



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **DATOS CLIMATOLÓGICOS DE CHILE PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO CHILE-SR**

**JUAN FRANCISCO ZANOLLI DE SOLMINIHAC**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**RODRIGO ESCOBAR MORAGAS**

Santiago de Chile, Mayo, 2011

Se autoriza la reproducción total o parcial,  
con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento,  
incluyendo la cita bibliográfica del documento.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **DATOS CLIMATOLÓGICOS DE CHILE PARA LA ELABORACIÓN DEL MODELO CHILE-SR**

**JUAN FRANCISCO ZANOLLI DE SOLMNINIAC**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**RODRIGO ESCOBAR MORAGAS**

**JORGE ALFREDO GIRONÁS LEÓN**

**JORGE FERNANDO CARRASCO CERDA**

**JORGE RAFAEL VERA ANDREO**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Mayo, 2011

*A mi familia.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo no lo podría haber desarrollado sin el apoyo incondicional de mi familia, de mis seres queridos, así como también del importante apoyo, consejo y confianza de todo el grupo de trabajo de energía solar, en especial de mi profesor guía Rodrigo Escobar. Agradezco también a Gina Charpentier, Rodrigo Arroyo, Juan Pablo Justiniano, Cristóbal Boetto, Vicente Parot y Fernando Ramos Martins por sus comentarios y consejos y a todos los auxiliares y secretarias del Departamento de Mecánica por su cercanía y amistad.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.,
AGRADECIMIENTOS .....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	9
3. MODELOS DE INTERPOLACIÓN UTILIZADOS .....	10
4. CONSIDERACIONES GENERALES .....	14
5. TEMPERATURA .....	16
5.1. DATOS EXISTENTES .....	16
5.2. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS .....	24
5.2.1. BRASIL-SR.....	25
5.2.2. CORRECCION POR ALTURA 6,5° .....	29
5.2.3. COMBINADO .....	32
6. HUMEDAD RELATIVA .....	36
6.1. DATOS EXISTENTES .....	36
6.2. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS .....	41
6.2.1. BRASIL – SR.....	42
6.2.2. EMPÍRICO DE CORRECCIÓN POR ALTURA .....	44
7. ALBEDO .....	47
7.1. DESCRIPCIÓN GENERAL .....	47

7.2. PROCEDIMIENTO MODIS Y MAPAS OBTENIDOS .....	48
8. RESULTADOS.....	62
9. CONCLUSIONES .....	76
9.1. RECOMENDACIONES FUTURAS.....	79
BIBLIOGRAFÍA .....	81
10. ANEXOS .....	83

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1.1: MAPA DE RADIACIÓN SOLAR EN CHILE DEL BANCO NACIONAL SOLARIMÉTRICO Y DE ESTIMACIONES SATELITALES.....	3
FIGURA 3.1: REPRESENTACIÓN DE UNA INTERPOLACIÓN KRIGING EN UNA DIMENSIÓN. ....	11
FIGURA 4.1: DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO BRASIL-SR. ....	14
FIGURA 5.1: ÍNDICE DE TEMPERATURA GLOBAL .....	16
FIGURA 5.2: FORMATO DE LOS DATOS DE TEMPERATURA ENTREGADOS POR LA DMC .....	17
FIGURA 5.3: COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE SANTIAGO .....	18
FIGURA 5.4: COMPORTAMIENTO NORTE – SUR DE LA TEMPERATURA MEDIA DE CHILE.....	19
FIGURA 5.5: COMPORTAMIENTO OESTE – ESTE DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA DE CHILE .....	20
FIGURA 5.6: COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA SEGÚN ALTURA EN CHILE .....	21
FIGURA 5.7: COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA EN LA ZONA NORTE DE CHILE .....	22
FIGURA 5.8: COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA CENTRO DE CHILE.....	22
FIGURA 5.9: COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA SUR DE CHILE.....	23
FIGURA 5.10: VARIOGRAMA DE TEMPERATURAS MEDIAS DEL MES DE ENERO PARA TODAS LAS DIRECCIONES A PARTIR DE LOS DATOS DE LA DMC .....	25
FIGURA 5.11: MAPA DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA ENERO UTILIZANDO EL MÉTODO "BRASIL" .....	26

FIGURA 5.12: VARIOGRAMA DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA JULIO PARA TODAS LAS DIRECCIONES A PARTIR DE LOS DATOS DE LA DMC..	27
FIGURA 5.13: MAPA DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA JULIO UTILIZANDO EL MÉTODO "BRASIL" .....	28
FIGURA 5.14: MAPA DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA EL MES DE ENERO UTILIZANDO EL MÉTODO "ALTURA" .....	30
FIGURA 5.15: MAPA DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA EL MES DE JULIO UTILIZANDO EL MÉTODO "ALTURA" .....	31
FIGURA 5.16: VARIOGRAMA DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA EL MES DE ENERO EN TODAS LAS DIRECCIONES.....	32
FIGURA 5.17: MAPA DE TEMPERATURAS MEDIAS DE ENERO PARA EL MÉTODO "COMBINADO" PARA CHILE.....	33
FIGURA 5.18: VARIOGRAMA DE TEMPERATURAS MEDIAS PARA EL MES DE JULIO EN TODAS LAS DIRECCIONES.....	34
FIGURA 5.19: MAPA DE TEMPERATURAS MEDIAS DE JULIO PARA EL MÉTODO "COMBINADO" PARA CHILE.....	35
FIGURA 6.1: FORMATO DE LOS DATOS DE HUMEDAD RELATIVA ENTREGADOS POR LA DMC.....	36
FIGURA 6.2: COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LA HUMEDAD RELATIVA MEDIA DE SANTIAGO.....	37
FIGURA 6.3: COMPORTAMIENTO NORTE – SUR DE LA HUMEDAD RELATIVA MEDIA EN CHILE.....	38
FIGURA 6.4: COMPORTAMIENTO OESTE – ESTE DE LA HUMEDAD RELATIVA MEDIA EN CHILE.....	39
FIGURA 6.5: COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD RELATIVA MEDIA CON LA ALTURA EN CHILE.....	40
FIGURA 6.6: MAPA DE HUMEDAD RELATIVA MEDIA PARA EL MES DE ENERO EN CHILE CON EL MÉTODO "BRASIL-SR" .....	43

FIGURA 6.7: MAPA DE HUMEDAD RELATIVA MEDIA EN EL MES DE JULIO PARA CHILE CON EL MÉTODO “BRASIL-SR” .....	43
FIGURA 6.8: MAPA DE HUMEDAD RELATIVA MEDIA PARA EL MES DE ENERO EN CHILE .....	45
FIGURA 6.9: MAPA DE HUMEDAD RELATIVA MEDIA PARA EL MES DE JULIO EN CHILE.....	46
FIGURA 7.1: MAPA DE “BLACK-SKY” ALBEDO PARA EL MES DE ENERO EN CHILE .....	49
FIGURA 7.2: MAPA DE “BLACK-SKY” ALBEDO PARA EL MES DE JULIO EN CHILE .....	50
FIGURA 7.3: MAPA DE “WHITE-SKY” ALBEDO PARA EL MES DE ENERO EN CHILE .....	52
FIGURA 7.4: MAPA DE “WHITE-SKY” ALBEDO PARA EL MES JULIO EN CHILE .....	53
FIGURA 7.5: MAPA PARA LOS ÁNGULOS LOCAL SOLAR DEL ZÉNIT EN TODO CHILE .....	54
FIGURA 7.6: “OPTICAL DEPTH” PARA EL MES DE ENERO EN TODO CHILE.....	55
FIGURA 7.7: “OPTICAL DEPTH” PARA EL MES DE JULIO EN TODO CHILE.....	56
FIGURA 7.8: ILUMINACIÓN DIFUSA PARA EL MES DE ENERO PARA TODO CHILE .....	58
FIGURA 7.9: ILUMINACIÓN DIFUSA PARA EL MES DE JULIO PARA TODO CHILE .....	59
FIGURA 7.10: ALBEDO REAL TERRESTRE PARA EL MES DE ENERO PARA TODO CHILE.....	60
FIGURA 7.11: ALBEDO REAL TERRESTRE PARA EL MES DE JULIO PARA TODO CHILE.....	61
FIGURA 8.1: MAPA DE CLIMAS DE CHILE.....	63
FIGURA 8.2: MAPA DE TEMPERATURA MEDIA DE ENERO CON LA RESOLUCIÓN DEL “MODELO COMBINADO” .....	65

FIGURA 8.3: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES ENERO.....	68
FIGURA 8.4: MAPA DE HUMEDAD RELATIVA MEDIA DE ENERO CON LA RESOLUCIÓN DEL “MODELO EMPÍRICO DE ALTURA” .....	69
FIGURA 8.5: MAPA DE ALBEDO CON LA RESOLUCIÓN DEL “MODELO COMBINADO” .....	70
FIGURA 8.6: COMPARACIÓN DE MAPAS OBTENIDOS PARA EL MES DE ENERO PARA ANÁLISIS .....	71
FIGURA 8.7: COMPARACIÓN DE MAPAS OBTENIDOS PARA EL MES DE ENERO PARA ANÁLISIS .....	72
FIGURA 8.8: COMPARACIÓN DE MAPAS OBTENIDOS PARA EL MES DE ENERO PARA ANÁLISIS .....	73
FIGURA 8.9: COMPARACIÓN DE MAPAS OBTENIDOS PARA ANÁLISIS .....	74
FIGURA 11.1: LISTA DE ESTACIONES DE TEMPERATURA ENTREGADAS POR LA DMC .....	83
FIGURA 11.2: TEMPERATURAS DE FEBRERO EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	84
FIGURA 11.3: TEMPERATURAS DE MARZO EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	85
FIGURA 11.4: TEMPERATURAS DE ABRIL EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	86
FIGURA 11.5: TEMPERATURAS DE MAYO EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	87
FIGURA 11.6: TEMPERATURAS DE JUNIO EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	88
FIGURA 11.7: TEMPERATURAS DE AGOSTO EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	89
FIGURA 11.8: TEMPERATURAS DE SEPTIEMBRE EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	90

FIGURA 11.9: TEMPERATURAS DE OCTUBRE EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	91
FIGURA 11.10: TEMPERATURAS DE NOVIEMBRE EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	92
FIGURA 11.11: TEMPERATURAS DE DICIEMBRE EN CHILE UTILIZANDO EL MODELO “COMBINADO” .....	93
FIGURA 11.12: RESULTADOS CORRELACIÓN HUMEDAD RELATIVA VS LATITUD SEGÚN EL TEST NO PARAMÉTRICO DE KENDALL .....	94
FIGURA 11.13: RESULTADOS CORRELACIÓN HUMEDAD RELATIVA VS LONGITUD SEGÚN EL TEST NO PARAMÉTRICO DE KENDALL.....	94
FIGURA 11.14: RESULTADOS CORRELACIÓN HUMEDAD RELATIVA VS ALTURA SEGÚN EL TEST NO PARAMÉTRICO DE KENDALL .....	95
FIGURA 11.15: LISTA DE ESTACIONES DE HUMEDAD RELATIVA ENTREGADAS POR LA DMC .....	95
FIGURA 11.16: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE FEBRERO CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	96
FIGURA 11.17: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE MARZO CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	97
FIGURA 11.18: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE ABRIL CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	98
FIGURA 11.19: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE MAYO CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	99
FIGURA 11.20: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE JUNIO CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	100
FIGURA 11.21: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE AGOSTO CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	101
FIGURA 11.22: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE SEPTIEMBRE CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	102

FIGURA 11.23: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE OCTUBRE CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	103
FIGURA 11.24: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE NOVIEMBRE CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	104
FIGURA 11.25: HUMEDAD RELATIVA PARA EL MES DE DICIEMBRE CON EL MÉTODO “EMPÍRICO” .....	105
FIGURA 11.26: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE FEBRERO PARA CHILE .....	106
FIGURA 11.27: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE MARZO PARA CHILE .....	107
FIGURA 11.28: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE ABRIL PARA CHILE .....	108
FIGURA 11.29: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE MAYO PARA CHILE .....	109
FIGURA 11.30: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE JUNIO PARA CHILE .....	110
FIGURA 11.31: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE AGOSTO PARA CHILE .....	111
FIGURA 11.32: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE SEPTIEMBRE PARA CHILE .....	112
FIGURA 11.33: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE OCTUBRE PARA CHILE .....	113
FIGURA 11.34: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE NOVIEMBRE PARA CHILE .....	114
FIGURA 11.35: ALBEDO REAL SUPERFICIAL PARA EL MES DE DICIEMBRE PARA CHILE .....	115
FIGURA 11.36: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES FEBRERO ...	116
FIGURA 11.37: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES MARZO.....	117
FIGURA 11.38: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES ABRIL .....	118

FIGURA 11.39: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES MAYO .....	119
FIGURA 11.40: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES JUNIO.....	120
FIGURA 11.41: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES JULIO .....	121
FIGURA 11.42: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES AGOSTO .....	122
FIGURA 11.43: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES SEPTIEMBRE .....	123
FIGURA 11.44: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES OCTUBRE ..	124
FIGURA 11.45: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES NOVIEMBRE	125
FIGURA 11.46: MAPA DE TIPOS DE ATMÓSFERAS PARA EL MES DICIEMBRE	126

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 7.7.1: CONSTANTES PARA CÁLCULO DE “BLACK-SKY” ALBEDO.....	48
TABLA 7.7.2: CONSTANTES PARA CÁLCULO DE “WHITE-SKY” ALBEDO .....	51
TABLA 8.1: ÍNDICES DE ALBEDOS SUPERFICIALES TÍPICOS.....	64
TABLA 8.2 TABLA DE RANGOS DE TIPOS DE ATMÓSFERA .....	67
TABLA 8.3: RESUMEN DE LOS MÉTODOS SUGERIDOS .....	71

## LISTA DE ACRÓNIMOS

BRDF:	Bidirectiona Reflectance Distribution Function
CORFO:	Corporación de Fomento de la Producción
CNE:	Comisión Nacional de Energía
DEM:	Digital Elevation Model
DMC:	Dirección Meteorológica de Chile
ERNC:	Energías Renovables No Convencionales
GOES:	Geostationary Operational Enviromental Satellites
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change
INE:	Instituto Nacional de Estadísticas
MDL:	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MODIS:	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
SCRS:	Solar Constant Reference Scale
SR:	Solar Radiation
USGS:	United States Geological Survey
WIST:	Warehouse Inventory Search Tool
WRR:	World Reference Radiometers

## **RESUMEN**

Dada la situación de escasas de energía y de falta de diversificación de la matriz energética que posee Chile, es que se busca la forma de explotar el abundante recurso solar presente en el territorio. Para ello es necesario contar con datos primarios de radiación, los que actualmente sólo se encuentran excepcionalmente para algunas localidades de Chile.

