En general se observa una distribución espacial en franjas longitudinales, con un gradiente de disminución hacia la cordillera. Dentro de esta distribución, destaca una zona más cálida hacia el sur del paralelo 20°, entre los 1.100 y 1.200 msnm, poseedora de características particulares que dan origen a un sector de oasis (Pica, Mantilla, Esmeralda), que ha sido descrita por CORFO (1982). Destaca también, la presencia en algunos meses de un gradiente, en general tenue, de aumento de TMM desde el litoral hacia la Cordillera de la Costa, siendo más notorio durante septiembre; lo que estaría relacionado con la inversión térmica presente en el litoral, fruto a su vez de la influencia del Anticiclón del Pacífico sur oriental (CORFO, 1982). Como era de esperar, las temperaturas medias máximas se observaron durante el verano, en particular en el mes de febrero, superando levemente los 23 °C, en la depresión intermedia. Las temperaturas medias más bajas del año, por su parte, se observaron en el mes de septiembre¹³, en las altas cumbres, siendo inferiores a los -20 °C.

La Figura 7 exhibe un contraste entre isotermas generadas a partir de la superficie raster de TMA obtenida en este estudio e isotermas medias anuales provenientes del trabajo realizado por Huber (1975, citado por Romero, 1985). En estas se aprecia la distribución en franjas longitudinales ya mencionada. Además, se aprecia en ambas una zona confinada en la isoterma 18 °C, residiendo ésta en quebradas de la zona norte y en sector sur de la depresión intermedia para la Figura 7a, y adyacente al meridiano 70° O, con avance hacia el este, para la Figura 7b. Según lo descrito en CORFO (1982), mencionado en el párrafo anterior, lo arrojado por la Figura 7a, al sur del paralelo 20°, sería afín con las características térmicas de la zona. En cuanto a las temperaturas medias mínimas (zonas bajo la isoterma 5 °C en este caso), las cartas presentan ciertas diferencias, recluyendo en la carta generada una zona más extensa a lo largo de la cordillera, en comparación a la que muestra la Figura 7b, lo que estaría indicando temperaturas medias anuales algo inferiores y de mayor extensión geográfica para la primera. Pese a las diferencias señaladas, atribuibles a factores tales como datos usados, metodología y escala, ambas reflejan las tendencias descritas para la zona, presentando mayor similitud en el sector litoral y en el de precordillera.

¹³ Si bien septiembre fue el mes que presentó las menores temperaturas medias localizadas en una zona particular del área, junio fue el mes más frío en promedio para toda la zona.

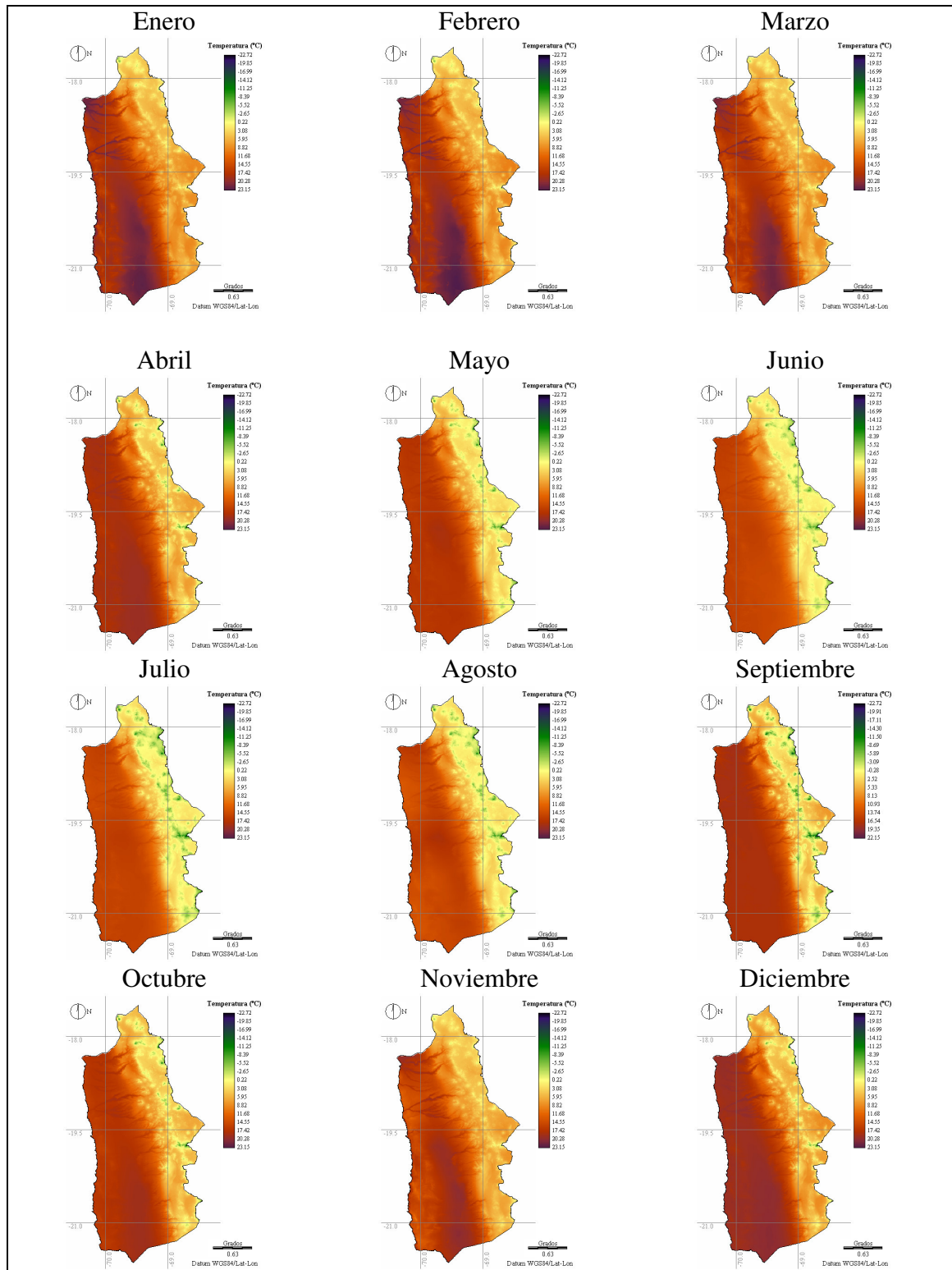


Figura 6. Distribución espacial, en formato raster, de temperatura media, para todos los meses del año, obtenida a partir de modelos topoclimáticos. Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

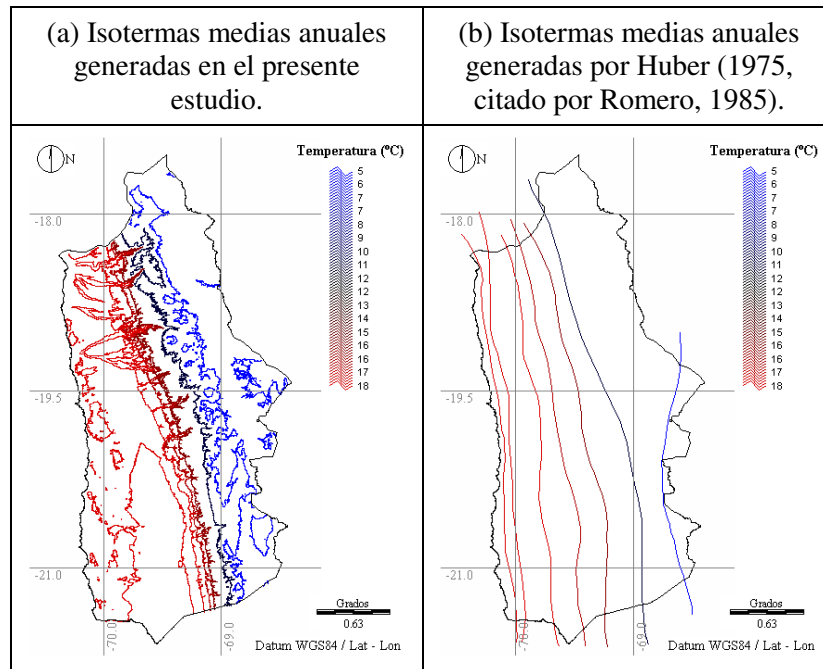


Figura 7. Isothermas medias anuales generadas en (a) el presente estudio a partir de un modelo topoclimático, y en (b) el trabajo de Huber (1975, citado por Romero, 1985). Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Es importante considerar que el rango de validez de los modelos generados se encontró entre los 8 y 4.570 msnm por lo cual, cumbres de mayor altitud como los Nevados de Payachata, Cerro Acotango, Cerro Capurata, Volcán Tacora, entre otros, carecieron de representación al momento de ajustar los modelos. En este sentido, valores de temperatura fuera del rango altitudinal mencionado, podrían no estar dando cuenta de manera adecuada del comportamiento térmico de estas zonas.

Si bien, por lo indicado anteriormente, no se pudo contrastar las temperaturas de altas cumbres con datos de estaciones meteorológicas, es posible tener una idea a partir de lo señalado en la literatura. Así, de acuerdo a Aceituno (1993), se tiene que el gradiente de disminución de temperatura de la pendiente andina es menor que el gradiente observado en la atmósfera libre ($6,5 \text{ } ^\circ\text{C km}^{-1}$). Fräre *et al.* (1975, citado por Aceituno, 1993), para el sector andino meridional de Perú, mencionan que sobre los 1.000 msnm, la temperatura media disminuye aproximadamente a razón de $5,5 \text{ } ^\circ\text{C km}^{-1}$. Para evaluar las cartas de TMM obtenidas con esta información, en altitudes no incluidas dentro del rango de estaciones, se calculó la temperatura de la isolínea correspondiente a los 4.000 msnm del mes más frío en promedio (junio), lo que arrojó una TMM promedio de $2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Siguiendo el gradiente para zonas andinas, se obtuvo que a la altura máxima de las regiones, esto es a los 6.330 msnm aproximadamente, se podrían esperar temperaturas en torno a los $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Con relación a lo anterior y considerando lo señalado por Rivera (2008), a saber, que “en Chile existen glaciares fríos en los Andes del norte, donde los escasos glaciares allí

ubicados, están a gran altura, presentando temperaturas del orden de los -15 a -20 °C”, es posible decir que las temperaturas medias mensuales mínimas se encontrarían en rangos razonables. Sin embargo, las variaciones de éstas a través de los meses no resultan del todo explicables, sobretodo en casos como los meses de marzo y abril, en que la TMM mínima pasa de -5 a -14 °C, respectivamente; el de octubre y noviembre, en que la TMM mínima pasa de -15 a -4 °C, respectivamente, entre otros. En este sentido, zonas fuera del rango para el cual fueron generados los modelos, deberían ser consideradas con precaución.

Precipitación. Dos modelos sectoriales explicativos de la PMA fueron generados según lo explicado en los Métodos. Ambos modelos y sus respectivos coeficientes fueron significativos al nivel de confianza definido. Los modelos explicaron parte importante de la distribución espacial de la variable respuesta, encontrándose sus R^2_{aj} entre un 91,0% y un 99,6%, para el sector 1 y el sector 2, respectivamente. El ES de la estimación fue de 0,7 mm para el sector 1. Los diagramas de dispersión entre los valores observados (estaciones meteorológicas y valores extraídos de carta de isoyetas interpolada) y los valores estimados por los modelos para los respectivos sectores arrojaron, en general, un buen ajuste pudiéndose observar en la Figura 8¹⁴. Los análisis de varianza y estadísticas de las regresiones, en detalle, se encuentran en los Cuadros 38 y 39 del Apéndice II.

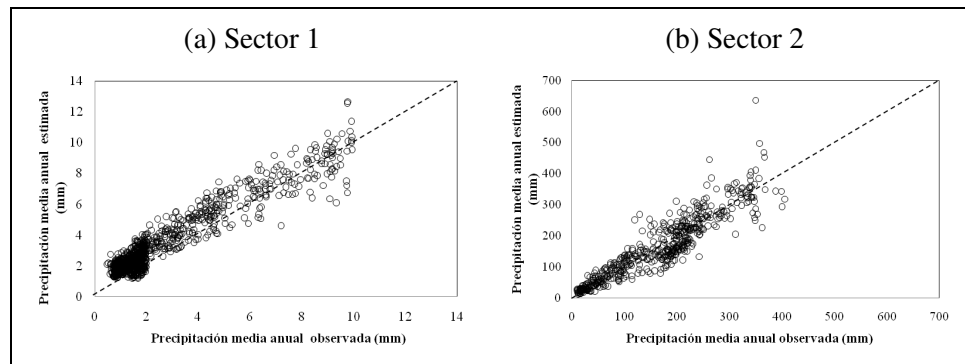


Figura 8. Diagramas de dispersión de datos de precipitación media anual de sectores (a) bajo los 2.000 msnm (Sector 1) y (b) sobre los 2.000 msnm (Sector 2), de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, y de zona aledaña ($n_{\text{sector1}} = 1.190$ y $n_{\text{sector2}} = 518$). En la abscisa valores observados y en la ordenada valores estimados a partir de modelos topoclimáticos. La línea 1:1 describe el calce perfecto.

En el Cuadro 6 se detallan los coeficientes de los modelos ajustados. En ambos casos destaca la presencia de la LAT y la DL. Es preciso señalar que los signos de los coeficientes propios de LAT y LON poseen distintos significados para los modelos, puesto que el modelo del sector 1 fue ajustado con valores negativos de estas variables y el modelo del sector 2, al contemplar el uso de logaritmos, fue ajustado con el valor absoluto de los mismos. Así, para el sector 1, el signo negativo para LAT indica un gradiente creciente de

¹⁴ Los datos del modelo del Sector 2, originalmente en valores logarítmicos, fueron transformados a datos de precipitación para efectos de su presentación en el gráfico de la Figura 8.

la precipitación hacia el sur, mientras que para el sector 2, indica un gradiente creciente hacia el norte.

Cuadro 6. Coeficientes obtenidos para los modelos topoclimáticos de precipitación media anual, ajustados para sectores bajo los 2.000 msnm (Sector 1) y sectores sobre los 2.000 msnm (Sector 2), de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá ($n_{\text{sector1}} = 1.190$ y $n_{\text{sector2}} = 518$).

Coeficientes		Sector 1	Sector 2
b ₀	intercepto	-704.717,000	
b ₁	ALT		2,224
b ₂	DL	212,296	1,212
b ₃	LAT	- 1.561,170	-6,452
b ₄	LON	- 19.629,500	
b ₅	LAT ²	- 0,570	
b ₆	LON ²	- 136,670	
b ₇	DL ²	-0,015	
b ₈	LAT·LON	- 21,903	
b ₉	LAT·ALT	-2,614·10 ⁻⁴	
b ₁₀	LAT·DL	0,270	
b ₁₁	LON·ALT	7,522·10 ⁻⁵	
b ₁₂	LON·DL	2,948	
b ₁₃	ALT·DL	5,930·10 ⁻⁵	

Para los modelos y sus respectivos coeficientes: $P < 0,05$

Un contraste llevado a cabo entre los valores de las estaciones meteorológicas de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá y los valores predichos para las mismas por los modelos, arrojó una subestimación de estos últimos de aproximadamente un 20%. Esta subestimación tuvo como origen fundamentalmente los valores del sector 2, por lo que se llevó a cabo una corrección de los montos estimados para dicho sector en base a los valores observados y estimados de estaciones. Para esto, se calculó una regresión considerando como variable independiente la precipitación observada de las estaciones y como variable dependiente los valores estimados, obteniendo una ecuación con intercepto no significativo al 95%, la que fue recalculada considerando una constante igual a cero (ver Cuadro 40 del Apéndice II). El valor de la pendiente de esta última regresión, fue utilizado como factor de corrección de los valores estimados por el modelo original para el sector 2, de acuerdo a lo indicado por la Ecuación 9:

$$PMA_C = \frac{PMA_E}{m} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde, PMA_C correspondió a la PMA corregida, PMA_E a la PMA estimada por análisis topoclimático para el sector 2 y m ($= 0,819$) al valor de la pendiente de la recta establecida

mediante regresión entre los valores observados y estimados de las estaciones meteorológicas de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, para dicho sector.

La Figura 9 muestra la espacialización de los modelos sectoriales, incluyendo la corrección señalada anteriormente, así como el tratamiento descrito en los Métodos para suavizar la zona de intersección. El valor más alto obtenido, en torno a 900 mm en las altas cumbres, fue limitado a 700 mm con el propósito de dar mayor realismo respecto a lo descrito para la zona. Las estaciones meteorológicas de mayor altitud alcanzaron los 4.570 msnm, por lo que, al igual que en la TMM, valores por sobre este nivel deberían ser tomados con precaución. Fuera de esta zona, se verificaron en la carta raster, tendencias señaladas en estudios anteriores, entre otras:

- Baja precipitación en la costa y la pampa, registrando en gran parte valores inferiores a los 5 mm anuales, siendo la depresión intermedia una zona particularmente seca por efecto de la estabilidad atmosférica del litoral y las barreras que imponen las cordilleras de las Costa y de los Andes a la humedad (CORFO, 1982).
- Crecimiento desde los 10 mm en la precordillera hasta cerca de 200 mm en el límite con el altiplano CORFO (1982).
- Gradiente de disminución de norte a sur en el altiplano, relacionado con el esquema zonal promedio de verano, en el que la parte norte queda bajo la influencia del flujo de aire húmedo del este, mientras que la parte sur se ubica bajo una zona donde la advección desde la cuenca amazónica es menos frecuente y por tanto la precipitación (Aceituno, 1993). De acuerdo a Garreaud *et al.* (2003), el punto de transición entre el flujo del este y el flujo del oeste de la media y alta tropósfera durante el verano austral, flujos que modulan el transporte de humedad hacia el altiplano, ocurre aproximadamente a los 20° S. Esto es coherente con la carta de la Figura 9, en la cual a partir de este paralelo los montos de PMA prácticamente no superan los 300 mm.
- Gradiente creciente de oeste a este en el altiplano, consistente con la fuente continental de humedad. El aire húmedo proveniente del Océano Pacífico es limitado, al igual que en la depresión intermedia, por la topografía y por la persistente inversión térmica (Garreaud *et al.*, 2003).