El objetivo del siguiente trabajo es obtener los mapas de parámetros climatológicos para ser entregados al modelo de estimación de radiación solar en la superficie terrestre del territorio chileno Chile-SR. El citado modelo requiere los datos de temperatura, humedad relativa, visibilidad y albedo de superficie, de ser posible en una resolución de pixeles de 1 km. por 1 km. Estos datos serán complementados con información satelital y mapas de alturas en la misma resolución para finalmente obtener la estimación satelital del presupuesto de radiación para cada pixel.

Este trabajo utiliza los distintos modelos desarrollados por la comunidad científica en las distintas áreas de estudio, aplicándolos al territorio chileno y verificando sus resultados de manera analítica, dadas las imposibilidades de validación con datos reales.

Para la temperatura y humedad relativa principalmente se comparan los modelos implementados para obtener los resultados análogos en el modelo Brasil-SR con correcciones por altura propuestas.

Para la visibilidad no se encontraron datos que cumplieran con certificaciones científicas que permitieran incluirlos en este estudio, pero se recomienda que se comience a trabajar en ello como parte de un trabajo futuro.

En cuanto al albedo real de superficie se utilizó el modelo y las imágenes de MODIS desarrollado y validado por la NASA, que ya ha sido estudiado en profundidad por la comunidad científica tanto en sus comparaciones con otros modelos como en la validez de sus resultados.

## **ABSTRACT**

The way to exploit the abundant solar energy potential in Chile is being searched, given the energy shortage situation and the lack of diversification of the Chilean energy matrix. This requires the presence of raw radiation data, which is only available for just a few locations in Chile.

The aim of this work is to obtain maps of the climatological parameters, in order to use them in the solar radiation estimation model for the Chilean surface Chile-SR. This model requires temperature, relative humidity, visibility and surface albedo, if possible in a pixel resolution of 1 km. x 1 km. This data will be complemented with satellite images and ground height in the same resolution in order to obtain a satellite estimation of the radiation budget for each pixel.

This study uses the models developed by the scientific community in different areas of expertise, applying them to the Chilean territory and examining the results analytically, due to the impossibility of obtaining statistic validation with real data.

The implemented models are compared, regarding the temperature and relative humidity, in order to obtain similar results to the ones used in Brazil-SR, including an altitude correction.

Regarding visibility, no data meeting scientific certification standards was available so this kind of maps couldn't be included in this study, but it's strongly recommended to start working on this kind data in future works as soon as possible.

Concerning the real surface albedo, the Modis images and model, developed and validated by NASA, were used to obtain and estimation for this parameter in Chile. This model and its results has already been tested, compared and validated extensively by the scientific community.

## 1. INTRODUCCIÓN

La humanidad está pasando por uno de sus más grandes desafíos, enfrentar el proceso de calentamiento global. Dicho problema se encuentra detallado y documentado en el Cuarto Informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2007), en el cual se habla de problemas y consecuencias del aumento en la temperatura promedio del aire troposférico de la Tierra, el derretimiento de grandes masas de nieve y reservas de hielo y el aumento del nivel del mar inundando grandes porciones de terreno hoy habitadas.

Sumado a lo anterior, encontramos el constante aumento en la demanda energética, cercano al 4,16% anual en Chile (CNE, 2008), que hace necesario recurrir a nuevas fuentes de energía que aseguren el suministro energético el desarrollo del país y a todas las personas, tan necesario para seguir mejorando los índices de calidad de vida.

Chile históricamente ha contado en su matriz energética para la generación eléctrica con un gran aporte de energía hidráulica convencional; sin embargo, su participación ha ido disminuyendo en los últimos años debido a un fuerte incremento en el consumo de derivados del petróleo para el sector de transportes y un aumento en la generación eléctrica a partir de gas natural. Por su parte, el uso de Energías Renovables no Convencionales (ERNC) en la generación eléctrica del país, hasta ahora siempre ha sido marginal, alcanzando en julio de 2007 sólo al 2,6% de la capacidad instalada de generación eléctrica. Echo que contrasta con el gran potencial que estas energías tienen en el país, lo que se explica por la baja competitividad económica que tenían respecto de las energías convencionales y a la ausencia de un marco regulador que permita eliminar las barreras para su desarrollo en Chile. Sin embargo, estos dos aspectos están cambiando, lo que se puede apreciar en el constante y vertiginoso avance tecnológico a nivel mundial, en las políticas de fomento de las distintas ERNC que están siendo aplicadas por el Gobierno de Chile. Ejemplos de estas políticas son: entrega de recursos a través de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), penalización de las empresas que no consuman un porcentaje mínimo de ERNC con respecto a su consumo

total, y aplicación del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que consiste en cumplir la ratificación del Protocolo de Kyoto en agosto de 2002. (CNE, 2008).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial han ido en aumento en los últimos años, contribuyendo al calentamiento global al aumentar el efecto invernadero. Aún cuando la contribución de Chile es comparativamente baja, se ha suscrito un acuerdo con las Naciones Unidas para bajarlas aún más en el acuerdo 20-20-20 asumido ante la Conferencia del Cambio Climático de las Naciones Unidas.

Es en este contexto que Chile, al igual que es resto del mundo, quiere disminuir sus emisiones de CO<sub>2</sub>, sin desmerecer su crecimiento ni la calidad de vida de sus habitantes. Para ello se está trabajando en explotar recursos renovables como fuente de energía, dentro de las que encontramos las energías eólica, solar, geotérmica, biomasa, hidroeléctricas en pequeñas escalas (iguales o menores a 20 MW) y mareomotriz.

Actualmente el recurso solar, ya sea de manera directa o difusa, se encuentra disponible en todo el globo terráqueo en diferentes intensidades. Además, se puede tener una primera aproximación de su intensidad en cada localidad, al observar los mapas desarrollados por Sellers et al. (1995), en los que se encuentran caracterizados los distintos aspectos que influyen en los niveles de radiación incidente en la superficie terrestre. De ellos se puede apreciar que en Chile existen algunos de los mejores índices de radiación solar incidente en la superficie terrestre a nivel mundial.

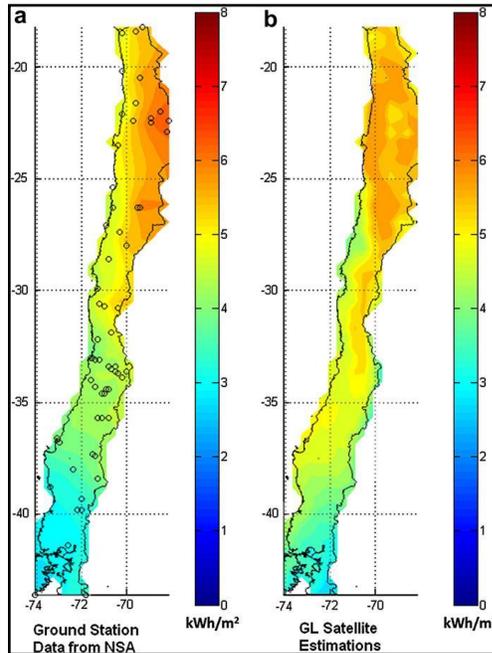


Figura 1.1: Mapa de radiación solar en Chile del Banco Nacional Solarimétrico y de Estimaciones Satelitales

Fuente: Ortega, Escobar y Colle, 2008

Los niveles de radiación presentados en la figura 1.1 son descritos en mayor profundidad en el trabajo de Ortega, Escobar y Colle (2008), sin embargo es necesario alcanzar los estándares de calidad y confianza internacionales<sup>1</sup>, que eventualmente permitirían a los inversionistas extranjeros instalar empresas en Chile para aprovechar dicho recurso, a la vez que promueve la creación de proyectos nacionales basados en las energías solar y eólica.

La energía solar tiene muchas ventajas, como el hecho de ser un recurso prácticamente inagotable cuando hablamos a escalas de tiempo humanas, la disponibilidad del recurso es gratis y además es una fuente limpia. Sin embargo, al igual que las demás formas de energías renovables presenta algunas desventajas, tales como las intermitencias asociadas principalmente a los movimientos de la Tierra, a los factores climatológicos naturales como temperatura, humedad relativa, albedo y en algunos casos la suspensión

<sup>1</sup> Los estándares varían de empresa a empresa, según los riesgos que cada una esté dispuesta a asumir para desarrollar un determinado proyecto.

de material particulado, Ozono ( $O_3$ ), vapor de agua o aerosoles (Muneer, 1997), que al estar presentes en las distintas concentraciones van disminuyendo la cantidad de radiación solar que finalmente alcanza la superficie terrestre. Tomando en cuenta todas estas consideraciones queda solamente a disposición de cada persona si aprovecha o no este recurso y a su ingenio la forma en que lo hace.

Para poder hacer un correcto uso de la energía solar, toda entidad requiere conocer con la mayor exactitud posible su disponibilidad del recurso, de modo de organizar, dimensionar, legislar y/o planificar sus opciones y capacidades, con el fin de aprovechar al máximo cada uno de ellos. Es por esto que los distintos países están desarrollando formas de medir y estimar la cantidad de este recurso con el que disponen en su territorio. Para medir la disponibilidad del recurso solar, es necesario establecer una estación de mediciones, la cual monitorea o calcula las variables de temperatura, visibilidad, humedad relativa, dirección y magnitud del viento, presión, radiación solar directa, radiación solar difusa y radiación solar global. Para llevar a cabo todas ellas, una estación básica debe estar equipada con al menos un termómetro, un higrómetro, un anemómetro y un piranómetro o pirheliómetro. Además de estos instrumentos, cada estación puede contar con un sistema de seguimiento en uno o dos ejes, que le permita medir directamente la radiación directa, en vez de recurrir a relaciones geométricas entre mediciones. Finalmente, la calidad de los equipos que existan en la estación es la que determinará la confiabilidad de sus mediciones, la que es fácilmente conocida gracias a la trazabilidad de cada instrumento hacia los Radiómetros de Referencia Mundial (World Radiometric Reference WRR) o también conocidos como Escala de Referencia de Constante Solar (Solar Constant Reference Scale SCRS). (Duffie y Beckman, 2006)

Por su parte entre los modelos de estimación de radiación solar incidente en la superficie terrestre más conocidos y usados, encontramos los siguientes: DLR Model, Heliosat Model, Suny-Albany Model y Brasil-SR Model. Todos ellos funcionan de manera similar, tomando como variables de entrada (INPUTS) datos satelitales, datos climatológicos y datos geográficos.

Para los datos satelitales son necesarios los canales visible (0,5-0,7  $\mu\text{m}$ .) e infrarrojo (10,2-11,2  $\mu\text{m}$ .) del espectro.

Los datos climatológicos necesarios son: la temperatura, visibilidad, el albedo de superficie, la humedad relativa. Todos ellos con sus respectivos intervalos de tiempo.

Los datos geográficos requeridos son: latitud, longitud y altura. Aún cuando estos modelos presentan distintas resoluciones y pequeñas diferencias en algunos de sus procedimientos, no se ha demostrado que ninguno de ellos posea mayores ventajas o desventajas con respecto a los demás. (Beyer et al., 2004)

Respecto a lo anterior, lo ideal sería trabajar sólo con mediciones en terreno, debido a su gran exactitud, sin embargo es extremadamente costoso y la realización de extrapolaciones e interpolaciones pierde precisión al alejarnos más de 34 km. del lugar físico en que se realiza la medición, donde las estimaciones satelitales resultan más certeras (Perez, Seals, Zelenka, 1997). Por ello, dependiendo de los recursos con los que se cuente, en la práctica se instalan las estaciones que se pueden solventar y mantener, las que son utilizadas como instrumentos de calibración y validación para los modelos satelitales que se desarrollen e implementen para esa localidad.

En Chile actualmente no existe mayor información respecto al desarrollo de algún modelo que permita estimar la radiación solar incidente en su superficie, salvo aquella proporcionada por Ortega et al. (2008). En la práctica, el uso de un modelo no es trivial, ya que no se puede comprar un modelo desarrollado para otra localidad y aplicarlo a Chile, ya que por el gran número de variables de entrada y la especificidad de cada una de ellas, haría que su ejecución fallase en varios puntos de la geografía. Para aquellas localidades en las que funcione, esas variables de entrada deben ser validados, lo que se lleva a cabo realizando mediciones en terreno que son comparadas con ellos.

Tomando en cuenta lo anterior y por facilidades tanto en la transmisión, comprensión y cooperación en el transcurso de aprendizaje y desarrollo del modelo propio es que en Chile se decidió trabajar con el modelo Brasil-SR y utilizarlo como base para crear el modelo Chile-SR. En este contexto, este estudio pretende realizar una revisión de las variables climatológicas de Chile involucradas en el proceso, de modo que permitan, en

conjunto con otros trabajos, completar el modelo Chile-SR, el que entregará un mapa del recurso solar disponible para toda la superficie del territorio chileno.

El modelo Brasil-SR, para estimar la radiación, a grandes rasgos, trabaja a partir de imágenes de satélites geoestacionarios de alta resolución temporal, obteniendo la cobertura efectiva de nubes para cada pixel, índice que es de vital importancia para realizar una buena estimación. Actualmente estas imágenes son obtenidas directamente de las agencias de los satélites GOES, ya que las resoluciones necesarias (1 x 1 km.) son muy superiores a las publicadas de manera gratuita (10 x 10 km.) y que pueden ser descargadas en la actualidad desde la web<sup>2</sup>. Para el modelo Chile-SR estas imágenes serán obtenidas a través de un convenio con la Dirección Meteorológica de Chile. Se trabajará con las imágenes del GOES 13, las que poseen una resolución espacial de 1 por 1 km en el canal visible y de 4 km en el canal infrarrojo térmico.

Para obtener los datos de entrada climatológicos referidos a temperatura, humedad relativa y visibilidad para el modelo Chile-SR, en la resolución que permite estimar cada recurso en la totalidad de la superficie, primero son necesarios los datos de las mediciones obtenidas a lo largo del tiempo en las distintas estaciones. Luego se requiere obtener medias mensuales históricas en cada una de ellas, para lo cual fue firmado el citado acuerdo de colaboración con la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

Una vez obtenidas las medias mensuales, es necesario encontrar una combinación de funciones que represente de buena manera el comportamiento de los datos (variogramas empíricos) en todas las direcciones, para posteriormente crear los variogramas teóricos necesarios para realizar una interpolación Kriging<sup>3</sup> que permita tener una buena representación de los datos en toda superficie terrestre a analizar, en este caso todo el territorio de Chile. La principal diferencia entre los dos tipos de variogramas es que el empírico es discreto, por lo que no permite realizar interpolaciones para toda la superficie, mientras que el variograma teórico es desarrollado a partir de funciones continuas que se comportan de manera similar a los datos, lo que permite realizar

---

<sup>2</sup> Las páginas específicas se entregan más adelante.

<sup>3</sup> Método definido en detalle más adelante.

estimaciones para toda la superficie en estudio, pudiendo alcanzar la resolución que se requiera.

Es importante tener en consideración que para poder obtener buenos resultados de este tipo de interpolaciones, es necesario que los datos cumplan con ciertos requerimientos, por lo cual debe efectuarse una revisión de ellos que permitiera eliminar aquellos datos que parecieran imposibles, increíbles, así como también los que pudieran determinar tendencias marcadas que pusieran en duda la calidad de las interpolaciones realizadas.

La realización de este tipo de interpolaciones dio muy buenos resultados en Brasil, sin embargo para Chile no funcionaron correctamente, por cuanto el efecto del gradiente de altura es preponderante en Chile y no lo es Brasil, donde casi la totalidad del territorio es relativamente plano o con muy pequeñas variaciones. Es por este detalle que para poder obtener buenos resultados de temperatura para el territorio chileno fue necesario realizar un ajuste de altura siguiendo en parte el procedimiento utilizado por Dodson y Marks (1997), que además está en concordancia con los resultados obtenidos por Cavieres y Arroyo (1999) para una zona de Chile. Para realizar los mapas de humedad relativa, se procedió a realizar un análisis de tendencia de los datos, el que demostró que sí existe una relación entre la altura y la humedad relativa, la que fue utilizada para corregir los datos obtenidos a través de la interpolación para todo Chile de las mediciones de las estaciones de la DMC.

Para el cálculo de Albedo de superficie (*“blue-sky” albedo*), es necesario obtener varios productos primarios de MODIS, como son el *“black-sky” albedo*, el *“white-sky” albedo* (ambos presentes en los productos MOD43 del satélite TERRA), el *aerosol optical depth* (incluido en el producto MYD08 del satélite AQUA) y el *zenith angle* (posible de calcular independientemente u obtener directamente del producto MYD08) para cada pixel a analizar. Estos productos pueden ser obtenidos en la página web de la USGS<sup>4</sup> o en la página web de la NASA a través de sus distintos sistemas de descarga de datos, pueden ser de forma gratuita o pagada, sin afectar los resultados de este estudio.

---

<sup>4</sup><http://e4eil01.cr.usgs.gov:22000/WebAccess/drill?next=esdt&revisit=yes&esdt=MCD43A1.5&group=MOTA>

Para efectos de este estudio estos productos primarios fueron descargados de forma gratuita de los sistemas WIST<sup>5</sup> y Giovanni<sup>6</sup> ambos de la agencia NASA, con sus resultados geo-referenciados por latitud y longitud y con posibilidad de filtrar los datos por área y espacio temporal de interés.

Con todos estos productos primarios se puede obtener el “*blue-sky*” *albedo o actual albedo*) mediante unas relaciones que consideran dispersiones isotrópicas, volumétricas y geométricas, así como el ángulo solar del zenit, tal como se describe en *MODIS BRDF / Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document Version 5.0*<sup>7</sup>

Toda la información está debidamente documentado y validado por varios especialistas de la agencia espacial de los Estados Unidos NASA.

---

<sup>5</sup> <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>

<sup>6</sup> [http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=MODIS\\_MONTHLY\\_L3](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_MONTHLY_L3)

<sup>7</sup> [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod09.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf)

## 2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es entregar los mapas de parámetros climatológicos de temperatura, humedad relativa y albedo para el área de estudio de imágenes satelitales en Chile para dar comienzo al desarrollo de las estimaciones de radiación solar incidente mediante el uso de dichas imágenes.

En esta tesis se investigó respecto al desarrollo de un modelo de estimación de radiación solar, incidente en la superficie terrestre del territorio chileno, mediante el uso de imágenes satelitales para la implementación del modelo Chile-SR. Ello en el marco del desarrollo de las ERNC, para ayudar al continuo avance de Chile en materias energéticas, diversificando su matriz y aumentando su capacidad.

En el contexto de lograr implementar el modelo de estimación de radiación antes mencionado, este trabajo es desarrollado con la intención de obtener mapas para los factores climatológicos de Chile, los que en este particular enfoque se acotan a temperatura, humedad relativa, visibilidad y albedo real de superficie.

Para lograr desarrollar un real aporte a las distintas actividades del país, es necesario que los citados mapas tengan una resolución de 1 km. por 1km. para las actividades que requieran de mayor precisión; sin embargo, a partir de ese resultado es posible desarrollar mapas con resoluciones menores que permitan que este estudio sea accesible para otros sectores con menos recursos, pero que les resulte de inmensa utilidad, como por ejemplo es el caso de la agricultura en varias de sus actividades económicas específicas.

Es de suma importancia que los resultados obtenidos cumplan con los requisitos de calidad de los estándares internacionales y se ajusten a las necesidades chilenas y a la realidad de nuestro país, por cuanto se han desarrollado diversos modelos en otros países del mundo, pero que no son directamente aplicables a Chile.

Este trabajo se organizó por partes: en primer lugar se desarrollará el modelo de temperatura, luego se trabajará con la humedad relativa y para finalizar se abordará el albedo real de superficie, cada uno con sus respectivos desarrollos y contextos.

### 3. MODELOS DE INTERPOLACIÓN UTILIZADOS

La revisión bibliográfica para este tipo de datos, sin excepciones, siempre recomienda por la calidad de los resultados la utilización de interpolaciones basadas en el método *Kriging* para evitar rutinas complejas de interpolaciones en tres dimensiones y todas las pruebas realizadas computacionalmente revelaron que los resultados obtenidos con otros métodos no eran representativos de la realidad de Chile, por lo cual no fueron aplicadas en este trabajo y se continuó con interpolaciones basadas en el método *Kriging* o haciendo uso de tres dimensiones.

A continuación se hará una descripción del funcionamiento de los dos tipos de interpolaciones utilizadas en este trabajo.

#### 3.1. KRIGING

Este método de interpolación pertenece a la familia de métodos de mínimos cuadrados, su objetivo es estimar un valor desconocido a partir de otros valores conocidos. El valor estimado por *Kriging* ( $f(x^*)$ ) es una combinación lineal de los demás valores conocidos y que puede ser escrito como:

$$f(x^*) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x^*) f(x_i) \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde  $x^*$  es la ubicación de valor desconocido y  $n$  es la cantidad de datos conocidos.

Los pesos  $\lambda_i$  se obtienen de solucionar un sistema de ecuaciones lineales que viene de suponer que la función  $f$  es una muestra de un proceso aleatorio  $F(x)$ , reduciendo al mínimo el error ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon(x) = F(x) - \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) F(x_i) \quad \text{Ecuación 3.2}$$

A continuación se muestra un ejemplo de una interpolación de datos en una sola dimensión, para ilustrar el procedimiento descrito.

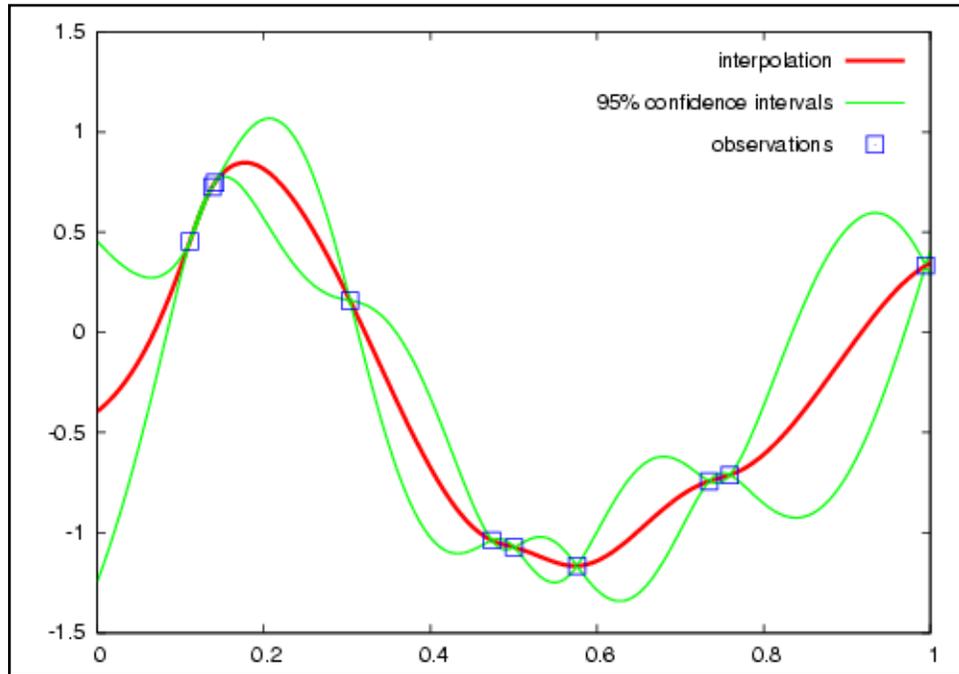


Figura 3.1: Representación de una interpolación Kriging en una dimensión.  
(Fuente: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Example\\_krig.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Example_krig.png))

Para dos dimensiones, el procedimiento es básicamente el mismo, *kriging* interpola el valor  $Z(x_0)$  de un campo aleatorio  $Z(x)$ , donde  $x_0$  es una ubicación sin mediciones, a partir de  $n$  observaciones conocidas cercanas  $Z_i = Z(x_i)$ , donde  $i=1, \dots, n$  del campo al azar de lugares cercanos  $x_1, \dots, x_n$ .

*Kriging* calcula el mejor estimador lineal insesgado  $Z(x_0)$  de  $Z(x_0)$  basado en un modelo estocástico de dependencia espacial a partir del variograma ( $\gamma(x, y)$ ) de los datos, de la esperanza de los mismos ( $\mu = E(Z(x))$ ) y de la función Covarianza del campo  $C(x, y)$  conocido. El variograma es conjunto de funciones que demuestran las tendencias espaciales de los datos, analizando en todas las direcciones el comportamiento de ellos, de este modo permite incluir en un análisis de dos dimensiones componentes de un estudio de tres o más dimensiones, las que sirven para afinar los resultados de la interpolación *kriging* obtenida.