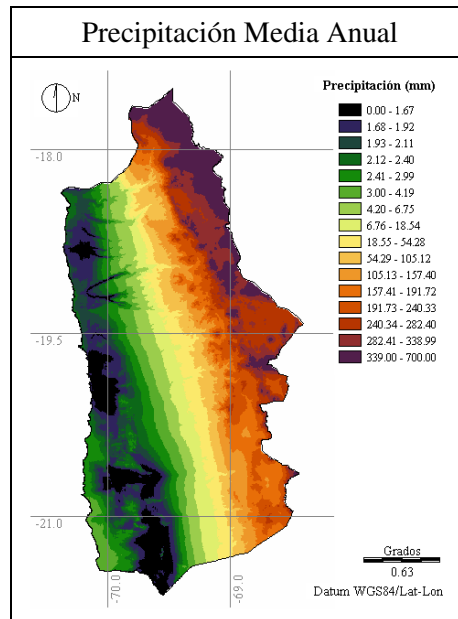


Figura 9. Distribución espacial, en formato raster, de precipitación media anual, obtenida a partir de modelos topoclimáticos. Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

La Figura 10 exhibe un contraste entre las isoyetas generadas a partir de los modelos topoclimáticos ajustados y aquellas presentadas en CORFO (1982)¹⁵, resultando evidentes algunos de los gradientes ya descritos. Si bien la Figura 10a no presenta las isoyetas correspondientes a la parte sur del litoral y de la depresión intermedia de la Figura 10b (2 y 1 mm respectivamente), éstas fueron sobrepuestas a la carta de PMA en formato raster encontrándose coincidencia en la localización geográfica, pero no en los montos, los que fueron algo superiores en la superficie raster generada. Otro aspecto que destaca entre las cartas, es la diferencia presentada en la zona limítrofe con Bolivia ubicada al norte del paralelo 19,5° S, donde la Figura 10b presenta un gradiente creciente hacia dicho lugar, mientras que la Figura 10a retrata un sector de montos inferiores de PMA respecto a sectores adyacentes. La estación meteorológica Colchane, ubicada en este lugar, da cuenta de un monto anual de 120 mm, lo que concuerda con la tendencia plasmada en la Figura 10a, aunque difiere en los montos. Al igual que en el caso de la temperatura, pese a las diferencias atribuibles a distintos factores tales como datos utilizados, metodología y escala, se aprecia similitud en las tendencias generales presentadas por ambos estudios.

¹⁵ Se usó esta carta para contrastar los resultados con trabajos de otras fuentes. Sin embargo, debe considerarse que la carta de CORFO (1982) junto con isoyetas de estudios preexistentes, fueron utilizadas para generar la carta de síntesis de isotermas señalada en los Métodos, a partir de la cual se generó la carta interpolada para la extracción de puntos.

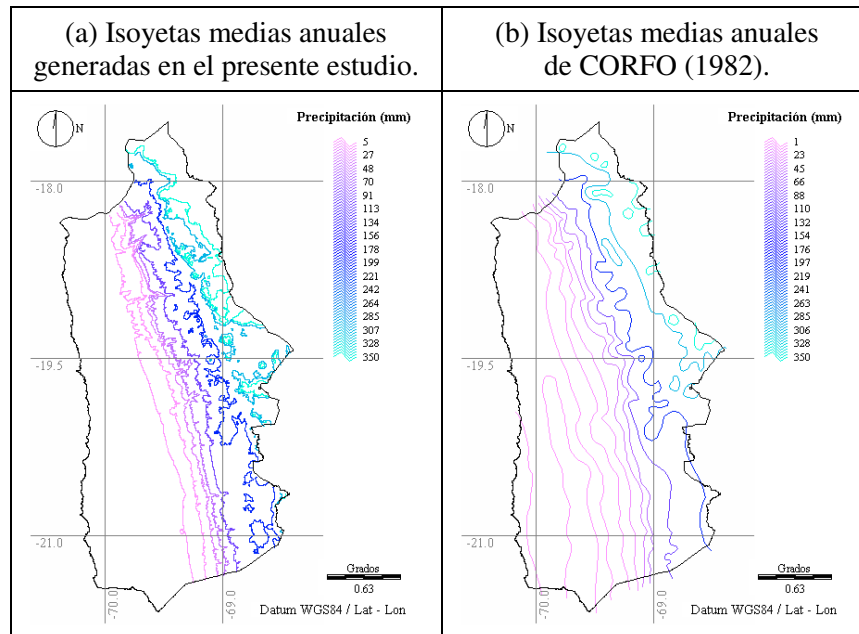


Figura 10. Isoyetas medias anuales generadas (a) en el presente estudio a partir de modelos topoclimáticos y (b) en el trabajo de CORFO (1982). Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

La Figura 11 presenta un contraste entre la superficie raster generada y la obtenida a partir del trabajo de Hijmans *et al.* (2005). Ambas se asemejan al presentar los patrones generales ya descritos, sin embargo exhiben también ciertas diferencias que es preciso atender. Una de ellas es el hecho de que la Figura 11b presenta valores nulos de la variable en parte del litoral y la depresión intermedia¹⁶, lo que si bien es coherente con el patrón general de bajas precipitaciones del sector, no se corresponde totalmente con lo señalado en diversas fuentes (estaciones, isoyetas de CORFO (1982) y superficie raster obtenida), que expresan montos bajos pero no nulos. Entre otras diferencias observadas, aun al llevar la superficie raster generada a la resolución del trabajo de Hijmans *et al.* (2005), se pueden señalar: mayores montos en el sector de altas precipitaciones, precordillera y altiplano, en la Figura 11a; mayores montos en sector de la depresión intermedia ubicado al norte del paralelo 19,5° S, en la Figura 11b; y diferencias notorias, a favor de la superficie raster generada, en las altas cumbres. Diferencias como esta última, pese a lo evidentes que puedan ser, son difíciles de evaluar con datos de terreno, dada la escasez de estaciones en estas zonas. Las Figuras 11c y 11d presentan un detalle de las figuras anteriores, donde se aprecia de mejor manera el efecto de la resolución. Respecto a datos puntuales disponibles, ambas superficies, en sus respectivas resoluciones, presentan afinidad con valores observados de estaciones meteorológicas de las regiones (Figura 12) lo que permite inferir, a partir de las diferencias señaladas entre las cartas raster, que la sola realización de este tipo de contraste, en trabajos de estas características, pueden conducir a ideas erradas respecto a su similitud.

¹⁶ Si bien por la escala numérica usada la franja de valores nulos no resulta tan evidente, ésta se extiende entre el límite sur regional y los 18,8° S, adyacente a franja inmediata al mar de 1-2 mm de PMA. A partir de su máximo ancho, alrededor de los 69,5° O y 20,4° S, ésta se estrecha hacia el sur y, más notoriamente, hacia el norte.

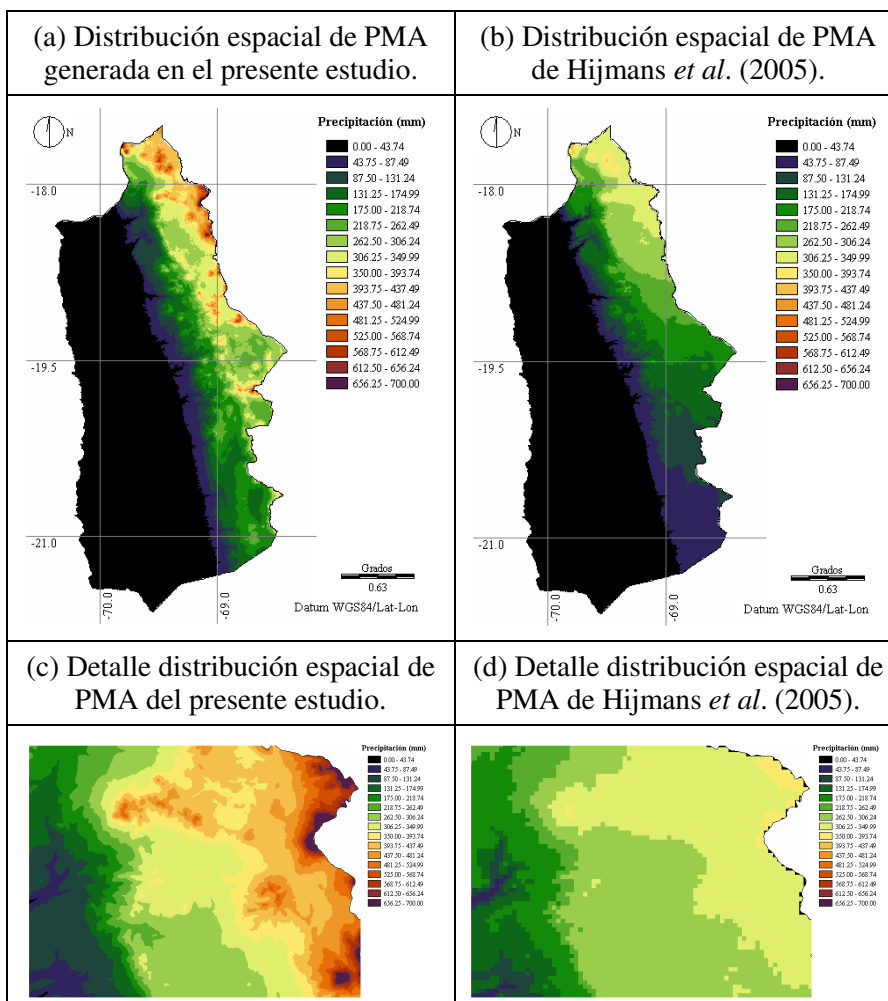


Figura 11. Distribución espacial, en formato raster, de precipitación media anual (PMA), proveniente de distintos estudios, en resoluciones de (a y c) 90 m y (b y d) 1 km. Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

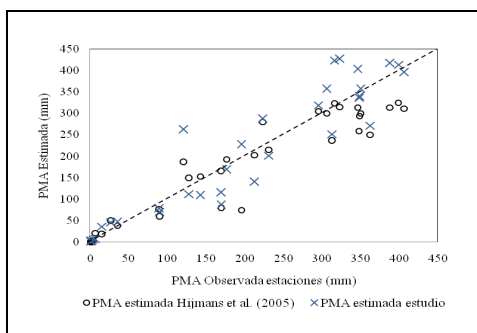


Figura 12. Diagrama de dispersión de datos de precipitación media anual (PMA) de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá ($n = 35$). En la abscisa valores observados de estaciones meteorológicas y en la ordenada valores extraídos de la superficie raster de Hijmans *et al.* (2005) y de aquella generada en la presente memoria. La línea 1:1 describe el calce perfecto.

Si bien la carta de Hijmans *et al.* (2005) se ha utilizado para contrastar los resultados obtenidos, la importancia de la misma como insumo para este estudio radica en su capacidad de retratar, junto a la superficie de PMA elaborada, la distribución de la variable durante el año. Puesto que todos los meses se basaron en la superficie de PMA generada, sólo se muestran en la Figura 13 las superficies raster de dos meses correspondientes a estaciones extremas. En esta se aprecia parte de las características indicadas en los climogramas de la Figura 2, en que las estaciones del litoral, si bien su baja PMA, presentan un régimen mas bien invernal, mientras que la precordillera y el altiplano presentan precipitación con régimen estival.

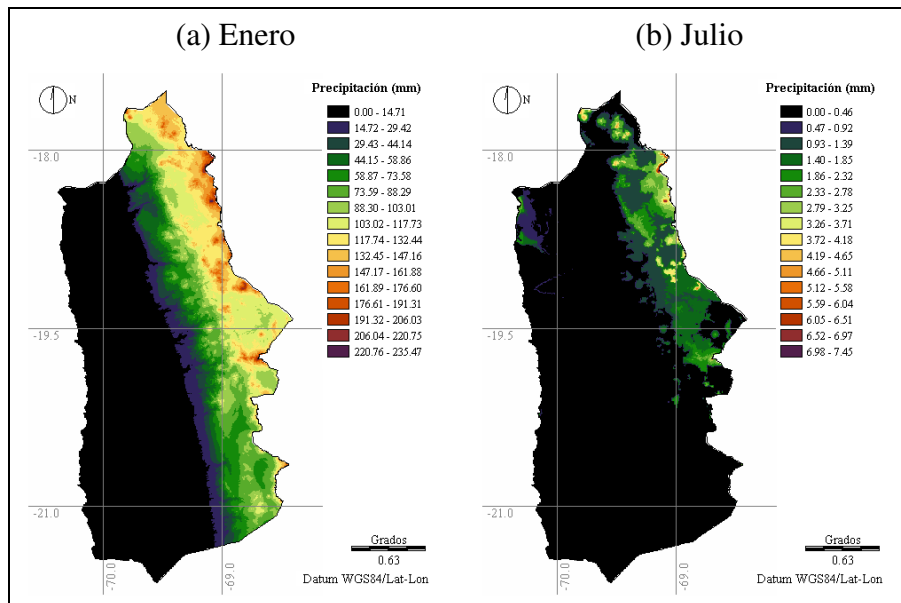


Figura 13. Distribución espacial, en formato raster, de precipitación media mensual de (a) enero y (b) julio, obtenida a partir de la carta de precipitación media anual generada en el estudio y cartas de aporte mensual generadas a partir del trabajo de Hijmans *et al.* (2005). Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Finalmente, sólo mencionar que aunque la metodología utilizada para estimar la PMM presentó una mejora respecto a lo que hubiese sido la estimación de un solo coeficiente global para el área, también presentó ciertas falencias como la pérdida de información de parte de la zona litoral y depresión intermedia (zona en que la superficie raster de Hijmans *et al.* (2005) presenta valores nulos de PMA), lo que pese a no tener gran relevancia para el presente estudio, puesto que sólo se contempla la utilización de una parte del altiplano de la carta generada, podría ser limitante para otras aplicaciones.

Radiación Solar. Un modelo topoclimático correspondiente a la RSMA fue generado para la zona. Este, junto a sus coeficientes, fue significativo al nivel de confianza definido. Como indica el R^2_{aj} , el modelo explicó un 92,2% de la variabilidad espacial de la RSMA, y presentó un ES de la estimación de $4,9 \text{ kcal cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$. El diagrama de dispersión, Figura

14, arrojó un buen ajuste entre los valores observados de estaciones meteorológicas y aquellos predichos para las mismas. Las variables independientes del modelo y sus respectivos coeficientes se encuentran en el Cuadro 7, en el cual es posible apreciar la importancia de la LAT y la LON presentes de distintas formas en gran parte de las variables explicativas. En el Cuadro 41 del Apéndice II se detalla el análisis de varianza y las estadísticas de regresión del modelo.

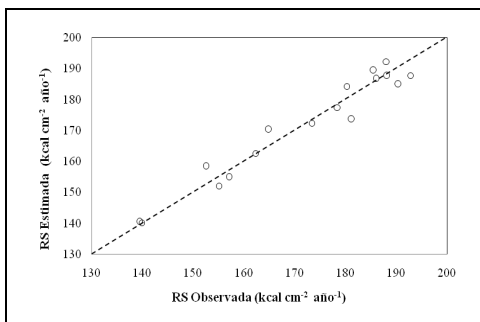


Figura 14. Diagrama de dispersión de datos de radiación solar (RS) media anual de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, y de zona aledaña ($n = 17$). En la abscisa valores observados de estaciones meteorológicas y en la ordenada valores estimados a partir de modelo topoclimático. La línea 1:1 describe el calce perfecto.

Cuadro 7. Coeficientes obtenidos para el modelo topoclimático de radiación solar media anual, ajustado para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá ($n = 17$).

Coeficientes		Valor
b_0	intercepto	-1.253,110
b_1	LON	10,029
b_2	LAT ²	-4,836
b_3	LAT·LON	2,885
b_4	LAT·ALT	$-4,855 \cdot 10^{-4}$
b_5	LON·DL	-0,012
b_6	ALT·DL	$-9,338 \cdot 10^{-5}$

Para los modelos y sus respectivos coeficientes: $P < 0,05$

En la Figura 15 se puede observar la carta obtenida a partir del modelo topoclimático. En esta se distingue una distribución longitudinal, con valores crecientes hacia el este desde el extremo sur de las regiones hasta aproximadamente los 19° S, paralelo a partir del cual la distribución señalada se repliega hacia el este dando lugar a una distribución en franjas latitudinales con valores decrecientes hacia el norte. Se observan además, elementos de la topografía como cauces de ríos que se extienden a través del espacio con valores más bajos de RSMA. Es posible constatar también ciertas tendencias que han sido documentadas, como la vinculación de la variable con la nubosidad, lo que implica mayores montos en la depresión intermedia debido a la presencia de cielos limpios la mayor parte del año (CORFO, 1982; Huber, 1977); y disminución de la radiación hacia el norte y la costa, a partir de un núcleo de valores máximos existente en torno a Calama (Huber, 1977).

Como se observa en la Figura 15, la imagen de RSMA no presenta contrastes tan notorios entre las formas del relieve, apreciándose una distribución espacial más “lisa” que la observada en la precipitación y la temperatura. Lo anterior estaría indicando la importancia de la localización geográfica (LAT, LON, DL) en la distribución espacial de RSMA, y en menor medida la del relieve, representado por la ALT. Esto último debería ser tomado con precaución en el entendido que el modelo considera una cantidad limitada de variables independientes, quedando fuera variables del relieve tales como exposición y pendiente que se sabe influyen en la distribución espacial de la radiación (Romero, 1985).

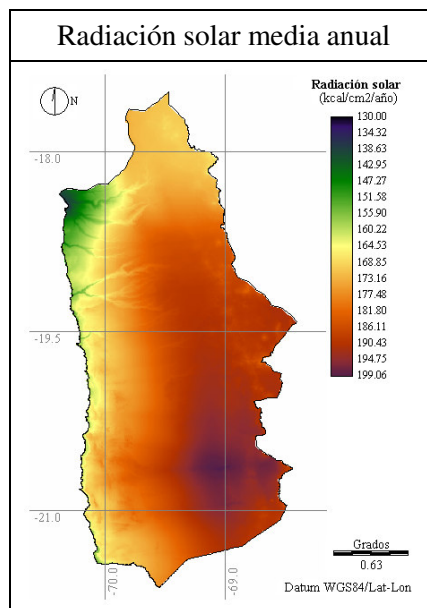


Figura 15. Distribución espacial, en formato raster, de radiación solar media anual, obtenida a partir de modelo topoclimático. Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

En la Figura 16 se encuentran cartas de isótopas de RSMA provenientes tanto de la superficie raster generada en este estudio como en otras fuentes. Para todas se aprecian valores más bajos en el litoral, zona que presenta alta frecuencia de nubosidad. Los mayores valores de RSMA son aproximadamente coincidentes apreciándose en la parte sur de las regiones, en una zona por sobre los 1.200 msnm. Pese a esto, existen también diferencias evidentes tales como la distribución de las franjas, en la que las Figuras 16a y 16c presentan mayor similitud. Como se ha mencionado anteriormente, algunas diferencias pueden estar obedeciendo a diversos factores que caracterizan a los estudios particulares.