El estimador *kriging* se da por una combinación lineal de los valores observados  $Z_i = Z(x_i)$  y de los pesos  $\omega_i(x_0)$ , donde  $i=1, \dots, n$

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i(x_0) Z(x_i) \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Seleccionando de modo que la varianza (varianza de kriging o error de kriging) sea minimizada (Ecuación 3.4)

$$\sigma_k^2 = \text{Var} \left[ Z(x_0) - \sum_{i=1}^n \omega_i(x_0) Z(x_i) \right] = \sum_{i=1}^n \omega_i^2(x_0) \text{Var} Z(x_i) + \sum_{j=1}^n \omega_j^2(x_0) \text{Var} Z(x_j) - 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i(x_0) \omega_j(x_0) c(x_i, x_j)$$

Cumpliendo con la condición de insesgadez

$$E \left[ Z(x_0) - \sum_{i=1}^n \omega_i(x_0) Z(x_i) \right] = \sum_{i=1}^n \omega_i(x_0) \mu(x_i) - \mu(x_0) = 0 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Es importante no confundir la varianza de *kriging* con la varianza del predictor de *kriging*  $Z(x_0)$ , la cual está dada por

$$\text{Var} Z(x_0) = \text{Var} \left[ \sum_{i=1}^n \omega_i(x_0) Z(x_i) \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i(x_0) \omega_j(x_0) c(x_i, x_j) \quad \text{Ecuación 3.6}$$

### 3.2. INTERPOLACION INVERSO DE LA DISTANCIA

Este método de interpolación consiste en una interpolación multivariable, en la cual un punto  $Z$  desconocido, se estima mediante la ponderación en  $N$  puntos conocidos ponderados según su distancia.

La fórmula general para encontrar un valor desconocido  $Z(x)$  es:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=0}^N W_i x_i}{\sum_{j=0}^N W_j(x)} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:  $W_i(x) = \frac{1}{d(z, z_i)^p}$  Ecuación 3.8

Y  $d(z, z_i)$  representa la distancia entre los puntos conocido y desconocido a determinar en cada iteración y  $p$  es el parámetro de peso, que es representado por un número real positivo, que es determinado por la minimización de la relación de un número buscado con una medición, lo que se determina a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\Phi(z, u) = \left( \sum_{i=0}^N \frac{(u - u_i)^2}{d(z, z_i)^p} \right)^p \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$\frac{d\Phi(z, u)}{du} = 0 \quad \text{Ecuación 3.10}$$

#### 4. CONSIDERACIONES GENERALES

Situados en contexto del desarrollo del modelo Chile-SR, es que a continuación se muestra el diagrama de flujo del modelo Brasil-SR, del cual se destacan encerrados en un círculo rojo los aspectos aportados por este trabajo para el inicio del modelo de estimación de radiación solar incidente a través de imágenes satelitales Chile-SR.

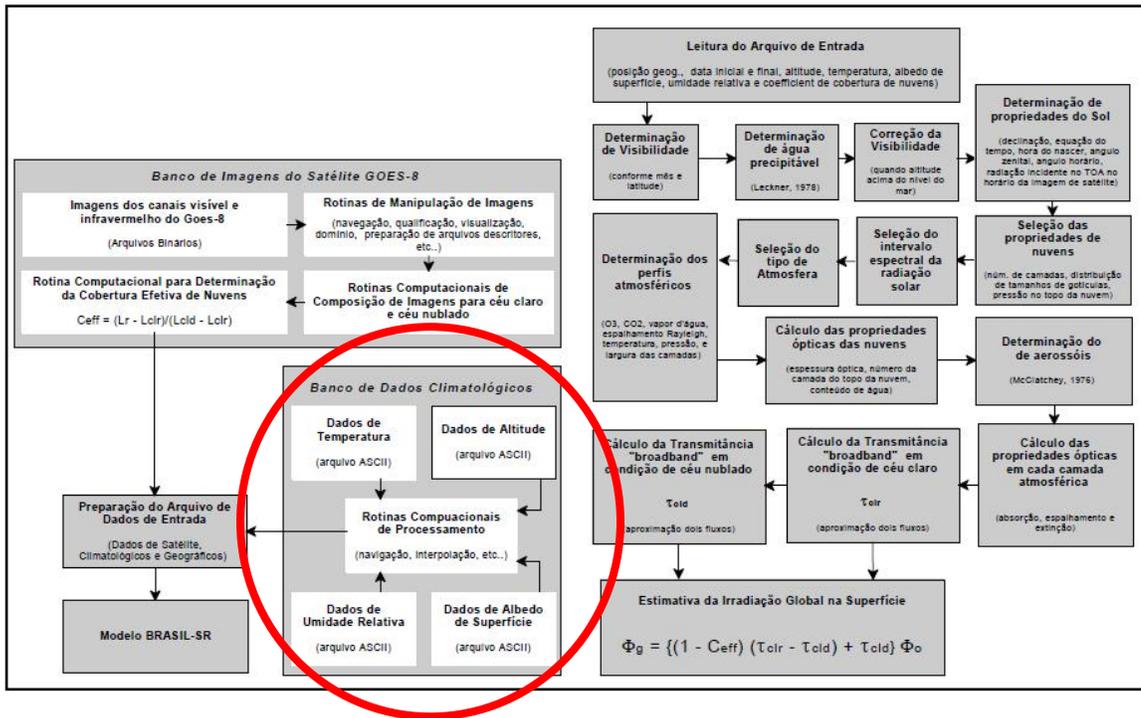


Figura 4.1: Diagrama de flujo del modelo Brasil-SR.

Fuente: Ramos, Bueno y Luna. (2005).

Si bien en este diagrama de flujo se incluyen los datos de altura, es importante destacar que para el desarrollo del modelo Chile-SR, ellos fueron obtenidos directamente de la agencia de Estados Unidos USGS, en una resolución mayor que la requerida para el modelo en estudio. Por lo anterior, sólo fue necesario realizar una pequeña traslación a los ejes de referencia en los que trabaja el modelo Chile-SR y no amerita mayor análisis. En lo económico, el principal valor que generará este trabajo es que permitirá a las empresas desarrollar proyectos minimizando las incertezas, ya que tal como se describe en el trabajo de Pitz-Paal et al.(2007), se necesitan datos de por lo menos siete años para

poder reducir la incertidumbre de las inversiones a niveles de más menos 5%, lo que permite a los bancos entregar préstamos con niveles de tasas de interés más accesibles para los inversionistas.

Para efectos de este estudio fue necesario calcular medias por mes históricas, es decir, calcular los promedios por columnas de datos. Una vez obtenidos estos promedios para cada una de las treinta localidades entregadas<sup>8</sup> hay que realizar un análisis de los datos, de manera que todos sean creíbles, posibles y representativos del área de estudio. Es decir, para este caso fue necesario eliminar los datos de islas y de las localidades más meridionales que el paralelo 45,92°S de latitud, ya que no se contaba con los datos de altura para esas localidades en el archivo “DEM”, que fue la base de referencia para el algoritmo utilizado para el ajuste por alturas utilizado en el modelo. Adicionalmente, localidades más al sur que el citado paralelo, no son vistas con exactitud mediante el uso de imágenes satelitales, lo que hace que los resultados de este estudio no sean necesarios tan al Sur, ya que no son posibles de utilizar con el modelo Chile-SR dada su baja precisión. Con ello, el área de interés quedó definida por los paralelos 17,61°S al 45,92°S y por las longitudes 78,95°W hasta la 60,9°W, para ser acotados al territorio chileno con posterioridad.

---

<sup>8</sup> Lista detallada adjunta en los anexos

## 5. TEMPERATURA

### 5.1. DATOS EXISTENTES

Según publicaciones de la NASA en su página <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/> históricamente la anomalía de temperatura global de la tierra en grados celcius ha presentado el siguiente comportamiento:

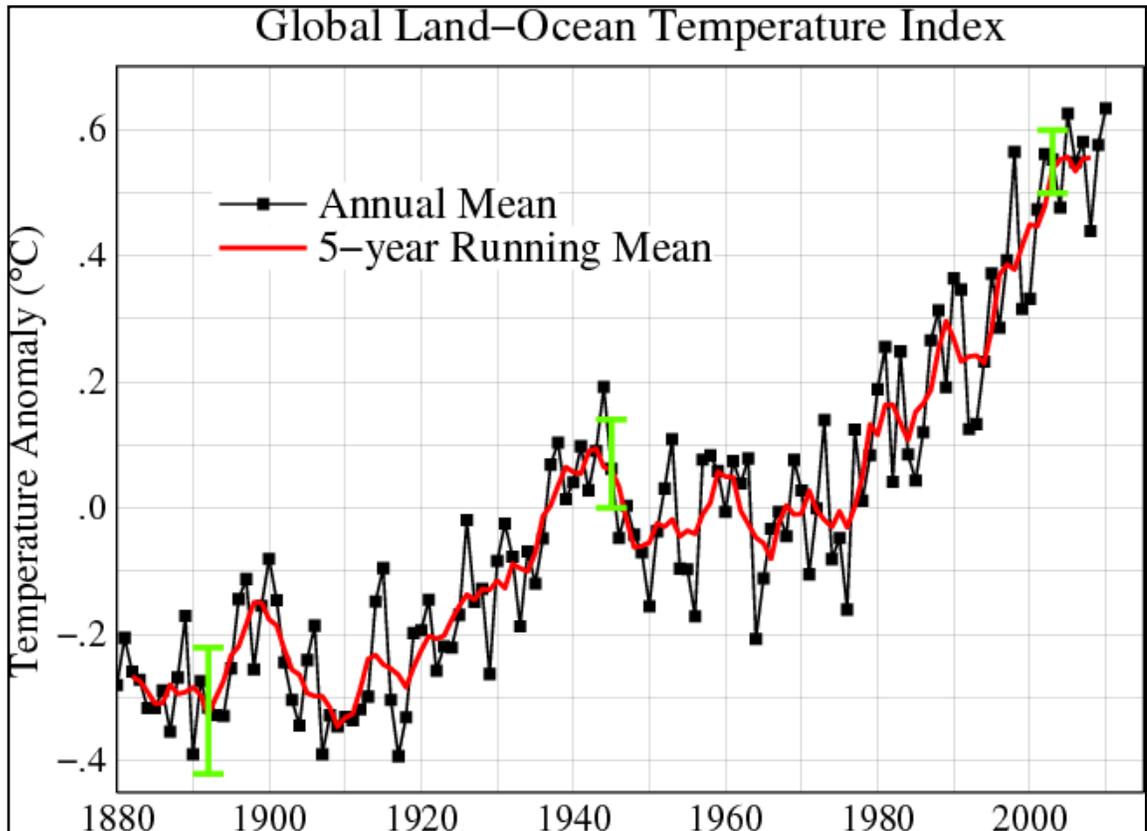


Figura 5.1: Índice de temperatura global  
Fuente: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>

Si bien a partir de aproximadamente 1980 se ve un claro aumento en la temperatura, también es posible decir que en estos últimos 10 años ha estado más estable. Además, se puede ver que las variaciones interanuales de temperatura son como máximo del orden de 0.2 °C de un año a otro, por lo que se trabajó con medias de temperatura. Se puede tener la tranquilidad que no se comete un gran error para este tipo de aplicaciones,

considerando un aumento medio de aproximadamente 0,0077 °C por año si no se tomase ningún tipo de medidas, pero como todos sabemos, la humanidad está tomando precauciones para que este aumento no siga su curso.

En el caso del comportamiento de la temperatura en Chile podemos verificar que no está tan ligado a este comportamiento de calentamiento global y es más ha presentado disminución de su temperatura en algunos sectores como el costero acorde a lo que se documenta en Falvey y Garreaud (2009), por lo que no es posible agregar un factor de tendencia al calentamiento en el tiempo para todo Chile.

Los datos de temperatura proporcionados para este estudio, provienen de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y fueron entregados en el siguiente formato:

DIRECCION METEOROLOGICA DE CHILE SUBDIRECCION CLIMAT. Y MET. APLICADA AREA EXPLOTACION													
TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C) PERIODO 1987 - 2003													
Estación : VISVIRI - TENENCIA													
Latitud : 17° 37' S    Longitud : 69° 30' O    Elevación : 4070 m													
FECHA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
1987	.	.	.	.	3,6	1,0	-0,1	3,4	2,9	1,6	7,8	6,9	.
1988	8,4	8,4	8,1	6,6	5,5	1,5	0,5	3,3	4,1	3,8	6,1	5,5	5,2
1989	6,0	6,8	6,2	3,6	2,6	0,2	0,0	2,1	3,4	5,3	5,3	6,9	4,0
1990	6,8	5,8	6,4	4,8	3,3	0,0	-0,7	1,6	.	.	8,1	.	.
1991	5,4	6,4	6,0	4,0	1,9	-1,2	0,2	1,7	1,8	3,9	4,3	5,4	3,3
1992	6,9	5,1	4,6	1,8	.	-0,7	0,4	-0,5	0,3	0,2	4,6	5,4	.
1993	6,5	.	.	.	.	0,2	1,1	0,6	1,7	.	.	8,1	.
1994	.	.	.	5,2	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1995	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	8,0	.	.
1996	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1997	7,0	.	5,2	4,4	3,9	1,4	0,0	.	-0,1	4,4	5,6	6,7	.
1998	8,8	9,0	7,9	4,4	0,1	0,3	-0,1	1,9	2,9	6,7	7,8	7,5	4,8
1999	6,1	5,2	.	.	1,5	4,2	.	6,4	2,5	3,4	5,7	6,9	.
2000	8,0	7,5	6,3	6,6	2,9	-1,0	-0,3	2,1	3,2	5,9	.	7,8	.
2001	6,7	7,4	7,0	6,6	2,1	1,4	-0,3	1,4	2,6	.	6,3	5,7	.
2002	5,9	6,3	5,9	4,4	3,7	-0,5	0,0	0,5	2,9	4,0	5,1	6,4	3,7
2003	7,7	7,2	6,3	5,1	1,8	-1,4	.	.	3,3	5,3	5,6	7,4	.
Contar	13,0	11,0	11,0	12,0	12,0	14,0	12,0	12,0	13,0	11,0	13,0	13,0	.
Promedio	6,9	6,8	6,4	4,8	2,7	0,4	0,1	2,0	2,4	4,0	6,2	6,7	.

Figura 5.2: Formato de los datos de temperatura entregados por la DMC  
Fuente: DMC

Para analizar el efecto interanual de la temperatura se graficará la estación con mayor cantidad de datos, a modo de complemento del estudio presentado con anterioridad proveniente de la NASA, en el que se realiza un análisis global. De este modo el comportamiento de la temperatura media anual en el tiempo en la estación de Quinta Normal ubicada en la ciudad de Santiago presenta el siguiente comportamiento.

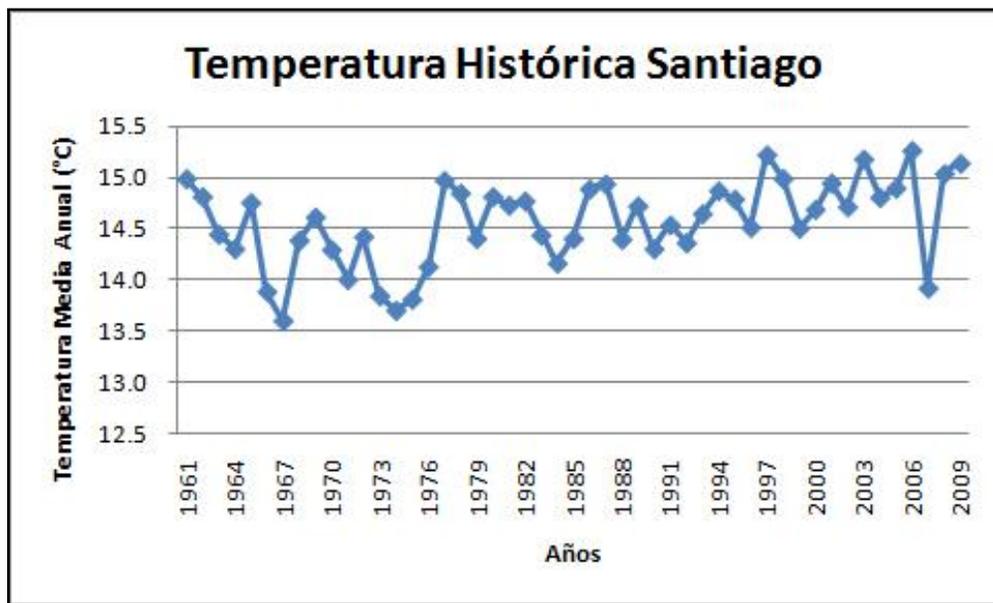


Figura 5.3: Comportamiento histórico de la temperatura media anual de Santiago  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

De este gráfico se puede observar un aumento aproximado anual de  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que trabajando con promedios de 7 años podría representar un error de más menos  $0.25\%$ , un error que no incide en los resultados de este trabajo, si se piensa que la temperatura adicionalmente se ponderará como factor para obtener la radiación solar.

Para poder tener una visión general de los resultados que se obtengan, se decidió realizar los siguientes gráficos, para verificar si existe algún tipo de comportamiento tendencial que ayude a obtener mejores resultados o para corroborar resultados de estudios anteriores:

En primer lugar, se verificó el comportamiento Norte – Sur (efecto Latitud), para evaluar alguna tendencia marcada que pudiese ayudar a verificar resultados al finalizar los modelos. Los resultados de este ordenamiento quedan reflejados en el siguiente gráfico:

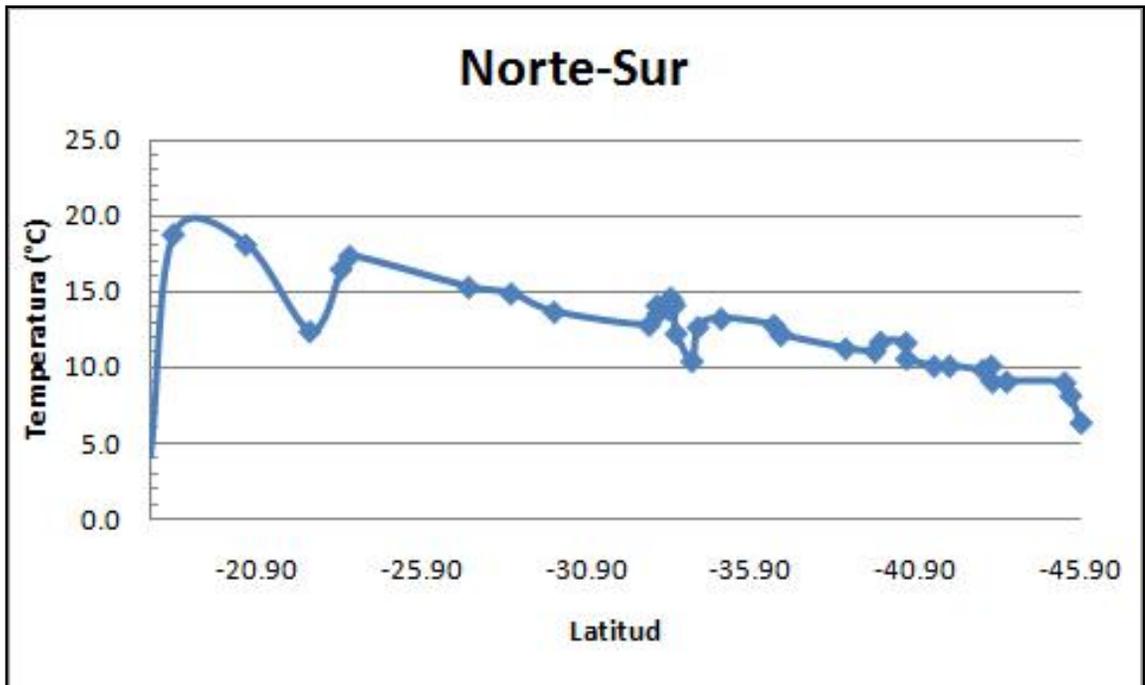


Figura 5.4: Comportamiento Norte – Sur de la temperatura media de Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

A partir de este gráfico, podemos apreciar que existe una tendencia a la baja en la temperatura media, a medida que nos movemos hacia el Sur de Chile, hecho que será verificado en el resultado final. El comportamiento de la primera estación se explica por la gran altitud de 4.070 msnm. mientras que todas las estaciones poseen una altitud promedio de 400 msnm.

En segundo lugar, se representó Chile Oeste – Este (efecto Longitud), arrojando el siguiente gráfico:

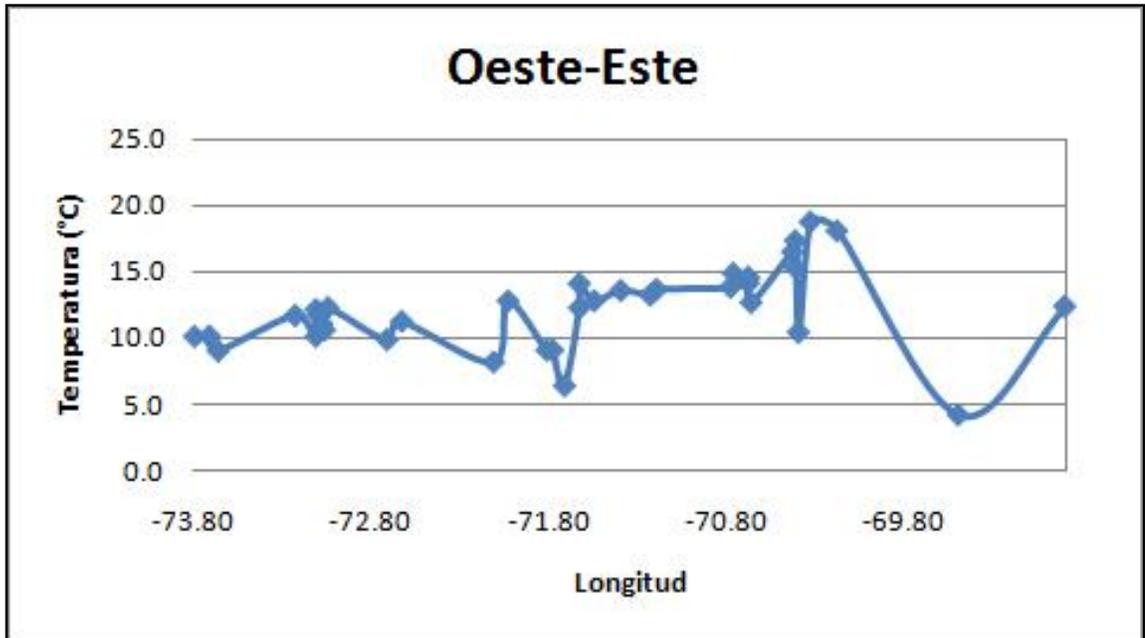


Figura 5.5: Comportamiento Oeste – Este de la distribución de la temperatura de Chile  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Aquí podemos apreciar que si bien es más leve que la tendencia Norte –Sur, sí existe una disminución en la temperatura media a medida que nos acercamos al mar (Oeste). También es de esperar que esta tendencia se encuentre reflejada en los resultados finales. Por último, las temperaturas fueron ordenadas por altura, dado que en la literatura existen documentos científicos que hablan de una disminución de la temperatura a medida que se aumenta la altura.

Haciendo el ordenamiento por altura de todas las estaciones se obtiene el siguiente gráfico:

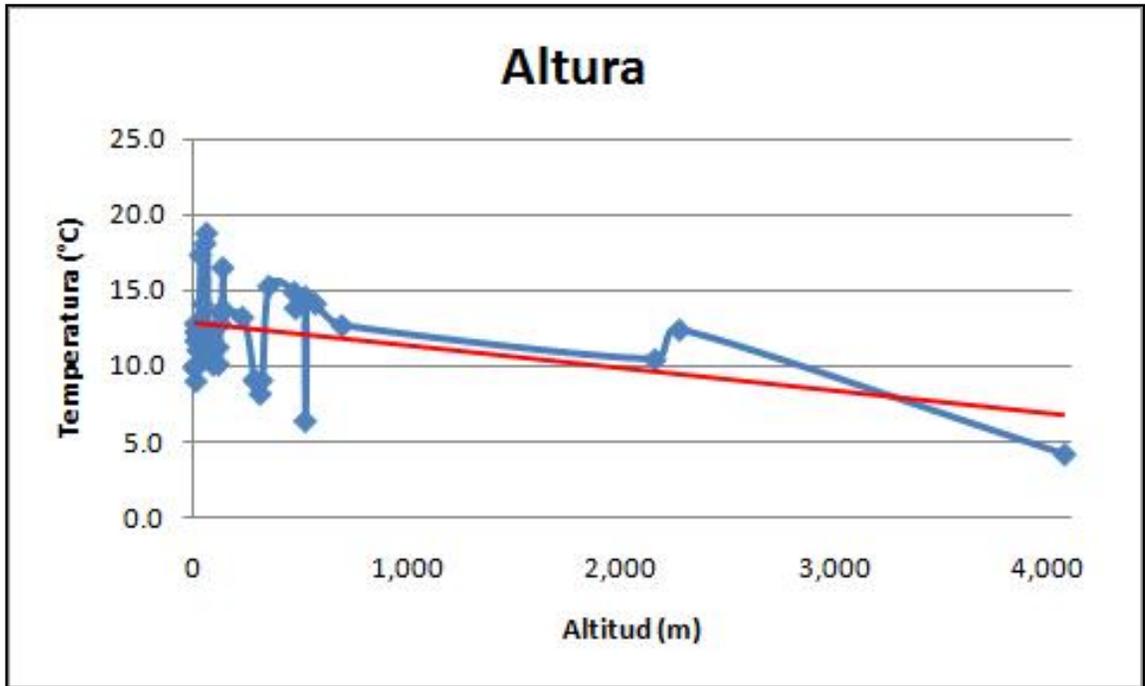


Figura 5.6: Comportamiento de la temperatura media según altura en Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

De este gráfico si bien no se aprecia una clara tendencia a la baja, de un análisis más detallado de los datos podemos concluir que se debe a que se están viendo involucrados los dos efectos analizados anteriormente (Latitud y Longitud), lo que haría que el efecto de la altura no sea fácilmente apreciable al analizar estaciones tan dispersas y en tan baja cantidad en relación al área de estudio. Para poder comprobar esta suposición, se procedió a separar los datos en tres zonas, las que se denominaron Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur, para luego proceder a realizar nuevamente el ordenamiento por alturas, lo que entregó los siguientes resultados.