Finalmente, en el Cuadro 8 se exhiben los coeficientes aporte mensual a la RSMA, los que fueron utilizados para, en conjunto con la carta raster de RSMA, generar las cartas de RSMM (las que no se incluyen por ser iguales a la carta de RSMA variando sólo en las proporciones de sus valores a lo largo del año).

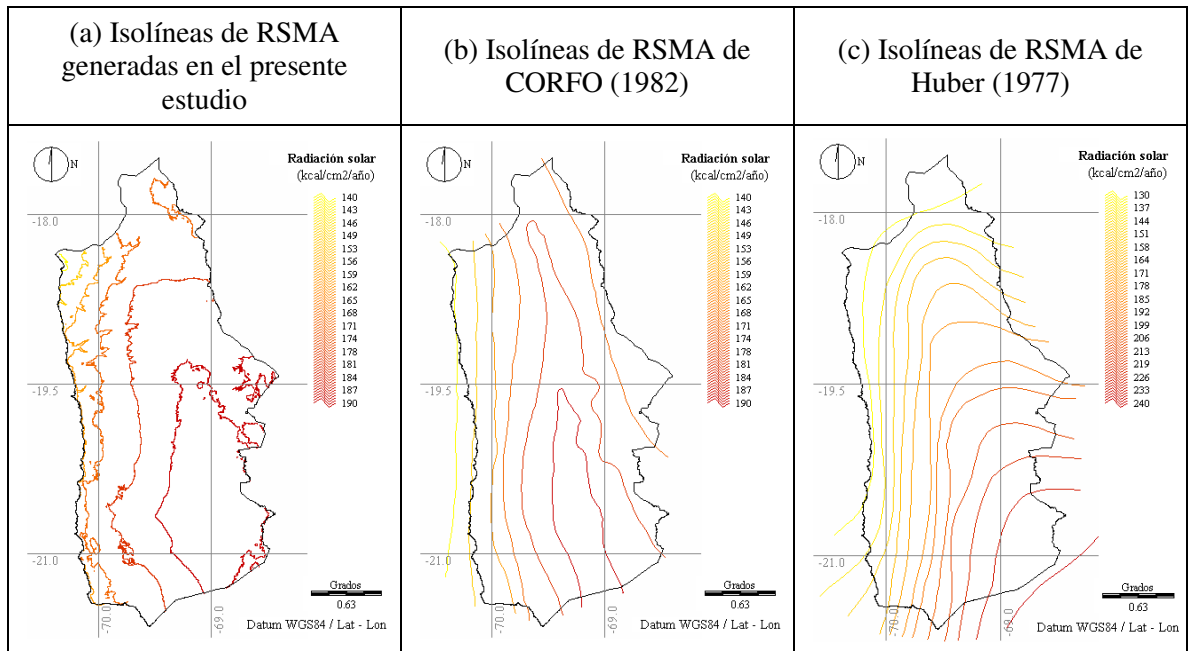


Figura 16. Isolíneas de radiación solar media anual, RSMA, generadas (a) en el presente estudio a partir de modelos topoclimáticos, (b) en el trabajo de CORFO (1982) y (c) en el trabajo de Huber (1977). Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Cuadro 8. Coeficientes de aporte mensual a la radiación solar media anual. Regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Mes	Coefficiente
Enero	0,101
Febrero	0,086
Marzo	0,090
Abril	0,080
Mayo	0,070
Junio	0,059
Julio	0,063
Agosto	0,072
Septiembre	0,080
Octubre	0,096
Noviembre	0,099
Diciembre	0,104
Total	1,000

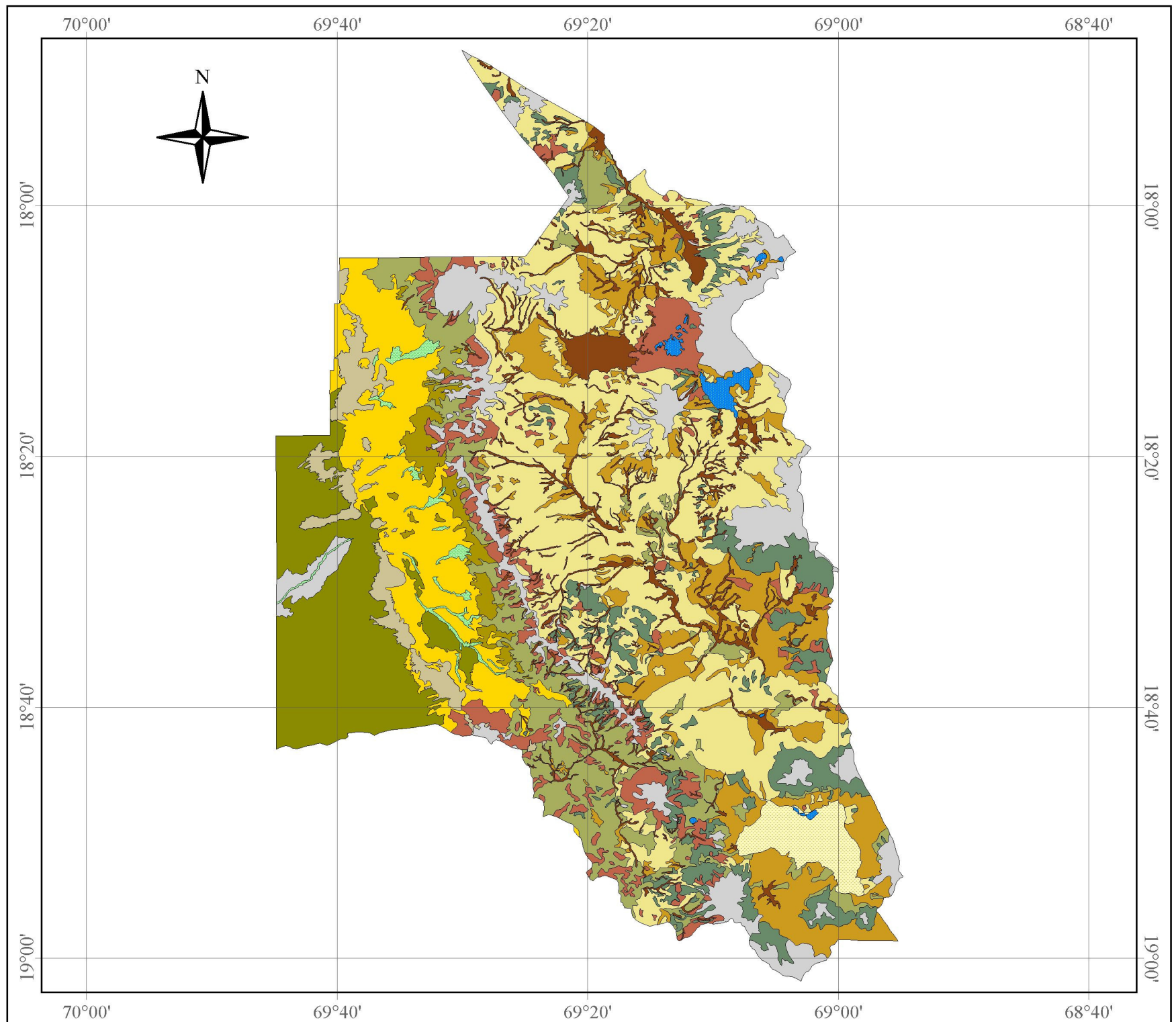
Objetivo Específico 2

Asociaciones vegetales cartografiadas















La carta obtenida a partir del proceso de digitalización y verificación de la carta de Hernández (1980), correspondiente a 674.000 has, se puede apreciar en escala inferior a la original¹⁷, en la Figura 17 (página 56). Puesto que se trata de grandes unidades, las diferencias con la carta de origen no fueron tan patentes, sin embargo es importante señalar la mejora en la precisión de los límites de las unidades de la mano del uso de tecnologías SIG y percepción remota. Las características de la carta son las propias de la zona, en la que destaca una superficie importante cubierta por asociaciones de pastos en “champa”, y secundariamente otras asociaciones, dentro de las que se incluyen los bofedales, ubicados en zonas depresionales húmedas o con agua superficial. Las zonas con escasa o nula vegetación correspondieron principalmente a cumbres situadas por sobre los 4.500 msnm.

¹⁷ En la Figura 17, no obstante la escala utilizada para su presentación en este documento, el tamaño de la MUC corresponde a la escala original, es decir, 1:250.000.

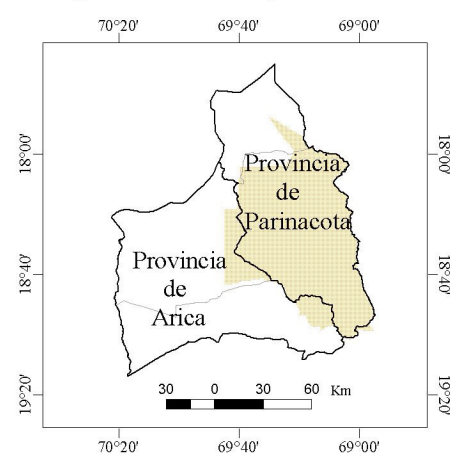
Carta de asociaciones vegetales del área de estudio Provincia de Parinacota, Región de Arica y Parinacota



Simbología

	Cultivo
	Escasa o nula vegetacion
	Lagos o lagunas
	Salar
	<i>A. compacta</i> - <i>F. orthophylla</i> - <i>P. quadrangularis</i>
	<i>Baccharis</i> spp. - <i>Fabiana</i> spp. - <i>Senecio</i> spp.
	<i>F. deserticola</i> - <i>Atriplex</i> sp. - <i>E. rupestris</i>
	<i>F. orthophylla</i> - <i>D. breviaristata</i>
	<i>F. orthophylla</i> - <i>D. breviaristata</i> - <i>P. lucida</i>
	<i>F. orthophylla</i> - <i>P. quadrangularis</i> - <i>D. breviaristata</i>
	<i>O. andina</i> - <i>D. curvula</i> - <i>W. pygmaea</i>
	<i>P. besseri</i> - <i>F. deserticola</i>
	<i>P. tarapacana</i> - <i>F. orthophylla</i> - <i>A. compacta</i>
	<i>Senecio</i> sp. - <i>C. brevistylus</i> - <i>O. leucotrichus</i>

Región de Arica y Parinacota



Escala 1:750.000

10 0 10 20 Km

Datum: Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)

Coordenadas geográficas Latitud-Longitud

Figura 17. Carta de asociaciones vegetales del área de estudio elaborada en base al trabajo de Hernández (1980), Troncoso (1982) y a imágenes satelitales Landsat TM de 2008.

Atributos de la vegetación inventariados y estimados

Atributos por asociación. Los Cuadros 9 al 18 dan cuenta de la caracterización de las asociaciones vegetales presentes en la cartografía de la Figura 17, la que incluye la composición botánica, la respuesta ecológica al pastoreo y la concentración de la energía metabolizable de las especies que las conforman. Como era de esperar, la asociación *Oxychloe andina* – *Deyeuxia curvula* – *Werneria pygmaea* presentó la mayor cantidad de especies deseables y, secundariamente, aquellas asociaciones con dominancia de especies de pajonal. Asociaciones correspondientes a tolares, llaretales y queñoales fueron de bajo interés pratense, lo que estuvo dado por una mayor participación de especies clasificadas como “indeseables”. El porcentaje de especies “deseables” y “menos deseables” en una asociación es determinante para la estimación de la condición de las praderas, por lo cual es posible, a partir de esto, tener cierta idea de la CC del área de estudio que se presenta más adelante.

Es importante hacer hincapié en el hecho de que la respuesta ecológica al pastoreo es funcional a la especie animal en estudio, por lo que la categorización de una especie vegetal como “indeseable” no quita la relevancia que ésta pueda tener en otros términos. Tal es el caso de unidades de Queñoa, especie arbórea del género *Polylepis*, que posee un gran valor paisajístico, de reparo y sombreadero, como generador de nichos ecológicos, además de encontrarse asociada a la existencia de cérvidos y diversas especies de aves (CORFO, 1982; Jacksic *et al.*, 1997). Asimismo, asociaciones precordilleranas, pese a la importante presencia de especies “indeseables”, han sido señaladas como hábitat de guanaco por Hernández (1980).

Cuadro 9. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Festuca orthophylla* – *Deyeuxia breviaristata* – *Parastrephia lucida*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Festuca orthophylla</i> – <i>Deyeuxia breviaristata</i> – <i>Parastrephia lucida</i> (Troncoso, 1982) / Asociación <i>Parastrephia lepidophylla</i> – <i>Festuca orthophylla</i> (Hernández, 1980)		
Superficie	175.045,7 has (26% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano / Pajonal - tolar		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Festuca orthophylla</i> Pilger	41,8	Menos deseable	4,5
<i>Deyeuxia breviaristata</i> Wedd.	22,7	Deseable	5,9
<i>Parastrephia lucida</i> (Meyen) Cabrera *	17,3	Menos deseable	7,1
<i>Pycnophyllum bryoides</i> (Phil.) Rohrbach	6,7	Indeseable	-
<i>Tetraglochin alatum</i> (Gill. ex Hook. & Arn.) Kuntze *	2,7	Indeseable	-
<i>Werneria aretioides</i> Wedd.	2,6	Indeseable	-
<i>Parastrephia quadrangularis</i> (Meyen) Cabrera *	2,5	Menos deseable	7,0
<i>Stipa nardoides</i> (Phil.) Hackel ex Hitchc.	2,3	Deseable	3,1
<i>Adesmia</i> sp. *	0,8	Menos deseable	9,0
<i>Astragalus</i> cfr. <i>pusillus</i> Vogel	0,3	Indeseable	-
<i>Nototriche</i> spp.	0,3	Deseable	7,5
<i>Caiophora rosulata</i> (Wedd.) Urb. & Gilg subsp. <i>rosulata</i>	0,1	Indeseable	-
Total	100,0		

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como $MD = 0,17 \cdot DIGIV - 2$; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 10. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Festuca orthophylla* – *Deyeuxia breviaristata*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Festuca orthophylla</i> – <i>Deyeuxia breviaristata</i> (Hernández, 1980; Troncoso, 1982)		
Superficie	78.384,5 has (11,6% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano / Pajonal		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Festuca orthophylla</i> Pilger	45,8	Menos deseable	4,5
<i>Deyeuxia breviaristata</i> Wedd.	26,1	Deseable	5,9
<i>Parastrephia quadrangularis</i> (Meyen) Cabrera *	6,9	Menos deseable	7,0
<i>Pycnophyllum bryoides</i> (Phil.) Rohrbach	6,2	Indeseable	-
<i>Parastrephia lucida</i> (Meyen) Cabrera *	6,0	Menos deseable	7,1
<i>Tetraglochin alatum</i> (Gill. ex Hook. & Arn.) Kuntze *	3,9	Indeseable	-
<i>Werneria aretioides</i> Wedd.	2,0	Indeseable	-
<i>Stipa nardoides</i> (Phil.) Hackel ex Hitchc.	1,4	Deseable	3,1
<i>Astragalus</i> cfr. <i>pusillus</i> Vogel	0,6	Indeseable	-
<i>Nototriche</i> spp.	0,5	Deseable	7,5
<i>Adesmia</i> sp. *	0,5	Menos deseable	9,0
<i>Caiophora rosulata</i> (Wedd.) Urb. & Gilg subsp. <i>rosulata</i>	0,1	Indeseable	-
Total	100,0		

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 11. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Festuca orthophylla* – *Parastrephia quadrangularis* – *Deyeuxia breviaristata*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Festuca orthophylla</i> – <i>Parastrephia quadrangularis</i> (Hernández, 1980; Troncoso, 1982)		
Superficie	64.620,2 has (9,6% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano / Pajonal - tolar		
	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
Especie vegetal	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Festuca orthophylla</i> Pilger	57,5	Menos deseable	4,5
<i>Parastrephia quadrangularis</i> (Meyen) Cabrera *	27,0	Menos deseable	7,0
<i>Deyeuxia breviaristata</i> Wedd.	15,1	Deseable	5,9
<i>Nototriche</i> spp.	0,2	Deseable	7,5
<i>Pycnophyllum bryoides</i> (Phil.) Rohrbach	0,2	Indeseable	-
	Total	100,0	

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como $MD = 0,17 \cdot DIGIV - 2$; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 12. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Oxychloe andina* – *Deyeuxia curvula* – *Werneria pygmaea*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Oxychloe andina</i> – <i>Werneria pygmaea</i> – <i>Deyeuxia curvula</i> (Troncoso, 1982) / Asociación <i>Oxychloe andina</i> (Hernández, 1980)		
Superficie	37.059,9 has (5,5% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Bofedal		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Oxychloe andina</i> Phil.	21,7	Menos deseable	5,4
<i>Deyeuxia curvula</i> Wedd.	14,0	Menos deseable	4,0
<i>Werneria pygmaea</i> Gill. ex Hook. & Arn.	13,1	Deseable	8,0
<i>Carex incurva</i> Lightf.	11,0	Deseable	8,9
<i>Festuca rigescens</i> (J. Presl) Kunth	6,5	Menos deseable	5,5
<i>Hypochoeris taraxacoides</i> (Walp.) Benth.	5,4	Deseable	10,2
<i>Scirpus</i> sp.	4,4	Deseable	9,1
<i>Parastrephia lucida</i> (Meyen) Cabrera *	4,3	Menos deseable	7,1
<i>Deyeuxia velutina</i> Nees & Meyen	3,8	Menos deseable	4,3
<i>Werneria spathulata</i> Wedd.	3,0	Deseable	8,0
<i>Lilaeopsis macloviana</i> (Gand.) A. W. Hill	2,6	Deseable	8,7
<i>Reicheella andicola</i> (Phil.) Pax	2,0	Indeseable	-
<i>Distichia muscoides</i> Nees et Meyen	1,9	Deseable	7,8
<i>Lobelia oligophylla</i> (Wedd.) Lammers	1,2	Indeseable	-
<i>Werneria pinnatifida</i> Remy	1,2	Deseable	8,0
<i>Deyeuxia jamesonii</i> Steudel	1,1	Menos deseable	4,0
<i>Senecio pulviniformis</i> Hieron.	0,8	Indeseable	-
<i>Werneria wedellii</i> Phil.	0,7	Indeseable	-
<i>Poa</i> sp.	0,6	Deseable	6,7
<i>Scirpus macrolepis</i> Phil.	0,4	Deseable	9,1
<i>Gentiana prostrata</i> Haenke	0,1	Deseable	7,5
<i>Lachemilla diplophylla</i> (Diels) Rothm.	0,1	Deseable	6,9
<i>Agrostis</i> sp.	0,1	Deseable	5,6
Total	100,0		