Para la Zona Norte se obtuvo el siguiente gráfico:

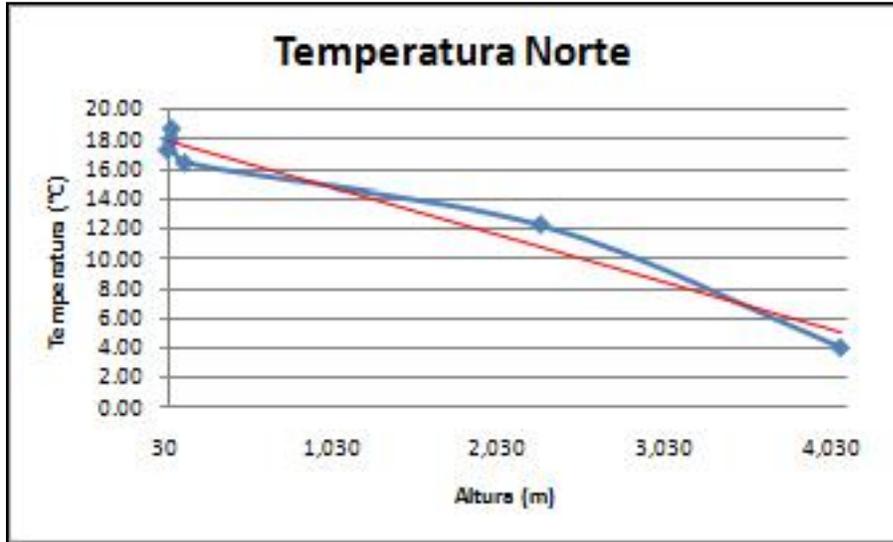


Figura 5.7: Comportamiento de la temperatura media en la zona norte de Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Los datos para la Zona Centro quedan graficados del siguiente modo:

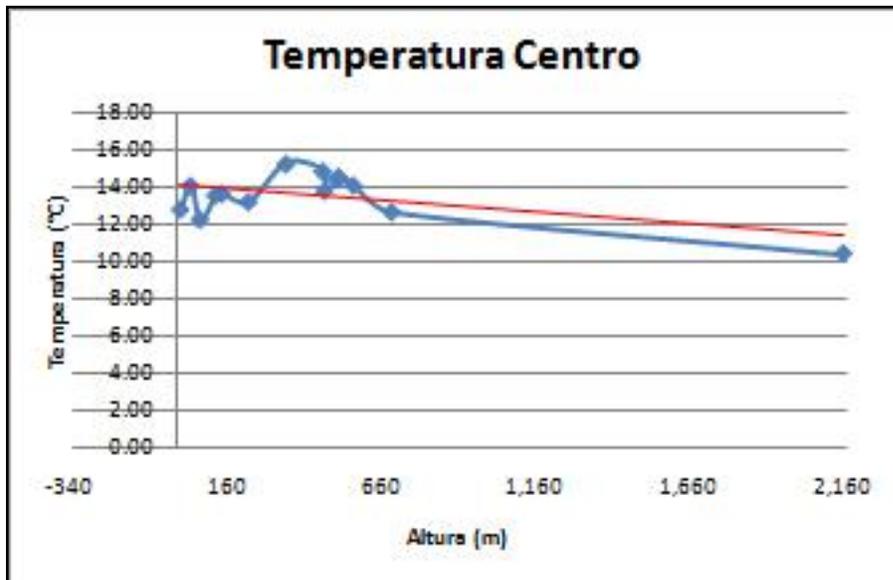


Figura 5.8: Comportamiento de la temperatura en la zona centro de Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Finalmente los datos referidos a la Zona Sur describen el siguiente gráfico:

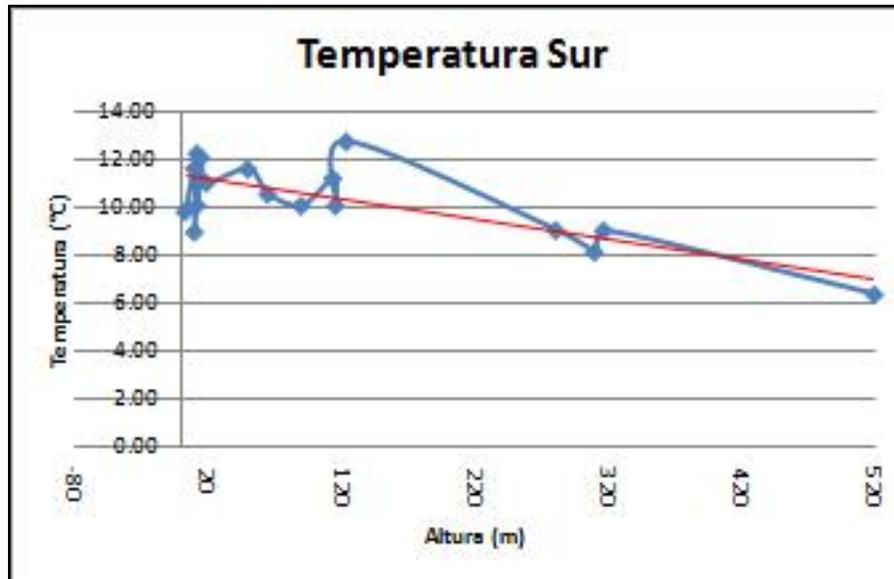


Figura 5.9: Comportamiento de la temperatura en la zona sur de Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Del análisis de estos tres gráficos zonales ya podemos ir vislumbrando las tendencias a la baja, pero la escasez de datos no permite seguir haciendo subdivisiones de modo que se tengan datos suficientes para clasificaciones más pequeñas como Zonas; Norte Costa, Norte Interior, Centro Costa, Centro Interior, Sur Costa y Sur Interior, las cuales permitan sumar la exclusión del efecto Longitud a la eliminación del efecto Latitud descrito con anterioridad.

Tomando en cuenta todos estos aspectos, se procedió a trabajar los datos de temperatura siguiendo los siguientes procedimientos.

## 5.2. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS

Una vez clasificados los datos, se utilizaron tres métodos para estimar la temperatura: el primero basado en el uso directo de una interpolación *Kriging*, que llamaremos “Brasil” por ser basado en el utilizado en el atlas brasilero que impulsó el desarrollo del modelo Chile-SR, un segundo basado en el estudio de Dodson y Marks (1997) que en adelante llamaremos método “Altura” y finalmente un método “Combinado” que mezcla el método desarrollado por Dodson y Marks (1997), pero que utiliza el método *Kriging* para interpolar por las ventajas que éste tipo de interpolación presenta por sobre la utilización de interpolaciones como ponderado inverso a la distancia o vecino más cercano. A continuación, se presentarán los resultados, indicando las ubicaciones geográficas de las estaciones de medición por puntos en cada uno de los mapas y descripciones más detalladas para los tres métodos para los meses de enero y julio por ser representativos de altas y bajas temperaturas en la región de Chile. Posteriormente se presentará el resto de los meses sólo para el método escogido, que en este caso será el método “Combinado”.

### 5.2.1. BRASIL-SR

Para el método “Brasil”, básicamente se toman los datos clasificados y se realiza una interpolación espacial utilizando el método de *Kriging*, para lo que es necesario desarrollar variogramas, que ayudarán a ponderar las interpolaciones que desarrolla el método, tomando en consideración los cambios que se presentan en las distintas direcciones cuando nos movemos desde un punto conocido. Sin embargo, la escasez de datos y la falta de homogeneidad en la distribución de los mismos, no permitió tener excelentes aproximaciones para todas las direcciones, lo que llevó a buscar una aproximación que privilegiara el comportamiento en la dirección Norte – Sur por la geografía de Chile. Lo anterior queda representado en las siguientes figuras.

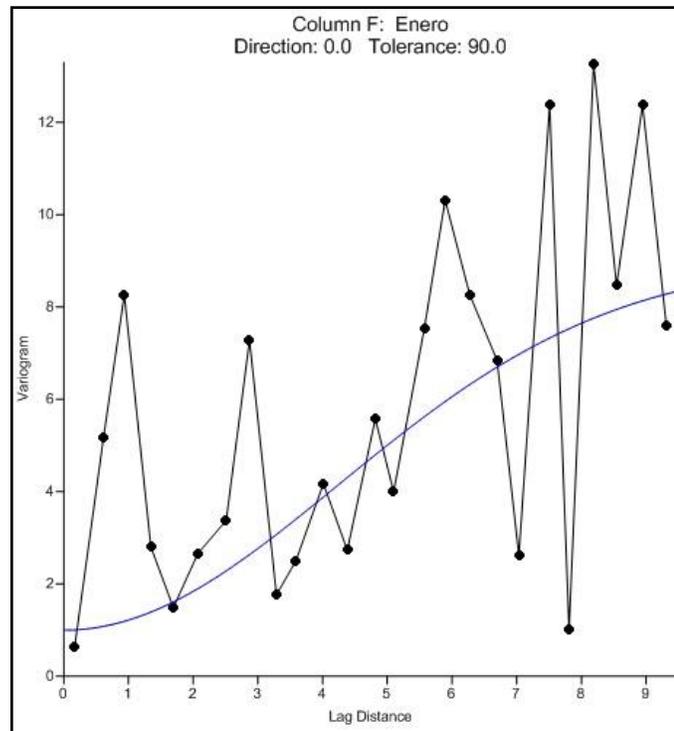


Figura 5.10: Variograma de temperaturas medias del mes de enero para todas las direcciones a partir de los datos de la DMC

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

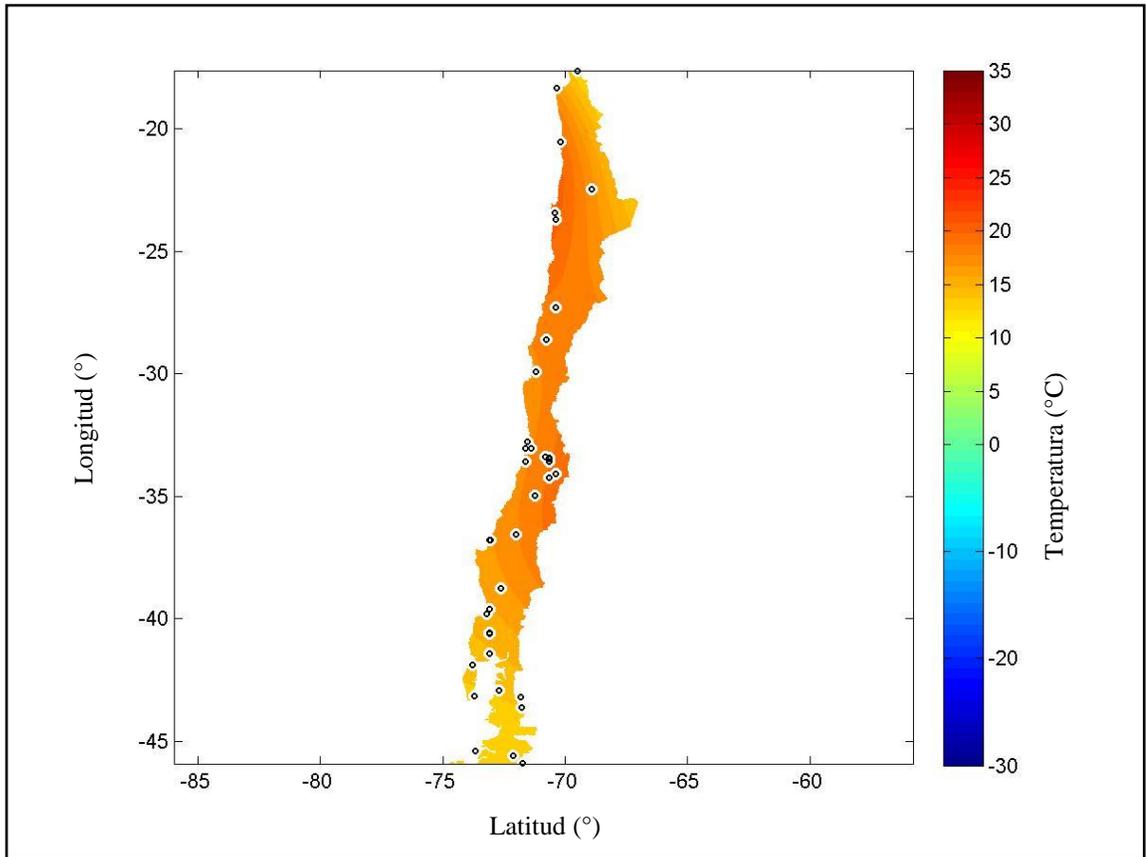


Figura 5.11: Mapa de temperaturas medias para enero utilizando el método "Brasil"  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

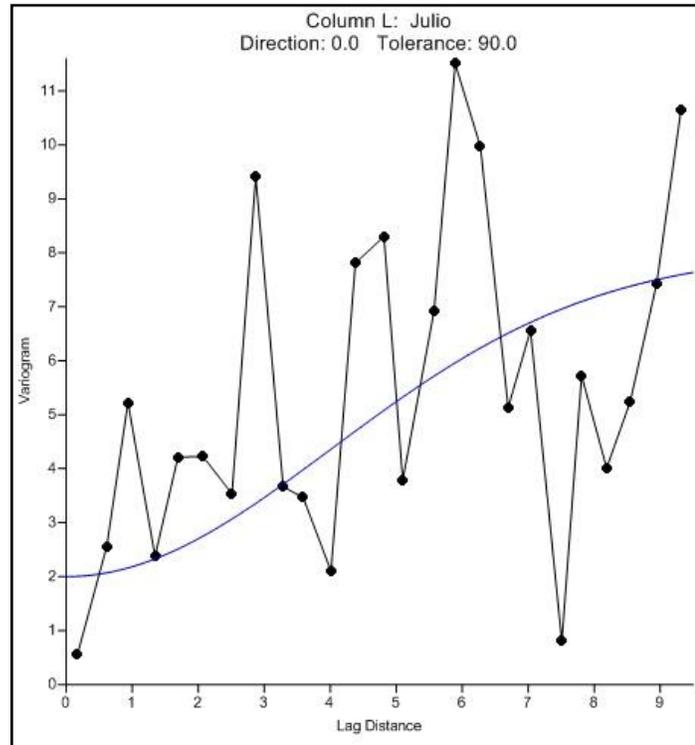


Figura 5.12: Variograma de temperaturas medias para julio para todas las direcciones a partir de los datos de la DMC  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