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 13. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Polylepis tarapacana* – *Festuca orthophylla* – *Azorella compacta*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Polylepis tarapacana</i> – <i>Festuca orthophylla</i> (Troncoso, 1982) / Asociación <i>Polylepis tarapacana</i> – <i>Festuca sp.</i> (Hernández, 1980)		
Superficie	42.807,4 has (6,4% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano/Queñoal		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Polylepis tarapacana</i> Phil. *	47,0	Indeseable	-
<i>Festuca orthophylla</i> Pilger	21,7	Menos deseable	4,5
<i>Azorella compacta</i> Phil. *	12,3	Indeseable	-
<i>Parastrephia quadrangularis</i> (Meyen) Cabrera *	10,1	Menos deseable	7,0
<i>Deyeuxia sp.</i>	3,7	Menos deseable	5,9
<i>Pycnophyllum bryoides</i> (Phil.) Rohrbach	3,3	Indeseable	-
<i>Parastrephia lucida</i> (Meyen) Cabrera *	1,1	Menos deseable	7,1
<i>Senecio graveolens</i> Wedd. *	0,7	Indeseable	-
Total	100,0		

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 14. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Azorella compacta* – *Festuca orthophylla* – *Parastrephia quadrangularis*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Laretia compacta</i> – <i>Festuca orthophylla</i> – <i>Parastrephia quadrangularis</i> (Troncoso, 1982) / Asociación <i>Laretia compacta</i> – <i>Parastrephia quadrangularis</i> (Hernández, 1980)		
Superficie	40.994,2 has (6,1% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano/Llaretal		
	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
Especie vegetal	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Azorella compacta</i> Phil. *	34,5	Indeseable	-
<i>Festuca orthophylla</i> Pilger	23,9	Menos deseable	4,5
<i>Parastrephia quadrangularis</i> (Meyen) Cabrera *	18,9	Menos deseable	7,0
<i>Pycnophyllum bryoides</i> (Phil.) Rohrbach	7,2	Indeseable	-
<i>Polylepis tarapacana</i> Phil. *	6,6	Indeseable	-
<i>Poa</i> sp.	4,3	Deseable	5,9
<i>Stipa leptostachya</i> Griseb.	2,1	Indeseable	-
<i>Parastrephia lucida</i> (Meyen) Cabrera *	1,8	Menos deseable	7,1
<i>Deyeuxia breviaristata</i> Wedd.	0,5	Deseable	5,9
	Total	100,0	

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 15. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Baccharis spp.* – *Fabiana spp.* – *Senecio spp.*

Nombres anteriores	Asociación <i>Fabiana spp.</i> – <i>Senecio spp.</i> – <i>Baccharis spp.</i> (Troncoso, 1982) / Asociación <i>Fabiana deserticola</i> – <i>Fabiana viscosa</i> y Asociación <i>Senecio rosmarinus</i> – <i>Balbisia stickinii</i> (Hernández, 1980)		
Superficie	58.517,4 has (8,7% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano/Tolar de precordillera		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Baccharis spp.</i> *	27,1	Indeseable	-
<i>Fabiana spp.</i> *	23,0	Indeseable	-
<i>Senecio spp.</i> *	17,7	Indeseable	-
<i>Balbisia stichkinii</i> Ricardi *	10,9	Indeseable	-
<i>Stipa rupestris</i> Phil.	10,4	Menos deseable	3,1
<i>Spergularia spp.</i>	7,6	Menos deseable	7,0
<i>Opuntia sp.</i>	1,2	Indeseable	-
<i>Senna birostris</i> (Domb. ex Vogel) Irw. & Barneby var. <i>atacamensis</i> *	0,7	Indeseable	-
<i>Ephedra breana</i> Phil. *	0,6	Menos deseable	2,9
<i>Maihueniopsis boliviana</i> (Salm-Dyck) R. Kiesling ssp. <i>echinacea</i> (F. Ritter) Faúndez & R. Kiesling	0,3	Indeseable	-
<i>Tagetes multiflora</i> Kunth	0,3	Indeseable	-
Total	100,0		

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 16. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Polylepis besseri* – *Fabiana deserticola*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Polylepis sp.</i> – <i>Fabiana deserticola</i> (Hernández, 1980; Troncoso, 1982)		
Superficie	11.199,7 has (1,7% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano/Queñoal de precordillera		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Polylepis besseri</i> Hieron. *	59,68	Indeseable	-
<i>Fabiana deserticola</i> Reiche *	38,92	Indeseable	-
<i>Chuquiraga rotundifolia</i> Wedd. *	0,60	Indeseable	-
<i>Adesmia horrida</i> Gillies ex Hook. & Arn. *	0,58	Menos deseable	9,0
<i>Mutisia acuminata</i> Ruiz & Pav. var. <i>acuminata</i> *	0,06	Indeseable	-
<i>Diplostephium cinereum</i> Cuatr. *	0,04	Indeseable	-
<i>Loasa urens</i> Jacq.	0,04	Indeseable	-
<i>Maihueniopsis boliviana</i> (Salm-Dyck) R. Kiesling ssp.	0,04	Indeseable	-
<i>echinacea</i> (F. Ritter) Faúndez & R. Kiesling	0,04	Indeseable	-
<i>Baccharis tola</i> Phil. *	0,02	Indeseable	-
Total	100,00		

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 17. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Fabiana deserticola* – *Atriplex sp.* – *Ephedra rupestris*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Fabiana deserticola</i> – <i>Atriplex sp.</i> (Hernández, 1980) , no considerada en estudio de Troncoso (1982)		
Superficie	17.453 has (2,6% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano/Tolar de precordillera		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Fabiana deserticola</i> Reiche *	51,6	Indeseable	-
<i>Atriplex sp.</i> *	31,0	Indeseable	-
<i>Ephedra rupestris</i> Benth. *	17,2	Menos deseable	2,9
<i>Plantago sp.</i>	0,1	Deseable	7,5
<i>Tagetes multiflora</i> Kunth	0,1	Indeseable	-
	Total	100,0	

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Cuadro 18. Tipo de pradera, especies vegetales, respuesta ecológica al pastoreo y concentración de energía metabolizable (MD) de las especies palatables de la asociación *Senecio sp.* – *Corryocactus brevistylus* – *Oreocereus leucotrichus*.

Nombres anteriores	Asociación <i>Senecio adenophyllus</i> – <i>Eulychnia aricensis</i> (Hernández, 1980), no considerada en estudio de Troncoso (1982)		
Superficie	64.098,9 has (9,5% del área cartografiada)		
Tipo de pradera	Secano/Tolar – cactal de precordillera		
Especie vegetal	Participación	Respuesta ecológica al pastoreo	MD ^{1/}
	%	-	MJ kg ⁻¹
<i>Senecio sp.</i> *	60,0	Indeseable	-
<i>Corryocactus brevistylus</i> (K. Schum. ex Vaupel) Britton & Rose	22,0	Indeseable	-
<i>Oreocereus leucotrichus</i> (Phil.) Wagenkn. ex F. Ritter	12,7	Indeseable	-
<i>Browningia candelaris</i> (Meyen) Britton et Rose	4,7	Indeseable	-
<i>Atriplex sp.</i> *	0,7	Indeseable	-
	Total	100,0	

^{1/} En recopilación y en el presente estudio estimada como MD = 0,17 · DIGIV – 2; donde MD es la concentración de energía metabolizable y DIGIV la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (SCA, 1990).

* Especies leñosas.

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de Hernández (1980); Troncoso (1982); Lailhacar (1990); Ahumada y Faúndez (2001); Castellaro (2003a y b) y Benítez *et al.* (2006).

Índice de área foliar. La superficie raster de *IAF*, en la resolución del estudio, se encuentra en la Figura 18. En esta se aprecia un claro contraste entre unidades correspondientes a bofedal y el resto de las cubiertas, lo que es esperable considerando el hecho de que los mayores valores de *IAF*, de la mano de los mayores valores de *NDVI*, caracterizan vegetación vigorosa y, por el contrario, los valores bajos caracterizan vegetación enferma, senescente o con poca densidad.

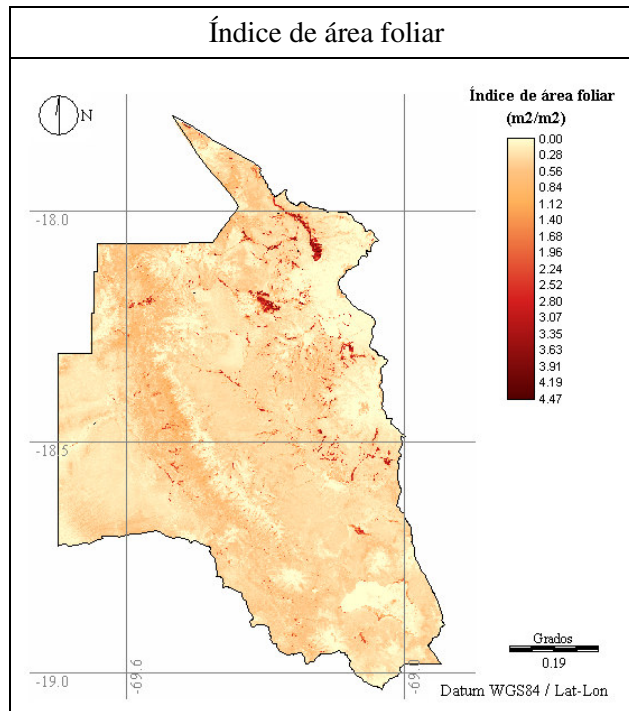


Figura 18. Distribución espacial, en formato raster, del índice de área foliar del área de estudio, obtenida en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de imágenes Landsat 5 TM del año 2008.

Referente a los montos, se tiene que las unidades tipificadas como *Oxychloe andina* – *Deyeuxia curvula* – *Werneria pygmaea* y como terrenos de cultivo presentaron los mayores valores, acaparando gran parte de píxeles con *IAF* superior a $0,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. De estas, las primeras presentaron los valores máximos del índice, en torno a $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, destacando las unidades ubicadas en la parte norte del área de estudio, Caquena y alrededores, zona que presentó además altos montos de precipitación (Figura 9). Valores entre $0,75$ y algo superiores a $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ fueron observados en algunas zonas correspondientes a unidades de *Polylepis besseri* – *Fabiana deserticola*, en la ladera occidental de la cordillera. Valores en el rango $0,5 - 0,75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, se observaron mayormente en sectores de precordillera al interior de unidades de tolar, pajonal, praderas mixtas y queñoal. El resto del área presentó, por lo general, valores inferiores a $0,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, con una tendencia aproximadamente decreciente hacia la precordillera.

Si bien no se encontraron mediciones de *IAF* para el área de estudio, se presentan a continuación, algunos resultados obtenidos en otras zonas, a fin de tener una referencia de este índice para pastizales. Luo *et al.* (2004) estimaron el *IAF* en diversos sitios a lo largo de un trasecto en el *Plateau* Tibetano, durante julio y septiembre de 1999 y 2000, en base a la biomasa foliar y coeficientes de transformación según el tipo de vegetación, obteniendo en la estepa de *Stipa* alpina (“alpine *Stipa*”, “steppe”), y en la pradera de *Kobresia* alpina (“alpine *Kobresia*”, “meadows”), altitudes sobre 4.000 msnm, valores entre 0,63 y 1,19 ha ha⁻¹, y entre 0,81 y 1,66 ha ha⁻¹, respectivamente. En similares altitudes, para vegetación arbustiva, obtuvieron valores entre 1,85 – 3,83 ha ha⁻¹. Wilson & Meyers (2007) estimaron el *IAF* a lo largo del año, entre 2002 y 2005, en diferentes tipos de vegetación en E.E.U.U., a partir de la radiación medida por sensores ubicados en torres de flujo y un modelo exponencial de *IAF* basado en el *NDVI*; lo que arrojó valores máximos en torno a 4,5 m² m⁻² para cultivos, 2 – 4 m² m⁻² para pastizales temperados (“temperate grasslands”), y 0,6 m² m⁻² para pastizales desérticos (“desert grasslands”), todos ubicados bajo 1.000 msnm, con presencia de precipitaciones medias anuales sobre 300 mm, diferentes prácticas de manejo y condiciones climáticas.

A partir de lo mencionado en los párrafos anteriores, es posible advertir que tanto el contraste observado entre bofedales y las praderas zonales, como los montos obtenidos del índice serían razonables. Sin embargo, es importante señalar que para una adecuada evaluación de los resultados es preciso contar con datos de terreno, los que permitirían dilucidar la medida en que las imágenes satelitales y la función utilizada dan cuenta del *IAF* en el área de estudio. En este sentido, especial atención debería tenerse con los valores obtenidos para praderas de secano, puesto que dentro del rango de *NDVI* utilizado (0,0 – 0,96), los valores bajo 0,1, correspondieron principalmente a este tipo de praderas siendo dichos valores inferiores a los umbrales mínimos de *NDVI* reportados para vegetación por otros autores (entre 0,15 y 0,2) (Sobrino, 2000; Wilson & Meyers, 2007).

Objetivo Específico 3

Producción de materia seca estimada

La Figura 19 presenta la superficie raster obtenida de producción anual de MS. En términos mensuales es posible señalar que, entre mayo y octubre, ambos inclusive, la producción de MS presentó valores nulos, siendo la producción de MS anual fruto de los seis meses restantes, dentro de los que destacó enero, febrero y marzo. En cuanto a la producción de MS anual, tal como se aprecia en la Figura 19, los mayores valores se obtuvieron para las unidades correspondientes a bofedal y zonas adyacentes, y los menores valores para unidades más alejadas de éstos¹⁸.

¹⁸ Cabe mencionar que unidades tipificadas como cultivos, salar, lagos o lagunas y escasa o nula vegetación no fueron considerados para la estimación del producción de MS, por lo que presentan valores nulos.

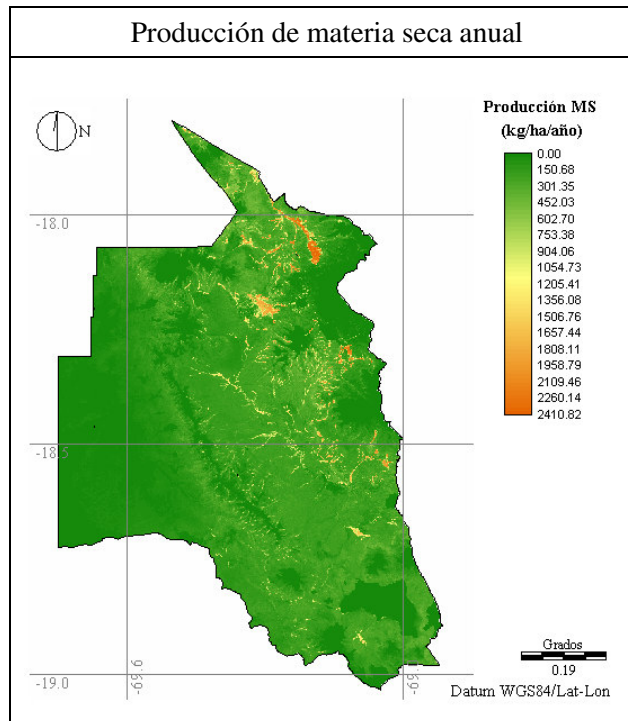


Figura 19. Distribución espacial, en formato raster, de producción de materia seca (MS) anual del área de estudio, obtenida en función de cartas raster de variables climáticas, asociaciones vegetales e índice de área foliar.

Referente a los montos, producciones de MS anual sobre 600 kg ha^{-1} correspondieron mayormente a bofedales, destacando la unidad ubicada en la zona de Caquena con montos en torno a 2.000 kg ha^{-1} en parte importante de su superficie. Con valores entre 300 y 600 kg ha^{-1} , se observaron algunas zonas al interior de unidades de pajonal y pajonal – tolar ubicadas al oeste del bofedal de Caquena, al suroeste del lago Chungará, y en sectores aledaños al Salar de Surire. El resto del área presentó en general valores bajo los 300 kg ha^{-1} , con un marcado descenso hacia la precordillera, de la mano del incremento de la restricción hídrica y del gradiente aproximadamente decreciente del *IAF*. Montos bajo 150 kg ha^{-1} se observaron en la precordillera a partir del límite oriental de la asociación *Baccharis spp.* – *Fabiana spp.* – *Senecio spp.*, límite coincidente aproximadamente con la isoterma anual de 8 °C y la isoyeta anual de 150 mm , ambas de los modelos topoclimáticos.

Si bien no se dispone de mediciones de producción de MS para estas praderas, trabajos realizados en módulos de la provincia de Parinacota, Castellaro (2003a) y Castellaro (2003b), haciendo uso del mismo modelo de simulación utilizado en el presente estudio, arrojaron periodos de crecimiento de siete y 11 meses respectivamente, concentrados en la época estival. Los valores de producción anual de MS, por su parte, se encontraron entre 860 y 1054 kg ha^{-1} para pajonales, 730 y 1073 kg ha^{-1} para unidades mixtas de tolar y pajonal, entre 532 y 657 kg ha^{-1} para tolares, y entre 1287 y 2292 kg ha^{-1} para bofedales. Dentro de éstos últimos, aquellos con mayores productividades presentaron en general condiciones excelentes, coberturas sobre el 90% y cursos de agua superficiales.

Para asociaciones correspondientes a queñoal, llaretal y tolar de precordillera se tienen, para el área de estudio, mediciones de biomasa en pie cosechable por herbívoros (Troncoso, 1982), las que se indican sólo a modo de referencia puesto que, como se ha dicho, no constituyen una medida de la productividad. Las mediciones, obtenidas a partir de la cosecha a nivel del suelo de cuadrantes de vegetación, señalan valores promedio (*mínimo - máximo de muestreos*) de 1.073 (138 – 2.045) kg ha⁻¹, 862 (230 – 2265) kg ha⁻¹ y 954 (500 – 1.712) kg ha⁻¹, para queñoal, llaretal y tolar de precordillera, respectivamente.

De acuerdo a lo señalado en los párrafos anteriores, se verifican tanto el crecimiento concentrado en la época estival como la mayor productividad de bofedales respecto a otras praderas, ambos mencionados por varios autores (Troncoso, 1982; Castellaro *et al.*, 1998; Ahumada y Faúndez, 2001; Castellaro, 2003a; Castellaro, 2003b). Asimismo, es posible advertir que la producción anual de MS de bofedales se encontraría bien representada en la carta obtenida, sin embargo, los valores calculados para praderas de pajonal y pajonal - tolar se hallarían algo bajos respecto a lo señalado por los estudios de terreno.

Capacidad de carga estimada

En la Figura 20 se muestra la *CC* anual obtenida para la zona, calculada utilizando el método de Huss (FAO, 1996), Figura 20a, y el método de Florez (2005), Figura 20b, para la estimación de la condición. Los términos globales por asociación utilizados para la estimación de producción de MS anual y *CC*, junto a las respectivas superficies de las asociaciones y de las restantes unidades cartográficas, se encuentran en el Cuadro 42 del Apéndice III.

En las figuras señaladas, se verifican las tendencias que se han ido observando a lo largo del trabajo, a saber, mayores valores de la variable para unidades de bofedal y gradiente decreciente de la variable hacia la precordillera. La primera, además de los montos anuales de producción de MS, dice relación con el alto porcentaje de condición y por tanto factor de uso apropiado, la alta concentración de energía metabolizable de las especies palatables, la alta preferencia de este tipo de pradera por parte del camélido, las bajas pendientes de los lugares en que se localizan y su mayor disponibilidad para agua de bebida. La segunda, por su parte, se encuentra relacionada con los montos decrecientes de producción de MS hacia la precordillera, los bajos porcentajes de especies palatables en las asociaciones presentes en el lugar, los bajos factores de uso apropiado, la baja preferencia del camélido por estas praderas y la menor disponibilidad de fuentes de agua de bebida.

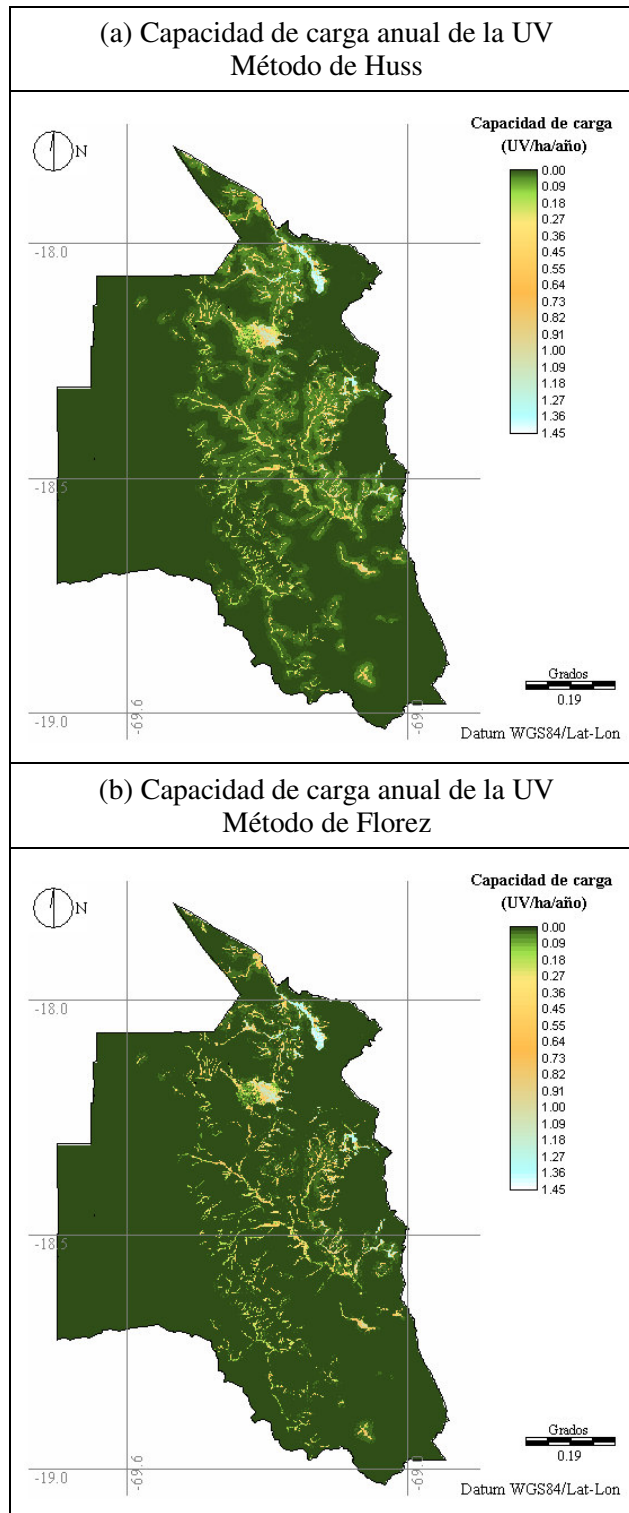


Figura 20. Distribución espacial, en formato raster, de la capacidad de carga anual de la unidad vicuña (UV) del área de estudio, con condición estimada a partir (a) del método de Huss (FAO, 1996) y (b) del método de Florez (2005).

Respecto a los montos, de acuerdo a la *CC* estimada con método de Huss, se tiene que los bofedales concentraron prácticamente todos los valores superiores a $0,1 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, observando un valor máximo de $1,45 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Al interior de estas unidades, por ser el resto de los términos de la ecuación constantes, la variabilidad espacial estuvo dada por la producción anual de MS y el factor de pendiente; siendo la primera de mayor importancia, dada su ubicación principalmente en sectores llanos. Valores entre $0,02$ y $0,1 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ se observaron en sectores adyacentes a bofedales como parte de asociaciones de pajonal y pajonal – tolar. El resto del área presentó mayormente valores bajo $0,02 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La *CC* estimada con el método de Florez (2005), no obstante presentar las mismas tendencias descritas para la carta de Huss, ostentó en general valores más bajos, producto de las diferencias en la estimación del *FUA*. Los mayores contrastes se observaron en las asociaciones de *Polylepis tarapacana* – *Festuca orthophylla* – *Azorella compacta* y *Azorella compacta* – *Festuca orthophylla* – *Parastrephia quadrangularis*, las que presentaron valores en torno al 30% de aquellos obtenidos con el método de Huss. Asociaciones de bofedal, de pajonal – tolar de *Festuca orthophylla* – *Parastrephia quadrangularis* – *Deyeuxia breviaristata* y aquellas pertenecientes a la precordillera (exceptuando el llaretal) no presentaron grandes cambios entre los diferentes métodos.

Como se mencionó en la Introducción, se han realizado algunos estudios con el propósito de dar cuenta de la *CC* de la zona¹⁹. Así, Troncoso (1982), mediante el método del Valor pastoral, estimó la *CC* teórica global de las asociaciones consideradas en el presente estudio, exceptuando algunas precordilleranas, a partir de lo que obtuvo montos de 1,0; 0,87; 3,63; 0,30; 0,20 y $0,59 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pajonal, pajonal tolar, bofedal, queñol, llaretal y tolar de precordillera, respectivamente²⁰. Con la misma metodología, para bofedales del PN Lauca, Castellaro *et al.* (1998) obtuvieron montos promedio de 0,31 y 0,36 unidades animales (UA) $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, equivalentes a 2,79 y $3,24 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Castellaro (2003a) y Castellaro (2003b), utilizando una metodología similar a la utilizada en el presente estudio, en sectores más acotados del altiplano de la provincia de Parinacota, obtuvieron rangos de *CC* de $0,3 - 1,64 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para bofedales, $0,08 - 0,13 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para pajonales, $0,05 - 0,1 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para praderas mixtas de tolar y pajonal y $0,02 \text{ UV ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para tolares²¹.

A partir de lo anterior, resulta evidente la diferencia entre lo obtenido en el presente estudio y en los trabajos de Troncoso (1982) y Castellaro *et al.* (1998), apreciándose una mayor similitud con lo obtenido por Castellaro (2003a y b), pese a los montos algo inferiores estimados para praderas de secano. En relación a la *CC* estimada con el método de Flórez, si bien los valores de algunas asociaciones fueron más bajos que aquellos estimados con el

¹⁹ Bonacic *et al.* (2002) estimaron, de manera generalizada, la *CC* dentro del área de censo de la vicuña en la Provincia de Parinacota (superficie mayormente contenida en el área de estudio), valiéndose para esto de parámetros poblacionales y ambientales. Sin embargo, este estudio no fue considerado para efectos de comparación de resultados con la idea de emplear para ello, trabajos que contemplasen una metodología con mayor similitud a la utilizada.

²⁰ En este caso la unidad vicuña (UV) correspondió a un individuo adulto de peso promedio de 40 kg, con un requerimiento energético de 256 unidades forrajeras (UF) al año, lo que equivale a $2.913,3 \text{ MJ año}^{-1}$.

²¹ En estos estudios la UV se definió igual a la utilizada en el presente trabajo (ver página 35).

método de Huss, y por tanto inferiores a los estudios mencionados en el párrafo anterior, presenta la potencialidad de considerar el *FUA* como un término con variabilidad espacial dependiente de las características de la vegetación, lo que sería más cercano a la realidad que la consideración de un *FUA* global para cada asociación. En este sentido convendría no descartar del todo dicha estimación, a la espera de mayores evaluaciones en terreno.

En el Cuadro 19 se presenta la *CC* total de las asociaciones vegetales y del área de estudio, a partir de lo cual se aprecian las tendencias ya señaladas. Es importante tener en cuenta que si bien las praderas de pajonal y pajonal – tolar presentan secundariamente los mayores valores de *CC*, ocupan también una gran superficie del área de estudio, la que contrasta con aquella ocupada por unidades de bofedal que, pese a representar aproximadamente el 80% de la *CC* total, conforman sólo el 6% de la zona estudiada.

Cuadro 19. Capacidad de carga total anual de la unidad vicuña (UV) de las distintas asociaciones vegetales y cubiertas del área de estudio, calculada a partir del método de Huss (FAO, 1996) y el método de Florez (2005).

Asociación vegetal	Superficie ha	Capacidad de carga total ^{1/}	
		Mét. Huss UV año ⁻¹	Mét. Florez
<i>F. orthophylla</i> – <i>D. breviaristata</i> – <i>P. lucida</i>	175.045,715	2.973,304	1.789,264
<i>F. orthophylla</i> – <i>D. breviaristata</i>	78.384,488	1.449,364	874,320
<i>F. orthophylla</i> – <i>P. quadrangularis</i> – <i>D. breviaristata</i>	64.620,244	497,351	497,489
<i>O. andina</i> – <i>D. curvula</i> – <i>W. pygmaea</i>	37.059,866	18.770,127	18.310,211
<i>P. tarapacana</i> – <i>F. orthophylla</i> – <i>A. compacta</i>	42.807,408	31,546	10,588
<i>A. compacta</i> – <i>F. orthophylla</i> – <i>P. quadrangularis</i>	40.994,157	50,907	19,044
<i>Baccharis</i> spp. – <i>Fabiana</i> spp. – <i>Senecio</i> spp.	58.517,380	0,399	0,399
<i>P. besseri</i> – <i>F. deserticola</i>	11.199,655	0,009	0,009
<i>F. deserticola</i> – <i>Atriplex</i> sp. – <i>E. rupestris</i>	17.453,445	0,014	0,014
<i>Senecio</i> sp. – <i>C. brevistylus</i> – <i>O. leucotrichus</i>	64.098,925	0,000	0,000
Cultivos	4.634,235	0,000	0,000
Escasa o nula vegetación	62.677,718	0,000	0,000
Lagos o lagunas	3.602,248	0,000	0,000
Salar	12.998,862	0,000	0,000
Total área de estudio	674.094,347	23.773,020	21.501,338

^{1/} Calculada con ajuste respecto a la superficie del píxel (90 · 90 m² aproximadamente).

Con el fin de tener una idea del uso que reciben las praderas del área de estudio respecto a su *CC* total, se hizo el ejercicio de contrastar esta última con la *CA* del terreno. Para esto, fueron consideradas las tres especies de ganado más numerosas del área de acuerdo al VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal de 2007 (INE, 2009); a saber, llamas, alpacas y ovinos cuyos ejemplares, junto con los de las restantes especies de ganado, se detallan en el Cuadro 21 del Anexo I. Puesto que casi la totalidad del área de estudio se ubica en la comuna de Putre, se consideró el ganado de ésta, al que se añadió un porcentaje de los ejemplares presentes en el resto de las comunas hacia las que se extiende el área de estudio. Este porcentaje correspondió a la razón dada por la superficie del área de estudio en una

determinada comuna respecto a la superficie total de esta última²². Para realizar la comparación fue preciso transformar los ejemplares a la unidad de medida de la CC, es decir, a unidades vicuña (UV). Para esto se utilizaron las equivalencias ganaderas señaladas por Castellaro (2005) para vicuña, alpaca y llama, las cuales se basan en los requerimientos energéticos anuales de una hembra adulta. La equivalencia para ovino se estimó igual a la alpaca, dado el parecido entre estas unidades animales observado en equivalencias ganaderas empleadas en otros estudios (Troncoso, 1982; Bonacic *et al.*, 2002). Así, las equivalencias adoptadas fueron 1:1,394:1,738:1,394 para vicuña:alpaca:llama:ovino, respectivamente, las que por estar referidas sólo a requerimientos energéticos no consideran las preferencias alimenticias, el uso del espacio, entre otros aspectos que pudieran hacer variar las cifras. Por otro lado la conversión a UV tampoco consideró la estructura poblacional del ganado, característica que incide en las equivalencias totales estimadas.

En el Cuadro 20 se muestra la CA del área de estudio junto a su equivalente en UV, a partir de lo cual es posible apreciar que esta se encontraría prácticamente copada con los animales considerados. Tomando en cuenta que a la cifra de CA señalada hay que añadir el resto del ganado doméstico (caprinos, bovinos, entre otros) y la fauna silvestre, que para vicuña alcanzó un total de 14.445 individuos en el área de censo de la Provincia de Parinacota en 2007, se desprende que las praderas del área de estudio estarían recibiendo un uso que excede en un monto importante su CC. Esta situación es concordante con apreciaciones señaladas en otros estudios (Troncoso, 1982; Ahumada y Faúndez, 2001), lo que sería particularmente cierto para bofedales dada su importancia en el funcionamiento de los sistemas de pastoreo.

Cuadro 20. Equivalencias en unidad vicuña (UV) del ganado más abundante presente en el área de estudio, según el VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal de 2007.

Especie de ganado	Número de cabezas	Equivalencia en UV
Ovinos	4.668	6.507,192
Alpacas	5.798	8.082,412
Llamas	4.145	7.204,010
Total	14.611	21.793,614

Discusión general

Se señalan a continuación algunos aspectos globales del estudio que es preciso tener en consideración.

Como se observó, el uso de formato raster para la expresión de variables continuas permitió la consideración de una mayor variabilidad al interior del área de estudio. No obstante, es preciso tener claro que al utilizar un pixel de un tamaño determinado se está asumiendo homogeneidad dentro de la superficie que éste cubre, lo que no necesariamente es cierto,

²² Esto supone que el ganado se encuentra repartido de manera homogénea en el espacio.

sobretudo en zonas con gradientes pronunciados. Por citar un ejemplo, Hijmans *et al.* (2005) realizaron una estimación, a nivel prácticamente mundial, de la variación de la altitud de datos de 3 arc s (~90 m) de resolución, DEM SRTM, al interior de celdas de 30 arc s (~1 km), lo que arrojó variaciones inferiores a 50 m en gran parte de las celdas de la grilla y variaciones más pronunciadas, incluso de 500 m y superiores, en las principales cadenas montañosas. Lo anterior, unido a la escala del resto de los insumos utilizados, suponen limitaciones en las cartas raster obtenidas para dar cuenta de la variabilidad que ocurre en el espacio, por lo que la utilidad de los resultados a un nivel de detalle superior al definido para el estudio, debería ser evaluada según sea el caso.

Ligado también a la variabilidad espacial del resultado, es importante recalcar que, si bien la mejora obtenida respecto a estudios anteriores, una serie de términos derivados de la composición botánica fueron considerados de manera global para las respectivas asociaciones vegetales (porcentaje de especies leñosas, *MD*, entre otros), aspecto que constituye una aproximación, ya que de acuerdo a lo señalado por diferentes autores (Hernández, 1980; Troncoso, 1982), se está en conocimiento que la composición botánica intra asociación no es totalmente homogénea.

Por otro lado se debe tener en cuenta que pese al intento de estimar una *CC* media anual, no todas las variables utilizadas correspondieron a su valor medio, ya que su variabilidad temporal, tanto intra como inter anual, no fue abordada a cabalidad. Tal es el caso de variables como la *MD* y los índices vegetación (*NDVI* e *IAF*), de cuya variación en el tiempo se sabe a partir de los resultados obtenidos en distintos estudios (Castellaro *et al.*, 1998; Wilson & Meyers, 2007).

Además de lo mencionado es preciso señalar que existen temas en los que se requiere información más amplia tanto para validar y/o mejorar las estimaciones realizadas, como para integrarlos en futuras estimaciones de *CC*. Dentro de estos se encuentran:

- Datos climáticos: En base a las falencias en la distribución espacial de estaciones meteorológicas, a lo laborioso que resulta el proceso de construcción de bases de datos climáticos, y a la necesidad de contar con información de entrada de calidad para la operación de los modelos, son de especial relevancia tanto el incremento y mejora en distribución de la red meteorológica, como los esfuerzos encaminados a la generación de bases de datos revisadas, homogeneizadas y de fácil acceso, que permitan de manera más expedita la realización y comparación de estudios topoclimáticos.
- Producción de MS y aspectos nutricionales de la vicuña: Como se ha señalado, estos temas no han sido estudiados en praderas altiplánicas del país, temas que son necesarios de abordar para la realización de estimaciones más precisas de *CC*.
- Otros factores de la *CC*: Existen otros aspectos que modifican la *CC* real y que no fueron considerados en este estudio dentro de los que se encuentran (Troncoso,

1982): la territorialidad de las vicuñas y el forraje cosechado por otras especies. Respecto a este último se tiene que la competencia real por el forraje que existe entre la vicuña y los animales doméstico no ha sido estudiada en el país (Galaz, 2005).

Si bien las limitaciones señaladas, las cifras de *CC* calculada constituyen aproximadamente un promedio anual, implicando esto que los valores reales de la misma podrían fluctuar, excediendo o rebajando a los valores estimados, de acuerdo al comportamiento de las variables climáticas, a las características de las especies vegetales de las asociaciones y a la condición de las praderas para un determinado año.

Finalmente, en cuanto a las proyecciones de este trabajo se tienen principalmente dos aspectos. El primero es la necesidad de validar partes fundamentales del estudio, siendo prioritarias en este sentido las mediciones de producción de *MS* y su variabilidad estacional y el estudio de los hábitos alimenticios y requerimientos nutricionales de la vicuña. En segundo término, la marcada estacionalidad de producción de forraje, junto con la variación en la composición botánica de las praderas observada en trabajos anteriores, sugiere la existencia de una marcada variación temporal de la *CC* de las praderas y con ello la necesidad de realizar estudios que la consideren, contribuyendo así al ajuste de una *CA* más adecuada a las condiciones ambientales imperantes a través del año.