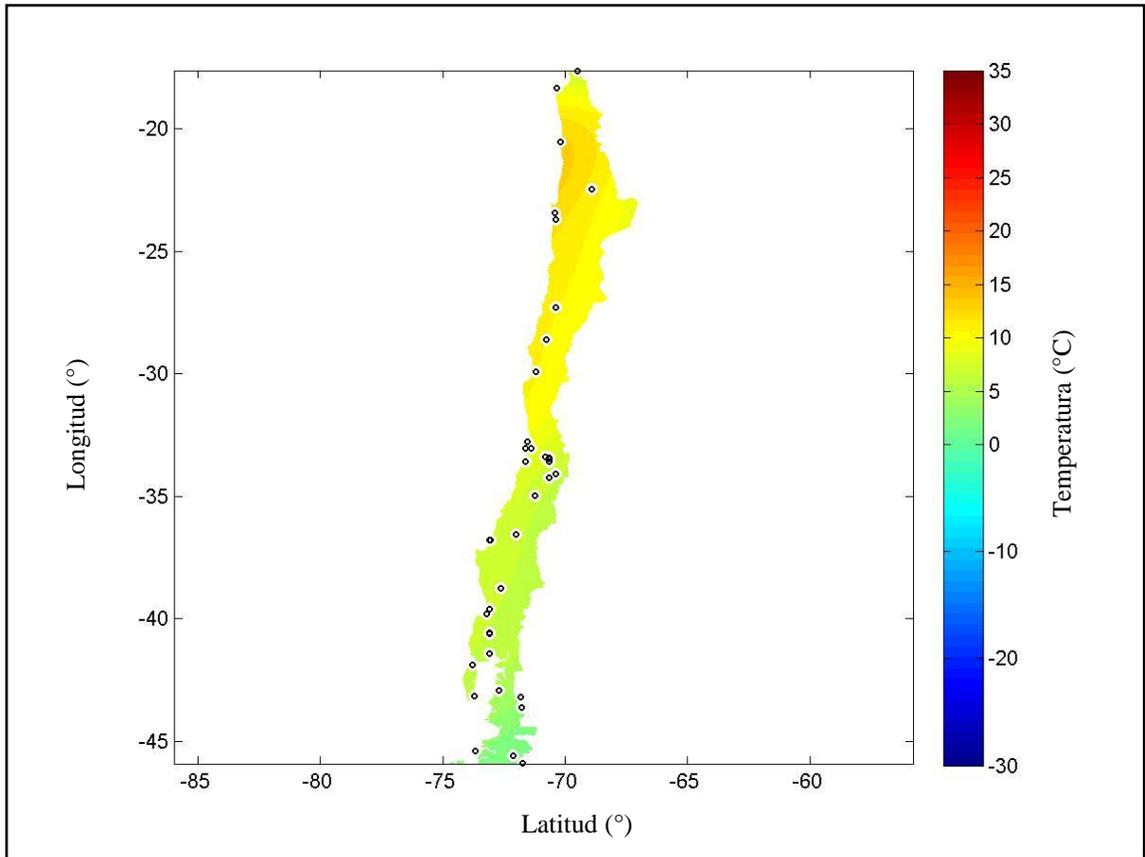


Figura 5.13: Mapa de temperaturas medias para julio utilizando el método "Brasil"  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Observando estos mapas, nos damos cuenta que no siguen ningún comportamiento esperado en cuanto a la distribución de temperaturas que se dan en la realidad en Chile, ni los comportamientos que se esperarían de los análisis desarrollados a comienzos de esta sección a partir de los datos de la DMC.

Es por ello que se decidió indagar más en la literatura en busca de algún método que representase de mejor manera el verdadero comportamiento de la temperatura en Chile. A continuación, procedemos a describir y desarrollar el siguiente método.

### 5.2.2. CORRECCION POR ALTURA 6,5°

Para el método “Altura”, se realizó un ajuste de  $-6,5^\circ$  por km. tal como se recomienda en el estudio de Dodson y Marks (1997) como un valor típico de tasa térmica a nivel mundial y que en este estudio resulta de mucha utilidad por la diversidad de climas presentes en Chile.

En este método, primero fue necesario llevar las mediciones al nivel del mar antes de interpolar o extrapolar. A continuación se procedió a realizar las interpolaciones mediante el método de ponderado inverso a la distancia para finalmente, mediante un procedimiento inverso, se retornaron los valores a su altura espacial mediante el ajuste de  $-6,5^\circ$  por km.

Es importante señalar que el método de inverso de la distancia toma en consideración la variación espacial referida a latitud y longitud, por lo que la corrección propuesta y demostrada por Dodson y Marks (1997), viene a ser un complemento para la interpolación en 2D elegida, para transformarla en una en 3D al agregar la dimensión altura. En este procedimiento no existen los variogramas por cuanto ellos son propios del método de interpolación *Kriging*.

Si bien para todos los métodos se utilizan los mismos datos para efectuar el cálculo y desarrollo de mapas, podemos ver que los resultados obtenidos, tanto en su nivel de detalle como sus variaciones varía enormemente para las mismas zonas. Además, ya con este método, empezamos a notar resultados similares a varias propiedades de Chile que serán analizadas con mayor profundidad en la sección de resultados.

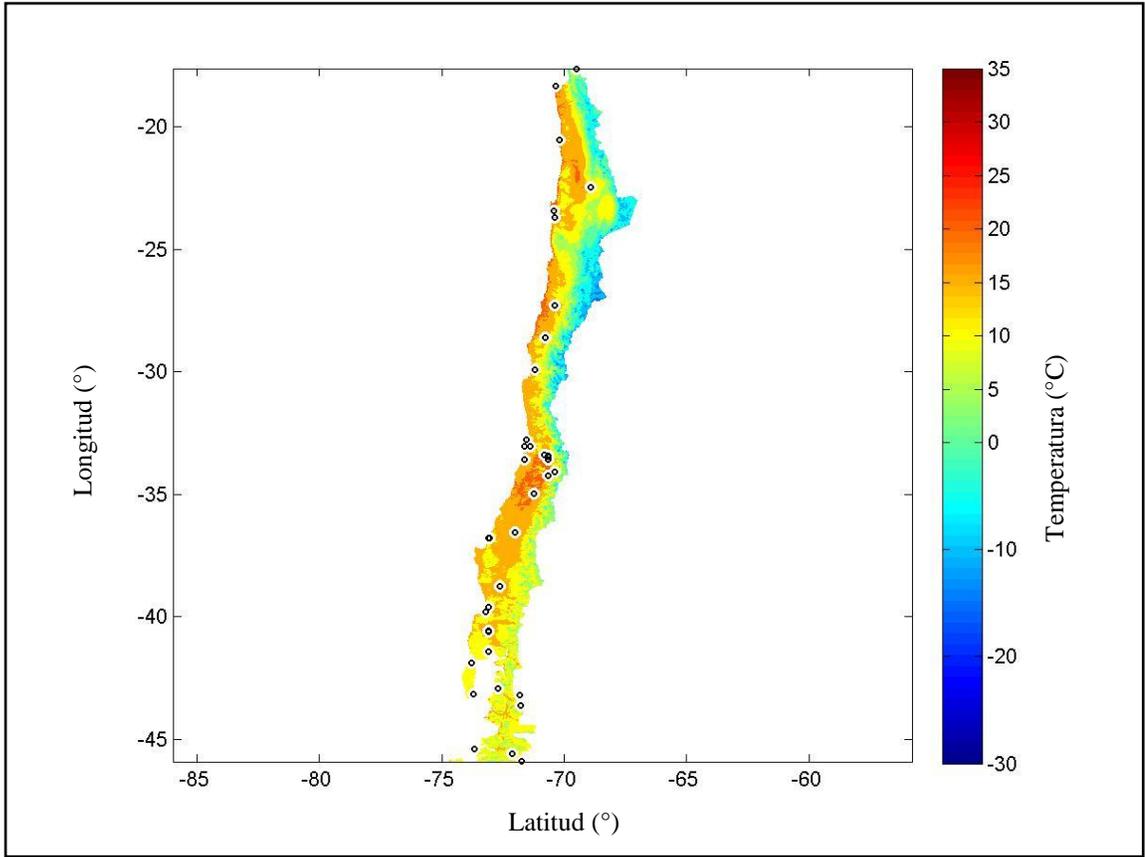


Figura 5.14: Mapa de temperaturas medias para el mes de enero utilizando el método "Altura"

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

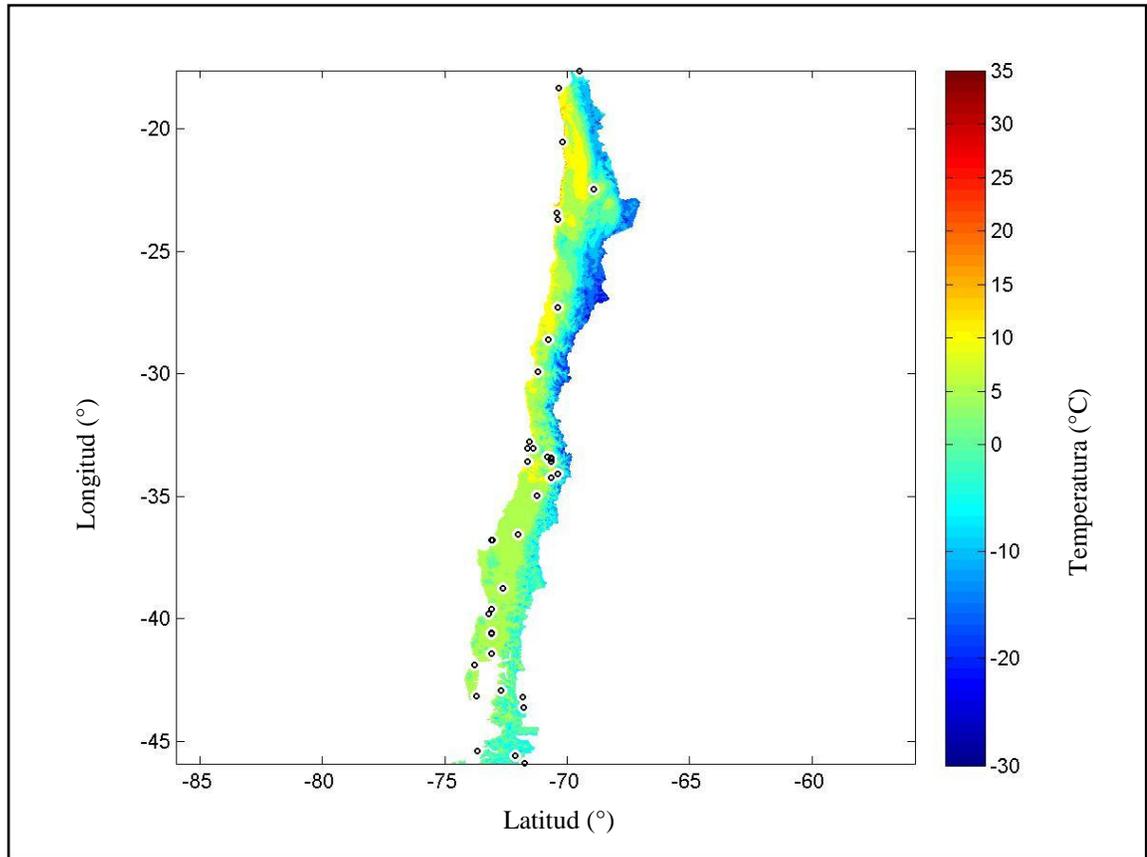


Figura 5.15: Mapa de temperaturas medias para el mes de julio utilizando el método "Altura"

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Al observar estos mapas, ya podemos distinguir los efectos esperados que fueron descritos al comienzo de la sección, así como también ciertas similitudes que hacen pensar que este resultado ya es mucho más cercano a la realidad que el obtenido al emplear el método "Brasil". Sin embargo, en la literatura constantemente se refieren a que en este tipo de trabajos debe realizarse utilizando una interpolación *kriging*, por lo que se decidió implementar una variable, ya que al estudiar el método de Dodson y Marks (1997), se comenta que no utilizan el método de interpolación *kriging* por limitaciones computacionales de procesos, hecho que hoy en día no es una limitante. Por todo lo anterior, se procede a describir y desarrollar el siguiente método.

### 5.2.3. COMBINADO

Para el método “Combinado”, con los datos útiles ajustados, se calculan los variogramas siguiendo el mismo comportamiento utilizado en el método “Brasil”. Con los variogramas se realiza la interpolación *Kriging* que entrega un valor para cada celda de  $0,03^\circ \times 0,03^\circ$  (aproximadamente 3,3 km. x 3,3 km.). Con esos valores para toda el área de interés, se realizó el ajuste final por alturas, nuevamente haciendo uso de la corrección de  $-6,5^\circ \times \text{km.}$  para obtener así los mapas finales.