CONCLUSIONES

En base al proceso de análisis y discusión de resultados se concluye lo siguiente:

- Es posible describir la variación espacial de la temperatura, la precipitación y la radiación solar de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, con un 95% de confianza, en función de variables relativas al relieve y la ubicación espacial, dispuestas como regresiones multivariadas. Las estaciones meteorológicas son escasas y exhiben tendencias en su localización, lo que dificulta la validación y provoca el empleo de mayor información de ciertas zonas al ajustar los modelos.
- Los modelos topoclimáticos, pese a no haber sido validados, predicen de manera satisfactoria la variabilidad espacial de las variables climáticas en las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, sobretodo en su rango de validez. Espacialmente, tanto la temperatura como la precipitación, muestran claras variaciones a través de las franjas geomorfológicas y el relieve, no así la radiación solar que exhibe un patrón más ligado a la localización espacial. Destaca el importante rol de la cordillera en la recepción de precipitaciones anuales.
- La carta de asociaciones vegetales del área de estudio, escala 1:250.000, puede ser digitalizada y verificada en gabinete, mediante imágenes satelitales con resolución igual o inferior a 30 m. Los atributos de vegetación inventariados, señalan la buena aptitud forrajera de los bofedales en términos de las especies que los conforman y los valores de los índices de vegetación en meses estivales de 2008. Asociaciones con dominancia de *Festuca orthophylla* y menor aptitud forrajera, ocupan cerca del 50% del área de estudio. Los índices de vegetación, derivados de imágenes Landsat TM (2008), reflejan las características de las praderas pero, cuantitativamente, los valores mínimos de *NDVI* son inferiores a los reportados para vegetación.
- La producción anual de MS de las praderas del área de estudio puede ser estimada mediante la implementación de un modelo de simulación que utiliza variables climáticas medias y una producción potencial, en un entorno SIG raster. Si bien no fue validada, la producción estimada retrata satisfactoriamente las tendencias de la zona, a saber, crecimiento concentrado en verano y mayores montos en bofedales.
- La metodología utilizada permite estimar la *CC* anual de las praderas del área de estudio para la UV, reflejando adecuadamente las características de la zona. Se evidencia el importante rol de los bofedales en la sustentación de la *CA* del área de estudio, y con ello su relevancia en el manejo de las vicuñas.
- En términos teóricos, la *CC* obtenida constituye un avance respecto a estimaciones anteriores realizadas en asociaciones vegetales del área de estudio. Esto deriva de la

consideración de una mayor variabilidad espacial, la estimación y uso de la producción anual de MS y mejoras en la estimación del forraje aprovechable de la mano de términos ligados al costo ecológico de cosecha y el *FUA*.

- La *CC* estimada es referencial, ya que se carece de mediciones de producción de MS anual y su variación estacional, y de estudios de hábitos y requerimientos alimenticios de la vicuña en el altiplano chileno para precisar su estimación. Además, la *CC* obtenida no representa toda la variación temporal y espacial de las variables que la determinan. Por lo señalado, es necesario seguir investigando para mejorar los resultados obtenidos y con ello el manejo de recursos naturales de la zona; aspecto relevante a la luz de la aparente sobreutilización de las praderas.

BIBLIOGRAFÍA

Aceituno, 1993. Aspectos generales del clima del altiplano sudamericano. *In: El Altiplano Ciencia y Conciencia de los Andes. Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos.* Arica, Chile. Octubre 19-21, 1993. Universidad de Chile, Santiago, Chile. Disponible en WWW: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_veterinarias_y_pecuarias/simposio1993/index.html Leído el 24 de julio de 2008

Aceituno, P., R. Garreaud, B. López y V. Pichara. s.a. Información climatológica de estaciones chilenas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Disponible en: <http://www.atmosfera.cl/HTML/climatologia/DATOS/DATOS.HTM> Leído el 26 de Junio de 2008

Ahumada, C. y L. Faúndez. 2001. Praderas Altiplánicas. pp.17-33. *In: Ahumada, C. y L. Faúndez. Guía descriptiva de las praderas naturales de Chile.* Servicio Agrícola Ganadero, Santiago, Chile. 98p.

Arenas, C. 2008. Determinación del forraje o pasto aprovechable. Gedeco Ltda., Santiago, Chile. 6p. Disponible en: http://www.gedeco.cl/REVIEW_Det.FA_GEDECO.pdf Leído el 30 de Octubre de 2009

Bannister, A. 2002. Metodología para la determinación de la capacidad sustentadora recreacional. pp.271-296. *In: Gastó, J., P. Rodrigo e I. Aránguiz (Eds.). Ordenación Territorial, Desarrollo de Predios y Comunas Rurales.* Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. LOM Ediciones, Santiago, Chile. 996p.

Benítez, V., M. Borgnia y M. H. Cassini. 2006. Ecología nutricional de la vicuña (*Vicugna vicugna*): Un caso de estudio en la Reserva Laguna Blanca, Catamarca. pp.51-67. *In: Vilá, B. (Ed.). Investigación, conservación y manejo de vicuñas.* Proyecto MACS, Buenos Aires, Argentina. 205p.

Bonacic C., D.W. McDonald, J. Galaz y R.M. Sibly. 2002. Density dependence in the camelid *Vicugna vicugna*: the recovery of a protected population in Chile. *Oryx* 36(2): 118-125. Disponible en: http://www.macs.puc.cl/Publications/density_dependence.pdf Leído el 30 de Octubre de 2008

Canessa, F. 2006. Evaluación de los recursos climáticos de la IV región de Coquimbo, mediante la utilización de topoclimatología e imágenes NOAA-AVHRR. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 178p.

Castellaro, G. 2003a. Evaluación de las praderas de los terrenos destinados al manejo en cautiverio de vicuñas, 2002. Informe de Consultoría. Corporación Nacional Forestal Primera Región de Tarapacá, Arica, Chile. 100p.

Castellaro, G. 2003b. Evaluación de la capacidad de carga de las praderas de los predios Jaillave y Challapujo en los terrenos destinados al manejo en cautiverio de vicuña. Secretaría Regional Ministerial de Agricultura de la Primera Región, Arica, Chile. 111p.

Castellaro, G. 2005. Manejo nutritivo de la vicuña en condiciones de pastoreo. pp.221-246. *In:* Galaz, J. y G. González (Eds.). Técnicas de manejo productivo de la Vicuña (*Vicugna vicugna* Molina, 1782) en Chile. Corporación Nacional Forestal-Fundación para la Innovación Agraria, Santiago, Chile. 280p.

Castellaro, G. 2007. Aproximación metodológica para la estimación de la capacidad de carga de praderas altiplánicas destinadas al manejo de la vicuña (*Vicugna vicugna* Mol.). *Avances en Producción Animal* 32(1-2): 43-57.

Castellaro, G., C. Gajardo, V.H. Parraguez, R. Rojas, J. Terroba, L.A. Raggi. 1998. Productividad de un Rebaño de Camélidos Sudamericanos Domésticos (CSA) en un Sector de la Provincia de Parinacota: I. Variación estacional de la composición botánica, disponibilidad de materia seca, valor pastoral y valor nutritivo de los bofedales. *Agric. Téc. (Chile)* 58(3): 191-204.

Castellaro, G., T. Ullrich, B. Wackwitz y A. Raggi. 2004. Composición botánica de la dieta de alpacas (*Lama pacos* L.) y llamas (*Lama glama* L.) en dos estaciones del año, en praderas altiplánicas de un sector de la Provincia de Parinacota, Chile. *Agric. Téc. (Chile)* 64(4): 353-364.

CNR-CIREN, CHILE. 1997. Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile. Comisión Nacional de Riego-Centro de información de Recursos Naturales, Santiago, Chile. 54p.

CONAF, CHILE. 1986. Plan de manejo del Parque Nacional Lauca. Documento de trabajo N° 82. Corporación Nacional Forestal Primera Región de Tarapacá, Chile. 247p.

CONAF, CHILE. 2008. Informe XXVII reunión ordinaria técnico – administradora convenio de la vicuña. Corporación Nacional Forestal Región de Arica y Parinacota, Arica, Chile. 56p. Disponible en WWW: <http://www.conveniovicuna.org/Informe%20Gestion%20Chile%202008.pdf> Leído el 2 de Noviembre de 2009

CORFO, CHILE. 1982. Análisis de los ecosistemas de la I Región de Chile. Sociedad Agrícola CORFO Ltda.-Universidad de Chile, Santiago, Chile. 195p.

Chilebosque.cl. s.a. Base de datos de flora nativa de Chile. Disponible en: http://www.chilebosque.cl/cgi-bin/db.cgi?db=default&uid=default&view_search=1 Leído el 5 de abril de 2009

Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia Editores, Barcelona, España. 586p.

Davies, J. 2003. Population ecology of the vicuña at the Salinas y Aguada Blanca National Reserve, Arequipa, Perú: baseline data for sustainable management. Thesis Master of Arts. University of Florida, Graduate School. 65p. Disponible en WWW: http://etd.fcla.edu/UF/UFE0002502/davies_j.pdf Leído el: 24 de julio de 2008

De Carolis, G. 1987. Descripción del sistema ganadero y hábitos alimentarios de camélidos domésticos y ovinos en el bofedal de Parinacota. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile. 261p.

DGA, CHILE. 1987. Balance Hídrico de Chile. Dirección General de Aguas, Santiago, Chile. 23p.

DGA, CHILE. 2007. Nómina de Estaciones Meteorológicas I y II Región. Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.

Díaz, D. 2006. Elaboración y ajuste de modelos topoclimáticos de variables termopluviométricas para las VIII, IX y X regiones de Chile. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 70p.

Eastman, J.R. 2003. Triangulated Irregular Networks and Surface Generation. pp.267-275. In: Eastman, J.R., Idrisi Kilimanjaro, Guide to GIS and Image Processing. Clark University, Clark Labs, Worcester MA, USA. 306p.

Escobar, F. s.a. Introduction to GIS. The University of Melbourne, Department of Geomatics, Melbourne, Australia. 13p. Disponible en: <http://www.sli.unimelb.edu.au/gisweb/GISModule/GISTheory.pdf> Leído el 30 de Julio de 2009

Fan, L., Y. Gao, H. Brück and Ch. Bernhofer. 2009. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semiarid grassland in Inner Mongolia using *in-situ* measurements. Theor. Appl. Climatol. 95: 151–156.

Felicísimo, A. 1994. Modelos digitales de Terreno: Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. 118p. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>. Leído el 30 de Octubre de 2008

Florez, A. 2005. Manual de pastos y forrajes altoandinos. Intermediate Technology Development Group (ITDG) – Oikos Cooperacao e Desenvolvimento (OIKOS), Lima, Perú. 53p.

Galaz, J. 2005. Antecedentes de la especie. pp.23-37. *In*: Galaz, J. y G. González (Eds.). Técnicas de manejo productivo de la Vicuña (*Vicugna vicugna* Molina, 1782) en Chile. Corporación Nacional Forestal-Fundación para la Innovación, Santiago, Chile. 280p.

Garreaud, R., M. Vuille and A.C. Clement. 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194:5-22. Disponible en: http://www.atmos.albany.edu/facstaff/mathias/pubs/Garreaud_et_al_2003.pdf Leído el 30 de Octubre de 2008

Gastó, J., F. Cosio y D. Panario. 1993. Clasificación de las ecorregiones y determinación de sitio y condición. Manual de aplicación a municipios y predios rurales. Red de Pastizales Andinos, Santiago, Chile. 254p.

Glade, A. y A. Cattán. 1987. Aspectos conductuales y reproductivos de la vicuña. *In*: Torres, H. (Ed.). Técnicas para el manejo de la vicuña. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de Recursos Naturales-Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Santiago, Chile. 139p.

Goodale, C., J. Aber, and S. Ollinger. 1998. Mapping monthly precipitation, temperature and solar radiation for Ireland with polynomial regression and digital elevation model. *Clim. Res.* 10: 35-49. Disponible en: <http://www.int-res.com/articles/cr/10/c010p035.pdf> Leído el 1 de Enero 2009

Hernández, L. 1980. Zonificación con fines de manejo de las formaciones vegetales presentes en el Parque Nacional Lauca. Memoria Ingeniero Forestal. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. 101p.

Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25:1965-1978. Disponible en: http://www.worldclim.org/worldclim_IJC.pdf Leído el 30 de Julio de 2009

Holechek, J.L., R.D. Pieper and C.H. Herbel. 2001. Chapter 8: Considerations concerning stocking rate. pp. 203-246. *In*: Holechek, J.L., R.D. Pieper and C.H. Herbel. Range management, Principles and practices. 4th ed. Prentice Hall, New Jersey, USA. 587p.

Huber, A. 1977. Aporte a la climatología y climaecología de Chile parte II: nubosidad y radiación efectiva. *Medio ambiente* 3(1): 3-14.

INE, CHILE. 2009. VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal 2007. Instituto Nacional de Estadísticas. Disponible en WWW: <http://www.censoagropecuario.cl/noticias/09/07042009.html> Leído el 2 de Noviembre de 2009

Jaksic, F., P. Marquet y H. González. 1997. Una perspectiva ecológica sobre el uso del agua en el Norte Grande: la región de Tarapacá como caso de estudio. *Estudios Públicos* 68:171-195. Disponible en: http://www.cepchile.cl/dms/lang_1/doc_1657.html Leído el 30 de Octubre de 2008

Liang, S. 2004. Estimation of Land Surface Biophysical Variables. pp.246-309. *In*: Liang, S. *Quantitative Remote Sensing of Land Surface*. Wiley-Interscience, New Jersey, EEUU. 534p.

Luo, T., Y. Pan, H. Ouyang, P. Shit, J. Luo and Z. Yu. 2004. Leaf area index and net primary productivity along subtropical to alpine gradients in the Tibetan Plateau. *Global Ecol. Biogeogr.* 13: 345-358.

Odum, E. y G. Warret. 2006. El concepto de productividad. pp.86-107. *In*: Odum, E. y G. Warret. *Fundamentos de ecología*. 5^{ta} ed. Thomson International Editores, México. 598p.

Oficina Meteorológica de Chile. 1965. Pluviometría de Chile. Fascículo I. Ministerio de Defensa Nacional, Fuerza Aérea de Chile, Santiago, Chile. 267p.

Oficina Meteorológica de Chile. 1967. Pluviometría de Chile. Fascículo III. Ministerio de Defensa Nacional, Fuerza Aérea de Chile, Santiago, Chile. 161p.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). 1985. Datos agroclimatológicos para América Latina y el Caribe. Colección FAO: Producción y Protección Vegetal. FAO, Roma, Italia.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). 1996. Capítulo VI: El manejo de las praderas relacionado con la ecología. pp.83-110. *In*: FAO. *Principios de manejo de praderas naturales*. 2^a ed. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile. 272p.

Rickert, K.G., J.W. Stuth, and G.M. Mckeon. 2000. Modelling Pasture and Animal Production. pp.29-66. *In*: 't Mannelje, L., and R.M. Jones (Eds.). *Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research*. CABI Publishing, Oxon, UK. 447p.

Rivera, A. 2008. Laboratorio de Glaciología. Disponible en: <http://www.glaciologia.cl/> Leído el 27 de octubre de 2008

Romero, H. 1985. Geografía de los climas. Tomo XI Colección Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile. 243p.

Romero, H. y J. Vinagre. 1985. Topoclimatología de la Cuenca del Río Mapocho. *Informaciones Geográficas* 32:3-31.

SCA, 1990. Feeding Standards for Australian livestock. Ruminants. Standing Committee on Agriculture, Ruminants Subcommittee. CSIRO Publications, Melbourne, Australia. 266p.

Sobrino, J.A. (Ed.). 2000. Teledetección. Agencia Española de Cooperación Internacional-Universidad de Valencia, España. 468p.

Statgraphics Plus 5.1, 1994-2001. Advanced Analyses Glossary. 36p.

Troncoso, R. 1982. Evaluación de la capacidad de carga animal del Parque Nacional Lauca. Informe de Consultoría. Corporación Nacional Forestal Región de Tarapacá, Arica, Chile. 147p.

Troncoso, R. 1983. Caracterización ambiental del ecosistema bofedal de Parinacota y su relación con la vegetación. Tesis Licenciado en Ciencias Agrícolas, especialidad Fitotecnia. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Santiago, Chile. 252p.

Tropicos.org. 2009. Missouri Botanical Garden. Disponible en: <http://www.tropicos.org>
Leído el 5 de abril de 2009

Wilson, T.B and T.P. Meyers. 2007. Determining vegetation indices from solar and photosynthetically active radiation fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 144: 169-179.

**ANEXO I: EXISTENCIAS DE GANADO EN LA REGIÓN DE ARICA Y
PARINACOTA**

Cuadro 21. Ganado doméstico existente en la Región de Arica y Parinacota, por comunas, de acuerdo al VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal, 2007.

Especies de ganado	Número de cabezas						Total Regional
	Comunas		Provincia de Arica	Comunas		Provincia de Parinacota	
	Arica	Camarones		Putre	Gral. Lagos		
Bovinos	815	557	1.372	896	0	896	2.268
Ovinos	5.690	4.457	10.147	3.193	4.889	8.082	18.229
Cerdos	2.070	213	2.283	29	0	29	2.312
Caballares	191	32	223	101	0	101	324
Mulares	10	25	35	50	57	107	142
Asnales	12	80	92	41	0	41	133
Caprinos	2.413	1.186	3.599	2.443	0	2.443	6.042
Alpacas	108	392	500	4.635	13.931	18.566	19.066
Llamas	197	1.199	1.396	2.971	13.025	15.996	17.392
Conejos	675	322	997	23	0	23	1.020

Fuente: INE (2009).

APÉNDICE I: BASES DE DATOS CLIMÁTICOS

Cuadro 22. Base de datos de estaciones meteorológicas de temperatura media mensual y anual utilizadas para el ajuste de modelos topoclimáticos de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

N°	Estación	LAT ^{1/}	LON ^{1/}	ALT	DL	DCA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TMA	Periodo	Fuente
		grados		msnm	km									°C							
1	Cotacotani	-18,1850	-69,2347	4.500	116,5749	0,0000	4,40	4,40	4,90	3,70	1,40	-0,20	-0,80	-0,40	1,50	2,80	4,00	4,90	2,55	68-76	1
2	Parin. Ex ENDESA	-18,2017	-69,2681	4.390	112,7400	2,7918	6,32	5,40	4,64	4,37	1,02	0,29	0,08	1,48	2,24	4,49	5,70	5,67	3,48	86-01	2
3	Murmutane	-18,3517	-69,5348	3.280	81,8083	8,0495	9,80	9,80	10,20	10,90	9,60	8,90	8,80	8,80	10,00	9,80	11,00	10,30	9,83	68-71	1
4	Lluta	-18,4017	-70,1681	290	15,1340	50,0669	21,10	20,20	19,70	17,80	15,90	14,50	15,00	15,00	15,40	17,80	18,40	19,10	17,49	66-71	1
5	Arica Chacalluta	-18,3347	-70,3344	58	4,6304	59,0156	22,00	22,30	21,40	19,50	17,60	16,40	15,60	15,70	16,30	17,50	19,10	20,60	18,67	NP	3
6	Arica	-18,4850	-70,3181	100	0,8974	42,5303	22,00	22,10	21,20	19,40	17,90	16,40	15,50	15,50	16,40	17,50	19,00	20,50	18,62	39-70	1
7	Azapa	-18,5183	-70,1181	350	20,6540	38,0086	21,10	21,90	21,10	19,80	17,30	15,50	13,80	14,80	16,30	17,10	18,00	19,50	18,02	69-76	1
8	Chaca	-18,8183	-70,1514	145	19,7467	6,1131	22,30	22,60	22,10	19,50	17,10	15,90	14,40	14,90	16,50	17,50	18,80	20,10	18,48	69-72	1
9	Codpa	-18,8350	-69,7514	1.800	60,4020	41,3382	17,10	17,00	16,70	15,90	14,90	14,70	14,90	15,40	16,00	16,30	16,40	16,90	16,02	69-84	4
10	Pumire	-19,1350	-69,1181	4.200	120,2101	17,7573	5,60	5,90	5,70	4,80	3,40	1,80	1,20	2,10	3,20	3,90	4,70	5,20	3,96	62-70	1
11	Cuya	-19,1517	-70,1681	120	10,6284	0,7887	22,00	21,80	21,50	19,20	18,30	17,30	17,20	15,30	16,10	16,70	17,90	19,90	18,60	66-72	1
12	Pisagua	-19,5850	-70,2015	10	0,4833	43,6945	22,10	21,50	18,00	15,80	16,50	15,00	16,40	17,00	17,10	16,50	17,70	18,50	17,68	19-72	1
13	Chuzmiza	-19,6850	-69,2181	3.316	97,9085	31,5352	11,40	11,30	10,90	10,80	10,10	8,70	8,50	9,30	9,60	10,60	11,10	11,20	10,29	63-68	1
14	Huara	-19,9850	-69,8015	1.149	33,7770	48,6612	19,00	18,40	18,00	18,10	18,00	15,90	15,90	17,10	17,90	18,50	18,90	19,10	17,90	64-67	1
15	Coyacahua	-20,0517	-68,8348	3.990	134,6775	12,6564	7,50	7,50	7,10	4,70	2,50	0,60	0,20	0,60	2,30	3,60	4,50	6,70	3,98	62-75	1
16	Iquique Aracena	-20,5350	-70,1848	52	1,0708	19,8359	21,10	21,10	20,10	18,30	16,90	15,90	15,20	15,30	15,90	16,90	18,40	20,00	17,93	NP	3
17	Canchones	-20,4683	-69,5848	900	59,8934	6,7427	21,00	21,00	19,20	17,00	14,60	13,50	12,80	13,40	15,70	16,40	17,60	19,00	16,77	42-48	1
18	Esmeralda	-20,5017	-69,3848	1.243	80,8611	24,5077	22,10	22,70	22,30	21,60	19,60	16,60	17,30	17,70	19,00	20,00	20,30	21,20	20,03	66-68	1
19	Pica	-20,5017	-69,3515	1.250	84,3389	27,9279	19,70	20,20	19,70	18,60	17,30	15,50	15,90	16,40	18,20	19,10	19,00	19,60	18,27	64-70	1
20	Guatacondo	-20,9333	-69,0833	2.460	108,6307	43,0697	17,50	16,60	16,40	16,00	14,60	12,10	13,40	14,20	15,50	16,80	17,60	18,10	15,73	64-77	1
21	Caquena	-18,0517	-69,2014	4.400	124,3890	4,3894	4,42	3,81	4,13	3,10	0,74	-0,34	-0,77	0,74	1,75	3,27	4,03	3,94	2,40	76-00	2
22	Chungara Ajata	-18,2350	-69,1681	4.570	122,1889	0,0893	5,73	5,49	5,45	4,93	2,93	1,29	0,79	1,87	3,26	4,67	5,41	5,88	3,98	86-01	2
23	Chilcaya	-18,8017	-69,0181	4.140	136,9519	0,0000	5,98	6,17	6,26	3,26	1,07	-0,01	-1,56	-1,28	-0,04	3,28	3,66	5,77	2,71	76-01	2
24	Pacollo	-18,1683	-69,4848	4.050	91,8494	3,4989	5,03	5,24	5,17	4,59	3,37	2,18	1,89	2,49	2,94	4,15	4,86	4,96	3,91	78-93	2
25	Cavanca (Iquique)	-20,2183	-70,1515	8	0,4833	43,0032	19,70	19,60	18,50	17,00	15,90	14,80	14,10	14,20	15,00	15,90	17,30	18,70	16,73	35-43	4
26	Ujina	-20,9683	-68,6514	4.200	151,2362	9,1956	6,10	6,10	6,30	4,50	1,60	0,10	0,20	0,00	0,90	3,00	4,80	4,70	3,19	NP	3
27	Ollague	-21,2222	-68,2551	3.650	187,8579	9,3902	10,40	10,80	9,80	6,50	1,30	0,90	0,80	1,50	4,40	5,60	8,20	9,90	5,84	74-77	4
28	Linzor	-22,2281	-68,0223	4.096	222,8772	61,0501	3,30	2,70	2,60	1,70	-0,70	-1,40	-1,50	-0,90	0,90	0,90	2,80	2,80	1,10	74-77	4

LAT: Latitud LON: Longitud ALT: Altitud DL: Distancia al litoral DCA: Distancia a cuerpos de agua TMA: Temperatura media anual NP: No presenta

^{1/}Referencias geográficas en Datum WGS84 coordenadas geográficas Lat/Lon

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de (1) CORFO (1982); (2) DGA, citada por Castellaro (2003a); (3) Aceituno *et al.* (s.a.); (4) DGA (1987).

Cuadro 23. Base de datos de estaciones meteorológicas de precipitación media mensual y anual utilizadas para el ajuste de modelos topoclimáticos de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

N°	Estación	LAT ^{1/}	LON ^{1/}	ALT	DL	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PMA	Periodo	Fuente
		grados	grados	msnm	km	mm														
1	Visviri	-17,5850	-69,5014	4.070	125,6564	107,20	72,50	53,40	13,10	0,90	2,10	1,40	5,30	0,90	10,50	12,70	36,40	316,40	68-01	2
2	Caquena	-18,0517	-69,2014	4.400	124,3890	115,10	110,20	82,90	9,10	1,70	2,80	7,60	10,30	1,70	5,90	10,70	41,10	399,10	70-01	2
3	Cotacotani	-18,1850	-69,2347	4.500	116,5749	123,10	102,70	74,90	14,90	2,10	2,00	1,50	5,20	3,90	7,30	16,40	52,20	406,20	61-01	2
4	Putre	-18,2017	-69,5681	3.530	82,2799	85,50	57,20	30,40	1,50	0,40	1,30	0,60	2,50	1,70	1,50	3,60	26,20	212,40	68-01	2
5	Parin.- CONAF	-18,2017	-69,2681	4.390	112,7400	107,20	101,60	58,90	9,20	2,00	2,50	0,90	3,50	3,50	1,80	11,60	47,50	350,20	32-89	2
6	Parin. ex NDESA	-18,2017	-69,2681	4.390	112,7400	109,80	78,50	53,40	10,20	0,70	1,90	1,40	2,30	0,50	1,60	8,50	37,30	306,10	83-01	2
7	Central Chapiquiña	-18,3850	-69,5514	3.280	79,7067	58,70	55,80	27,30	0,60	0,10	1,90	0,40	2,70	1,70	1,40	0,80	17,90	169,30	63-01	2
8	Belen	-18,4850	-69,5181	3.240	83,0013	59,30	44,90	22,60	0,20	0,20	0,70	0,30	1,80	0,20	0,80	0,30	11,30	142,60	38-01	2
9	Arica	-18,4850	-70,3181	100	0,8974	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,10	0,30	0,25	0,40	0,00	0,00	0,00	1,08	31-60	5
10	Arica Chacalluta	-18,3347	-70,3344	58	4,6304	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,20	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	NP	3
11	Chucuyo-carabineros	-18,2184	-69,3014	4.200	108,8263	112,70	97,10	61,30	7,30	1,50	1,40	4,60	5,10	2,00	4,90	12,50	38,40	348,80	60-01	2
12	Codpa	-18,8350	-69,7514	1.800	60,4020	0,20	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	0,00	1,70	0,00	6,60	NP	1
13	Camiña	-19,3167	-69,4333	2.380	83,2936	2,40	11,20	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,80	0,00	0,80	0,00	26,60	NP	1
14	Mamiña	-20,0833	-69,2333	2.730	92,9242	7,80	9,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	17,30	0,00	0,00	0,10	35,40	NP	1
15	Cavancha(Iquique)	-20,2183	-70,1515	8	0,4833	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,60	0,40	0,40	0,10	0,00	0,00	1,90	NP	1
16	Canchones	-20,4683	-69,5848	900	59,8934	0,20	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	NP	1
17	Pica	-20,5017	-69,3515	1.250	84,3389	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	3,40	0,00	0,00	0,00	3,60	NP	1
18	Guatacondo	-20,9333	-69,0833	2.460	108,6307	5,70	3,30	2,50	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	3,30	0,00	0,00	0,00	15,00	NP	1
19	Chungara reten	-18,2850	-69,1181	4.570	126,4344	94,20	86,40	58,70	8,60	1,70	1,80	5,00	3,90	2,40	5,20	13,00	42,10	323,00	62-01	2
20	Chungara-Ajata	-18,2350	-69,1681	4.570	122,1889	123,50	88,10	74,00	13,70	1,80	5,90	1,70	4,60	2,80	6,60	15,20	49,90	387,80	83-01	2
21	Isla Blanca	-18,1850	-69,2181	4.500	118,3022	99,90	87,00	68,40	12,00	1,30	1,00	2,40	4,40	2,60	8,30	16,10	43,00	346,40	70-88	2
22	Guallatire	-18,5017	-69,1681	4.280	119,9966	98,50	87,10	52,20	6,00	0,60	1,80	3,50	3,70	1,30	3,20	6,30	31,10	295,30	69-01	2
23	Chilcaya	-18,8017	-69,0181	4.140	136,9519	104,60	100,30	72,40	13,50	0,60	1,50	0,40	2,60	3,40	3,20	7,50	38,10	348,10	71-01	2
24	Villa Industrial	-17,7850	-69,7181	4.060	93,8243	114,40	91,20	70,90	9,50	1,30	3,30	5,10	3,10	1,10	5,10	10,30	46,80	362,10	75-01	2
25	Humapalca	-17,8350	-69,7014	3.970	91,4080	112,70	90,60	56,30	5,40	0,60	2,80	0,80	6,00	1,00	4,00	5,60	26,90	312,70	71-01	2
26	Alcérrecá	-18,0017	-69,6681	3.990	83,0454	83,10	58,70	43,70	5,30	1,50	2,80	2,30	3,50	1,30	2,30	3,20	23,20	230,90	71-01	2
27	Pacollo	-18,1683	-69,4848	4.050	91,8494	73,90	63,80	35,20	3,10	0,20	3,10	1,30	6,20	1,90	3,30	5,70	25,50	223,20	78-99	2
28	Murmutane	-18,3517	-69,5348	3.280	81,8083	68,80	65,30	19,60	0,20	0,10	2,40	1,00	2,50	1,10	2,00	3,00	10,70	176,70	70-87	2
29	Tignamar	-18,5850	-69,5014	3.200	85,8708	49,60	36,70	22,30	0,80	0,00	0,40	0,20	2,30	1,30	0,00	0,60	13,50	127,70	68-01	2
30	Colchane	-19,2850	-68,6514	3.965	164,6332	47,70	31,20	18,50	4,40	0,00	0,50	0,00	0,40	0,80	1,20	4,50	11,60	120,80	80-00	2
31	Ujina	-20,9683	-68,6514	4.200	151,2362	62,00	68,00	25,00	3,00	1,00	4,00	1,00	2,00	11,00	1,00	1,00	17,00	196,00	61-80	4
32	Chuzmiza	-19,6850	-69,2181	3.316	97,9085	59,50	41,20	41,50	0,10	0,90	0,00	8,10	9,10	0,60	3,70	0,00	5,00	169,70	29-36	5
33	Sibaya	-19,8017	-69,1848	3.233	99,6806	44,00	22,80	2,60	0,00	0,50	2,00	2,00	9,00	0,00	4,30	0,00	1,70	88,90	29-32	5

LAT: Latitud LON: Longitud ALT: Altitud DL: Distancia al litoral PMA: Precipitación total media anual NP: No presenta

^{1/}Referencias geográficas en Datum WGS84 coordenadas geográficas Lat/Lon

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de (1) CORFO (1982); (2) DGA, citada por Castellaro (2003a); (3) Aceituno *et al.* (s.a.); (4) DGA (1987); (5) Of. Meteorológica de Chile (1965-1967); (6) FAO (1985).

(continúa)

Cuadro 23 (continuación).

N°	Estación	LAT ^{1/}	LON ^{1/}	ALT	DL	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PMA	Periodo	Fuente
		grados	grados	msnm	km	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
34	Poroma	-19,8850	-69,2181	2.880	95,6227	38,00	22,50	23,60	0,00	0,00	0,40	0,30	2,50	0,50	0,70	0,00	1,20	89,70	29-34	5
35	Iquique Aracena	-20,5350	-70,1848	52	1,0708	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,10	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,60	NP	3
36	Tocopilla	-22,0850	-70,1944	16	0,2834	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,40	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	41-52	5
37	Inacaliri	-22,0256	-68,0656	4.100	214,6194	47,00	33,00	14,00	2,00	3,00	1,00	0,40	0,30	2,00	0,70	1,00	3,00	107,40	61-80	4
38	Charana	-17,5913	-69,4417	4.057	129,8669	95,00	64,00	51,00	5,00	2,00	2,00	0,00	9,00	5,00	5,00	15,00	45,00	298,00	NP	6

LAT: Latitud LON: Longitud ALT: Altitud DL: Distancia al litoral PMA: Precipitación total media anual NP: No presenta

^{1/}Referencias geográficas en Datum WGS84 coordenadas geográficas Lat/Lon

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de (1) CORFO (1982); (2) DGA, citada por Castellaro (2003a); (3) Aceituno *et al.* (s.a.); (4) DGA (1987); (5) Of. Meteorológica de Chile (1965-1967); (6) FAO (1985).

Cuadro 24. Base de datos de estaciones meteorológicas de radiación solar media mensual y anual utilizadas para el ajuste de modelos topoclimáticos de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

N°	Estación	LAT ^{1/}	LON ^{1/}	ALT	DL	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	RSMA	Periodo	Fuente
		grados	grados	msnm	km	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹	cal cm ⁻² día ⁻¹			
1	Parin. Ex ENDESA	-18,2017	-69,2681	4.390	112,7400	468	430	428	471	413	380	401	472	513	589	608	526	474,92	NP	1
2	Murmurtane	-18,3517	-69,5348	3.280	81,8083	518	450	455	486	411	373	396	466	533	613	634	620	496,25	NP	1
3	Arica	-18,4850	-70,3181	100	0,8974	533	501	398	378	296	242	233	283	343	424	463	499	382,75	NP	1
4	Pica	-20,5017	-69,3515	1.250	84,3389	571	556	534	477	471	358	382	449	518	595	641	634	515,50	NP	1
5	Arica Chacalluta	-18,3347	-70,3344	58	4,6304	523	518	458	408	303	229	222	253	307	405	452	529	383,92	estimado	7
6	Puchultisa Endesa	-19,3850	-68,9514	4.200	131,3236	568	551	548	456	439	384	400	463	522	560	607	604	508,50	estimado	7
7	Cavanca (Iquique)	-20,2183	-70,1515	8	0,4833	573	562	513	441	335	272	245	279	320	406	507	572	418,75	estimado	7
8	Canchones	-20,4683	-69,5848	900	59,8934	647	616	573	485	386	338	376	444	522	608	651	621	522,25	estimado	7
9	Iquique Aracena	-20,5350	-70,1848	52	1,0708	612	582	558	435	348	279	280	306	383	472	512	576	445,25	estimado	7
10	Calama El Loa	-22,5016	-68,9348	2.270	134,0684	619	590	598	471	384	349	364	425	507	595	631	658	515,92	estimado	7
11	Antof. Cerro Moreno	-23,4349	-70,4349	135	5,3078	583	562	500	407	321	275	283	318	367	436	493	563	425,67	estimado	7
12	Arequipa	-16,3408	-71,5666	2.524	90,1069	533	491	478	499	443	425	441	484	539	596	616	570	509,58	NP	6
13	Tacna	-18,0667	-70,2808	452	31,0633	462	480	437	417	371	339	342	383	416	493	520	509	430,75	NP	6
14	Oruro	-17,9667	-67,0833	3.708	344,6780	575	496	508	500	409	368	390	442	499	540	565	575	489,00	NP	6
15	Challapata	-18,8667	-66,7667	3.720	368,0623	636	589	506	494	436	397	413	471	545	615	630	611	529,00	NP	6
16	Oploca	-21,3167	-65,7667	3.120	445,0774	585	545	508	465	398	360	382	449	503	565	592	578	494,00	NP	6
17	Charana	-17,5913	-69,4417	4.057	129,8669	425	394	432	461	411	382	400	457	490	550	544	472	451,00	NP	6

LAT: Latitud LON: Longitud ALT: Altitud DL: Distancia al litoral RSMA: Radiación solar media anual NP: No presenta

^{1/}Referencias geográficas en Datum WGS84 coordenadas geográficas Lat/Lon

Fuente: Elaboración propia en base a recursos de (1) CORFO (1982); (6) FAO (1985); (7) CNR-CIREN (1997).

**APÉNDICE II: ANÁLISIS DE VARIANZA Y ESTADÍSTICAS DE MODELOS
TOPOCLIMÁTICOS**

Cuadro 25. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de enero para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: ENE					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	50,3177	8,36853	6,01272	0,0000	
LAT	-41,0669	5,97417	-6,87408	0,0000	
DL^2	-0,000441392	0,0000568715	-7,76121	0,0000	
LAT*LON	-0,605917	0,0901625	-6,72028	0,0000	
LON*ALT	0,0000764346	0,00000518538	14,7404	0,0000	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1464,18	4	366,044	371,59	0,0000
Residual	22,6565	23	0,985066		
Total (Corr.)	1486.83	27			

R-squared = 98,4762 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 98,2112 percent
Standard Error of Est. = 0,992505
Mean absolute error = 0,740898
Durbin-Watson statistic = 2,52926 (P=0,0275)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,269839

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .

Standard Error of Est.: error estándar de estimación.

Mean absolute error: error medio absoluto.

Cuadro 26. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de febrero para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: FEB					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	21,2614	0,325324	65,3546	0,0000	
DL	7,58183	1,41918	5,34239	0,0000	
DL^2	-0,00142111	0,000206639	-6,87727	0,0000	
LAT*ALT	0,000288386	0,0000176801	16,3113	0,0000	
LON*DL	0,10628	0,0202802	5,24059	0,0000	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1502,81	4	375,702	506,14	0,0000
Residual	17,0728	23	0,742293		
Total (Corr.)	1519,88	27			

R-squared = 98,8767 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 98,6813 percent
Standard Error of Est. = 0,861565
Mean absolute error = 0,621637
Durbin-Watson statistic = 2,33879 (P=0,0823)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,171274

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .

Standard Error of Est.: error estándar de estimación

Mean absolute error: error absoluto medio

Cuadro 27. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de marzo para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: MAR					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	-618,246	269,991	-2,28988	0,0320	
LON	-9,08417	3,84231	-2,36425	0,0273	
DL	11,8879	2,77679	4,28118	0,0003	
DL^2	-0,00206892	0,000398021	-5,19802	0,0000	
LAT*ALT	0,000284416	0,0000201389	14,1227	0,0000	
LON*DL	0,1661	0,0391213	4,24578	0,0003	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1341,38	5	268,276	278,73	0,0000
Residual	21,1752	22	0,96251		
Total (Corr.)	1362,56	27			
R-squared = 98,4459 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 98,0927 percent					
Standard Error of Est. = 0,981076					
Mean absolute error = 0,704138					
Durbin-Watson statistic = 3,11776 (P=0,0000)					
Lag 1 residual autocorrelation = -0,563136					
R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .					
Standard Error of Est.: error estándar de estimación					
Mean absolute error: error medio absoluto					

Cuadro 28. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de abril para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: ABR						
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value		
CONSTANT	18,0112	0,516393	34,8788	0,0000		
DL	0,0468992	0,0164281	2,85483	0,0087		
ALT^2	-8,48287E-7	6,08876E-8	-13,932	0,0000		
DL^2	-0,000254688	0,0000678736	-3,75239	0,0010		
Analysis of Variance						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
Model	1263,93	3	421,31	225,38	0,0000	
Residual	44,8641	24	1,86934			
Total (Corr.)	1308.8	27				
R-squared = 96,5721 percent						
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,1436 percent						
Standard Error of Est. = 1,36724						
Mean absolute error = 0,975373						
Durbin-Watson statistic = 2,36378 (P=0,0876)						
Lag 1 residual autocorrelation = -0,190303						
R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .						
Standard Error of Est.: error estándar de estimación						
Mean absolute error: error medio absoluto						

Cuadro 29. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de mayo para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: MAY

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	16,6577	0,905207	18,4021	0,0000
DL	0,0370144	0,0169967	2,17775	0,0404
DCA	2,99363	1,39912	2,13965	0,0437
ALT^2	-7,41748E-7	6,81546E-8	-10,8833	0,0000
DL^2	-0,000378699	0,0000727973	-5,2021	0,0000
LON*DCA	0,0425882	0,0200995	2,11886	0,0456

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1461,63	5	292,326	173,67	0,0000
Residual	37,0317	22	1,68326		
Total (Corr.)	1498,66	27			

R-squared = 97,529 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 96,9674 percent

Standard Error of Est. = 1,29741

Mean absolute error = 0,854938

Durbin-Watson statistic = 2,53964 (P=0,0314)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,275462

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .

Standard Error of Est.: error estándar de estimación

Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 30. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de junio para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: JUN					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	16,0644	0,317899	50,5331	0,0000	
ALT^2	-6,5848E-7	4,53782E-8	-14,5109	0,0000	
DL^2	-0,000221432	0,0000436966	-5,0675	0,0000	
DL*DCA	0,000394765	0,000139202	2,83592	0,0091	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1405,13	3	468,377	363,30	0,0000
Residual	30,9413	24	1,28922		
Total (Corr.)	1436,07	27			

R-squared = 97,8454 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 97,5761 percent
Standard Error of Est. = 1,13544
Mean absolute error = 0,858324
Durbin-Watson statistic = 2,3807 (P=0,0991)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,20051

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .
Standard Error of Est.: error estándar de estimación
Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 31. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de julio para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: JUL					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	-14132,0	3290,7	-4,29454	0,0003	
LON	-406,432	94,9621	-4,27994	0,0003	
LON^2	-2,91886	0,68509	-4,26054	0,0003	
ALT^2	-8,38424E-7	5,83185E-8	-14,3766	0,0000	
ALT*DCA	0,0000170932	0,00000741411	2,3055	0,0305	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1439,14	4	359,784	178,20	0,0000
Residual	46,437	23	2,019		
Total (Corr.)	1485,57	27			

R-squared = 96,8741 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,3305 percent
Standard Error of Est. = 1,42092
Mean absolute error = 1,03267
Durbin-Watson statistic = 2,36632 (P=0,0770)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,187143

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .

Standard Error of Est.: error estándar de estimación

Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 32. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de agosto para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: AGO

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	13,2113	0,832918	15,8615	0,0000
DL	0,0627646	0,0171077	3,66879	0,0013
ALT^2	-7,63733E-7	6,87428E-8	-11,11	0,0000
DL^2	-0,000395533	0,0000760747	-5,19927	0,0000
LAT*DCA	-0,00275129	0,000903187	-3,0462	0,0057

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1365,33	4	341,332	177,12	0,0000
Residual	44,3226	23	1,92707		
Total (Corr.)	1409,65	27			

R-squared = 96,8558 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 96,309 percent

Standard Error of Est. = 1,38819

Mean absolute error = 1,00344

Durbin-Watson statistic = 2,31755 (P=0,1092)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,163301

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .

Standard Error of Est.: error estándar de estimación

Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 33. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de septiembre para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: SEP					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	15,9127	0,522573	30,4506	0,0000	
ALT	0,00748951	0,00184239	4,06511	0,0004	
ALT^2	-0,00000147892	1,74783E-7	-8,46145	0,0000	
LAT*ALT	0,000232602	0,0000749237	3,10451	0,0048	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1294,27	3	431,423	207,82	0,0000
Residual	49,8219	24	2,07591		
Total (Corr.)	1344,09	27			

R-squared = 96,2933 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 95,8299 percent
Standard Error of Est. = 1,4408
Mean absolute error = 0,983986
Durbin-Watson statistic = 2,07325 (P=0,3131)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,0450723

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .
Standard Error of Est.: error estándar de estimación
Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 34. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de octubre para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: OCT					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	16,6029	0,476441	34,8478	0,0000	
DL	0,0673674	0,015157	4,44462	0,0002	
ALT^2	-8,6742E-7	5,61768E-8	-15,4409	0,0000	
DL^2	-0,000334602	0,0000626224	-5,34316	0,0000	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1199,59	3	399,863	251,28	0,0000
Residual	38,1906	24	1,59127		
Total (Corr.)	1237,78	27			
R-squared = 96,9146 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,5289 percent					
Standard Error of Est. = 1,26146					
Mean absolute error = 0,912567					
Durbin-Watson statistic = 2,1518 (P=0,2193)					
Lag 1 residual autocorrelation = -0,0813516					
R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .					
Standard Error of Est.: error estándar de estimación					
Mean absolute error: error medio absoluto					

Cuadro 35. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de noviembre para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: NOV					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	16,2988	0,805611	20,2316	0,0000	
DL	5,4515	2,19813	2,48007	0,0213	
DCA	0,0505474	0,0160418	3,15098	0,0046	
DL^2	-0,00126686	0,000317168	-3,99427	0,0006	
LAT*ALT	0,000248508	0,0000272844	9,10806	0,0000	
LON*DL	0,0756134	0,0314188	2,40663	0,0249	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1155,47	5	231,093	132,63	0,0000
Residual	38,3339	22	1,74245		
Total (Corr.)	1193,8	27			
R-squared = 96,7889 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,0591 percent					
Standard Error of Est. = 1,32002					
Mean absolute error = 1,00235					
Durbin-Watson statistic = 2,87118 (P=0,0016)					
Lag 1 residual autocorrelation = -0,436797					
R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .					
Standard Error of Est.: error estándar de estimación					
Mean absolute error: error medio absoluto					

Cuadro 36. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media del mes de diciembre para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: DIC						
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value		
CONSTANT	19,2596	0,471406	40,8557	0,0000		
DL	0,0384476	0,0149969	2,56371	0,0170		
ALT^2	-8,61571E-7	5,55832E-8	-15,5006	0,0000		
DL^2	-0,000189008	0,0000619606	-3,05045	0,0055		
Analysis of Variance						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
Model	1250,99	3	416,996	267,68	0,0000	
Residual	37,3877	24	1,55782			
Total (Corr.)	1288,38	27				
R-squared = 97,0981 percent						
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,7353 percent						
Standard Error of Est. = 1,24813						
Mean absolute error = 0,970816						
Durbin-Watson statistic = 2,26079 (P=0,1419)						
Lag 1 residual autocorrelation = -0,167601						
R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .						
Standard Error of Est.: error estándar de estimación						
Mean absolute error: error medio absoluto						

Cuadro 37. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de temperatura media anual para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: PA					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	17,7104	0,405296	43,6974	0,0000	
DL	0,0409764	0,0128937	3,17801	0,0041	
ALT^2	-8,59106E-7	4,77883E-8	-17,9773	0,0000	
DL^2	-0,000230091	0,0000532713	-4,31923	0,0002	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1329,92	3	443,308	384,97	0,0000
Residual	27,6366	24	1,15152		
Total (Corr.)	1357,56	27			

R-squared = 97,9642 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 97,7098 percent
Standard Error of Est. = 1,07309
Mean absolute error = 0,727253
Durbin-Watson statistic = 2,32224 (P=0,1073)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,167525

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .
Standard Error of Est.: error estándar de estimación
Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 38. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión de modelo topoclimático ajustado de precipitación media anual, para zonas bajo los 2.000 msnm (Sector 1), de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: PMA					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	-704717,0	74205,4	-9,49684	0,0000	
LAT	-1561,17	166,622	-9,36953	0,0000	
LON	-19629,5	2070,27	-9,48159	0,0000	
DL	212,296	20,4839	10,3641	0,0000	
LAT^2	-0,570243	0,121895	-4,67815	0,0000	
LON^2	-136,67	14,4412	-9,46389	0,0000	
DL^2	-0,014765	0,00142017	-10,3966	0,0000	
LAT*LON	-21,9027	2,31137	-9,47606	0,0000	
LAT*ALT	-0,000261386	0,0000793309	-3,29488	0,0010	
LAT*DL	0,269907	0,023006	11,7321	0,0000	
LON*ALT	0,0000752152	0,0000221196	3,40039	0,0007	
LON*DL	2,94842	0,285751	10,3181	0,0000	
ALT*DL	0,0000592969	0,00000322467	18,3885	0,0000	

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	5263,18	12	438,599	1003,46	0,0000
Residual	514,452	1177	0,437088		
Total (Corr.)	5777,64	1189			

R-squared = 91,0958 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 91,005 percent
Standard Error of Est. = 0,661126
Mean absolute error = 0,470734
Durbin-Watson statistic = 0,891007 (P=0,0000)
Lag 1 residual autocorrelation = 0,542211

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .
Standard Error of Est.: error estándar de estimación
Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 39. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de precipitación media anual, para zonas sobre 2.000 msnm (Sector 2), de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Dependent variable: Ln_PMA

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Ln_ALT	2,22417	0,0458582	48,5011	0,0000
Ln_DL	1,21198	0,0615078	19,7044	0,0000
Ln_LAT	-6,45229	0,113669	-56,764	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	12469,9	3	4156,65	56159,42	0,0000
Residual	38,1178	515	0,0740152		
Total	12508,1	518			

R-squared = 99,6953 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,6941 percent

Standard Error of Est. = 0,272057

Mean absolute error = 0,209299

Durbin-Watson statistic = 1,12524

Lag 1 residual autocorrelation = 0,437244

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación (ajustado por grados de libertad) – R^2_{aj} .

Standard Error of Est.: error estándar de estimación

Mean absolute error: error medio absoluto

Cuadro 40. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión de modelos ajustados entre los valores observados (X) y estimados (Y) de precipitación media anual para estaciones meteorológicas de zonas sobre los 2.000 msnm (Sector 2) de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá. La pendiente del modelo (b) fue utilizada como factor de corrección en la Ecuación 9.

(a) Modelo con intercepto no significativo					
Dependent variable: PMA Est					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
CONSTANT	1.32765	20.8449	0.0636918	0.9497	
PMA OBS	0.814391	0.0796217	10.2282	0.0000	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	263668.0	1	263668.0	104.62	0.0000
Residual	65528.2	26	2520.32		
Total (Corr.)	329196.0	27			
R-squared = 80.0945 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 79.3289 percent					
Standard Error of Est. = 50.2028					
Mean absolute error = 36.3251					
Durbin-Watson statistic = 1.54635 (P=0.0887)					
Lag 1 residual autocorrelation = 0.16587					
(b) Modelo sin intercepto					
Dependent variable: PMA Est					
Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value	
PMA OBS	0.818906	0.0355647	23.0258	0.0000	
Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1.28695E6	1	1.28695E6	530.19	0.0000
Residual	65538.5	27	2427.35		
Total	1.35249E6	28			
R-squared = 95.1542 percent					
R-squared (adjusted for d.f.) = 95.1542 percent					
Standard Error of Est. = 49.2681					
Mean absolute error = 36.2685					
Durbin-Watson statistic = 1.547					
Lag 1 residual autocorrelation = 0.165994					
R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación ajustado – R^2_{aj} .					
Standard Error of Est.: error estándar de estimación					
Mean absolute error: error medio absoluto					

Cuadro 41. Análisis de varianza y estadísticas de la regresión del modelo topoclimático ajustado de radiación solar media anual para las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá.

Multiple Regression Analysis						

Dependent variable: RS Anual						

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value		

CONSTANT	-1253,11	253,323	-4,9467	0,0006		
LON	10,0292	3,34425	2,99893	0,0134		
LAT^2	-4,8359	0,671442	-7,20225	0,0000		
LAT*LON	2,88466	0,397534	7,2564	0,0000		
LAT*ALT	-0,00048553	0,0000616093	-7,8808	0,0000		
LON*DL	-0,0118781	0,00121625	-9,7661	0,0000		
ALT*DL	-0,0000933761	0,0000153626	-6,07815	0,0001		

Analysis of Variance						

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	

Model	4745,56	6	790,927	32,52	0,0000	
Residual	243,184	10	24,3184			

Total (Corr.)	4988,75	16				

R-squared = 95,1253 percent						
R-squared (adjusted for d.f.) = 92,2006 percent						
Standard Error of Est. = 4,93137						
Mean absolute error = 3,03364						
Durbin-Watson statistic = 1,85866 (P=0,2780)						
Lag 1 residual autocorrelation = 0,00738081						

R – square (adjusted for d. f.): coeficiente de determinación ajustado - R^2_{aj} .

Standard Error of Est.: error estándar de estimación

Mean absolute error: error medio absoluto

**APÉNDICE III: SUPERFICIE DE UNIDADES CARTOGRÁFICAS Y TÉRMINOS
UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA
Y CAPACIDAD DE CARGA**

Cuadro 42. Superficie y términos por unidad cartográfica utilizados para la estimación de producción de materia seca anual y capacidad de carga del área de estudio.

Unidad cartográfica	Superficie		<i>Psplen</i> ^{1/}	<i>Pspdes</i> ^{2/}	<i>Pspmdes</i> ^{3/}	<i>Psp</i> ^{4/}	Condición ^{5/}	<i>FUA</i> ^{6/}	<i>MD</i> ^{7/}	<i>FCDiet</i> ^{8/}
	ha	%								
<i>F. orthophylla</i> – <i>D. breviaristata</i> – <i>P. lucida</i>	175.045,715	25,968	23,303	25,260	62,445	87,704	Buena	0,5	5,460	0,18
<i>F. orthophylla</i> – <i>D. breviaristata</i>	78.384,488	11,628	17,205	28,135	59,179	87,314	Buena	0,5	5,315	0,24
<i>F. orthophylla</i> – <i>P. quadrangularis</i> – <i>D. breviaristata</i>	64.620,244	9,586	27,042	15,304	84,559	99,863	Regular	0,3	5,394	0,19
<i>O. andina</i> - <i>D. curvula</i> – <i>W. pygmaea</i>	37.059,866	5,498	4,327	43,864	51,407	95,271	Buena	0,5	6,700	0,69
<i>P. tarapacana</i> – <i>F. orthophylla</i> – <i>A. compacta</i>	42.807,408	6,350	71,246	0,000	36,611	36,611	Regular	0,3	5,411	0,07
<i>A. compacta</i> – <i>F. orthophylla</i> – <i>P. quadrangularis</i>	40.994,157	6,081	61,867	4,892	44,596	49,488	Regular	0,3	5,688	0,07
<i>Baccharis spp.</i> - <i>Fabiana spp.</i> - <i>Senecio spp.</i>	58.517,380	8,681	80,101	0,000	18,657	18,657	Pobre	0,1	4,681	0,07
<i>P. besseri</i> – <i>F. deserticola</i>	11.199,655	1,661	99,917	0,000	0,581	0,581	Pobre	0,1	9,000	0,07
<i>F. deserticola</i> - <i>Atriplex sp.</i> – <i>E. rupestris</i>	17.453,445	2,589	99,807	0,096	17,208	17,305	Pobre	0,1	2,955	0,07
<i>Senecio sp.</i> – <i>C. brevistylus</i> – <i>O. leucotrichus</i>	64.098,925	9,509	60,667	0,000	0,000	0,000	Pésima	0,0	0,000	0,07
Cultivos	4.634,235	0,687	-	-	-	-	-	-	-	-
Escasa o nula vegetación	62.677,718	9,298	-	-	-	-	-	-	-	-
Lagos o lagunas	3.602,248	0,534	-	-	-	-	-	-	-	-
Salar	12.998,862	1,928	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	674.094,347	100,000	-	-	-	-	-	-	-	-

^{1/}*Psplen*: porcentaje de especies leñosas.

^{2/}*Pspdes*: porcentaje de especies deseables.

^{3/}*Pspmdes*: porcentaje de especies menos deseables.

^{4/}*Psp*: porcentaje de especies palatables.

^{5/}Condición estimada en base a método de Huss (FAO, 1996).

^{6/}*FUA*: factor de uso apropiado.

^{7/}*MD*: energía metabolizable.

^{8/}*FCDiet*: factor de corrección de acuerdo a las preferencias de la vicuña por determinado tipo de pradera.