A continuación se presentan los variogramas de los datos a nivel del mar en todas las direcciones, para poder realizar la interpolación *Kriging* de los datos y los mapas obtenidos para los meses de enero y julio.

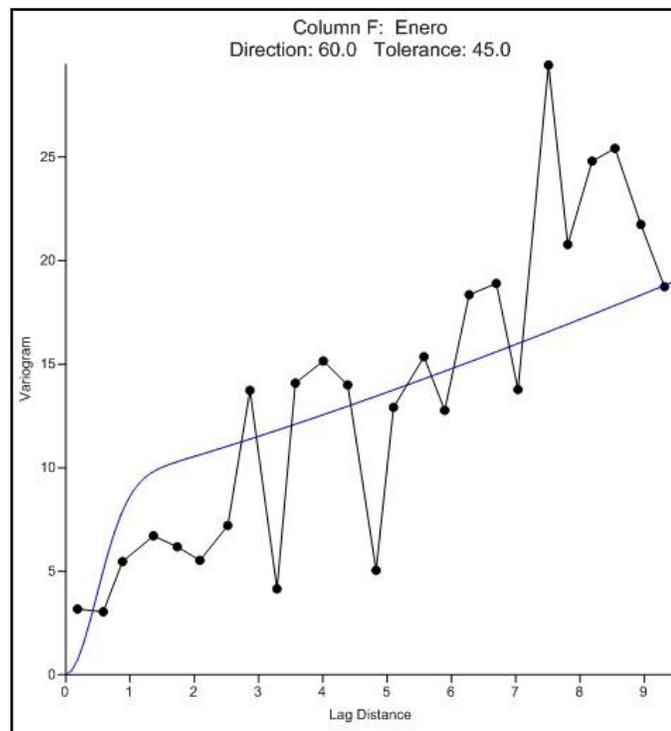


Figura 5.16: Variograma de temperaturas medias para el mes de enero en todas las direcciones

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

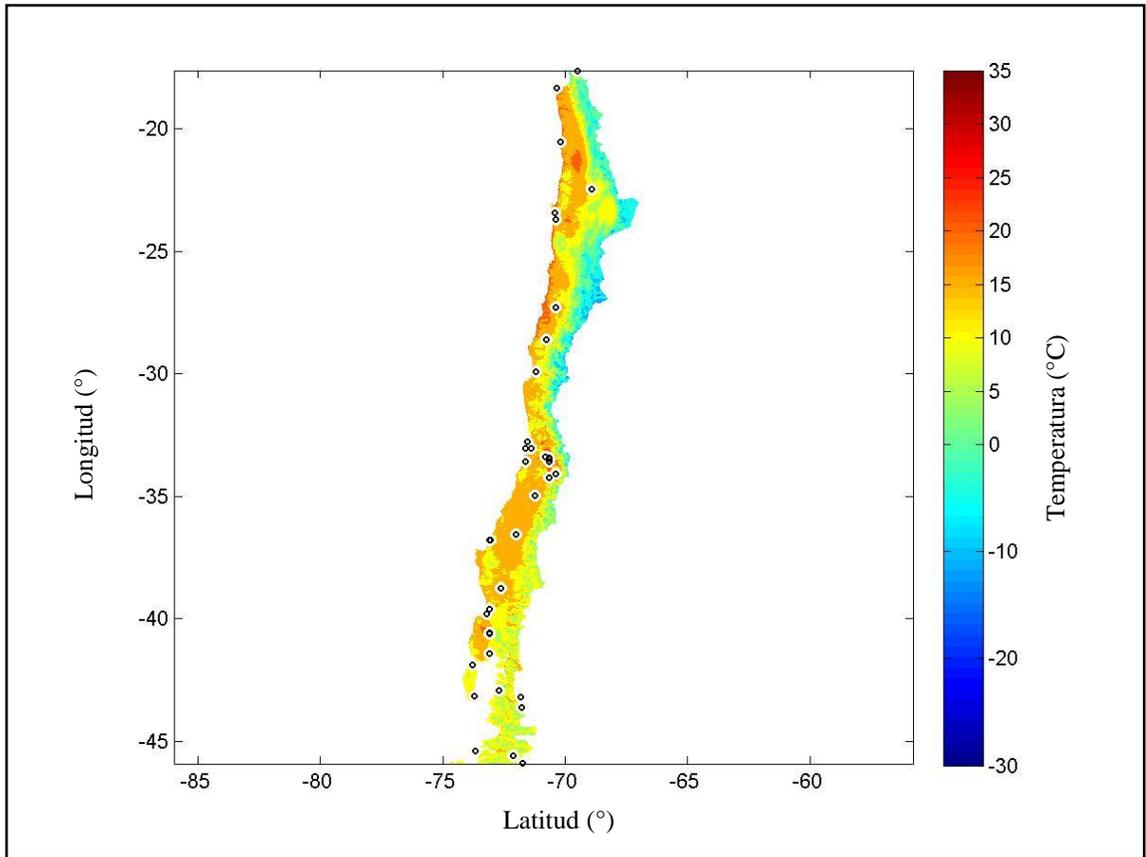


Figura 5.17: Mapa de temperaturas medias de enero para el método “Combinado” para Chile

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

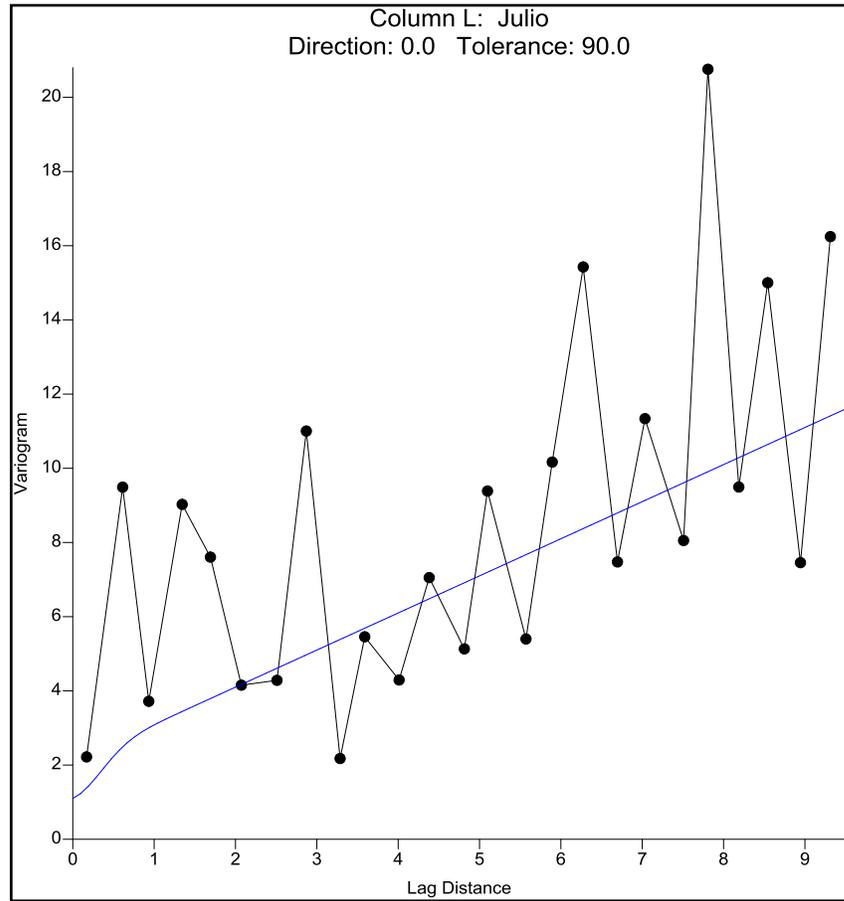


Figura 5.18: Variograma de temperaturas medias para el mes de julio en todas las direcciones

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

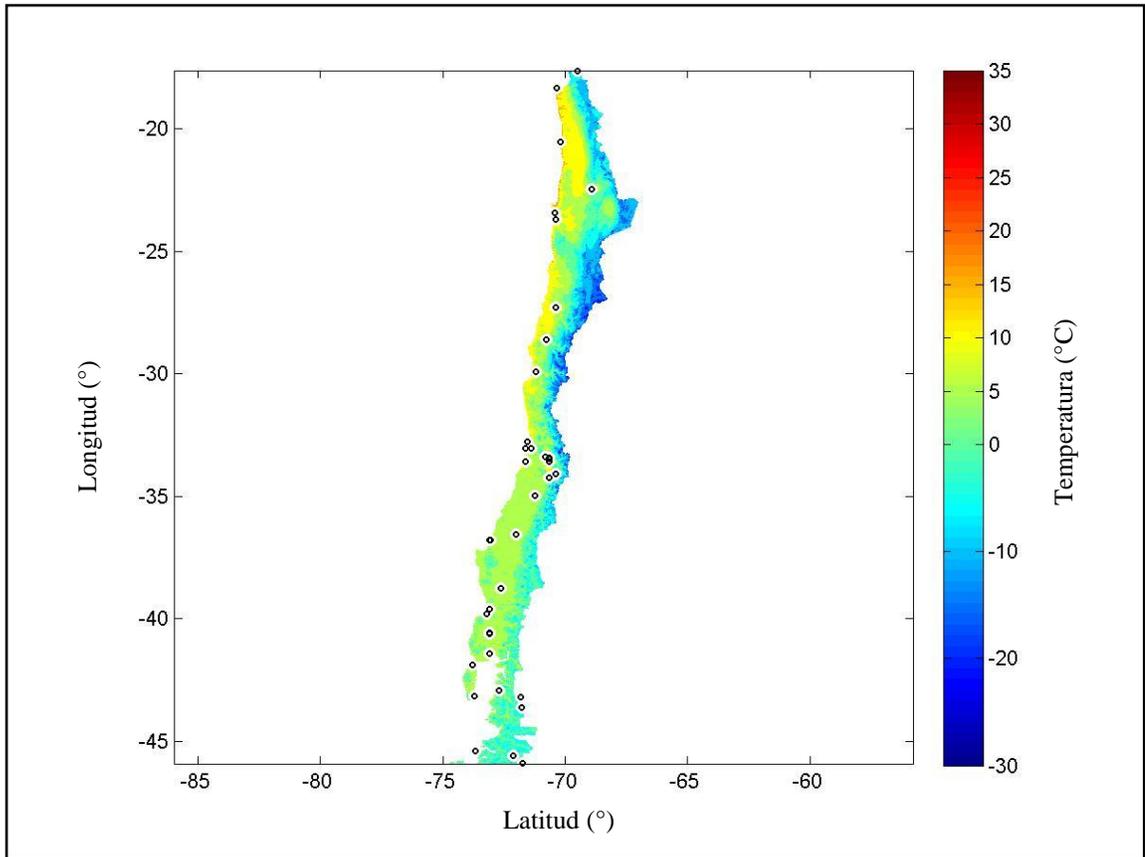


Figura 5.19: Mapa de temperaturas medias de julio para el método “Combinado” para Chile

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Si bien los resultados obtenidos con este método son muy similares al método “Altura”, se estima que la representación debe ser mejor, ya que utiliza el método de interpolación *kriging*, que es el recomendado y que no se utilizaba en 1997 sólo para ahorrar recursos computacionales, que no eran suficientes en ese entonces.

Un mayor análisis de todos los métodos y sus comparaciones se realizará en la sección de resultados.

## 6. HUMEDAD RELATIVA

Este concepto se refiere a la cantidad porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura. También es conocida por la siguiente expresión:

$$RH = \frac{p(H_2O)}{p_s(H_2O)} 100 \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde  $p(H_2O)$  es la presión parcial de agua en la mezcla de aire y  $p_s(H_2O)$  se refiere a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura presente en la mezcla de aire.

### 6.1. DATOS EXISTENTES

Los datos de humedad relativa proporcionados por la DMC, fueron entregados en el siguiente formato:

DIRECCION METEOROLOGICA DE CHILE SUBDIRECCION CLIMATOLOGIA Y MET. APLICADA DEPARTAMENTO CLIMATOLOGIA													
HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL (%)													
08:00 HORAS / PERIODO 1961 - 2000													
Estación : ARICA - CHACALLUTA													
Latitud : 18° 20' S    Longitud : 70° 20' O    Elevación : 58 m													
FECHA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANO
1961	71	72	76	76	79	79	83	82	83	81	77	74	78
1962	74	73	79	77	77	79	82	83	83	77	72	69	77
1963	70	71	72	74	74	76	77	80	80	76	.	.	75
1964	69	71	72	76	78	79	79	79	76	74	72	69	75
1965	68	72	72	75	74	73	78	77	82	74	72	71	74
1966	73	72	74	75	74	75	76	81	77	74	71	70	74
1967	70	72	75	74	81	80	79	81	81	77	73	72	76
1968	73	74	78	85	84	84	80	84	83	80	80	70	80
1969	69	71	75	76	77	79	81	80	81	79	78	76	77
1970	79	80	82	88	83	85	86	83	86	85	82	82	83
1971	83	81	80	81	89	89	85	86	80	81	78	80	83
1972	77	84	85	89	85	83	89	85	88	90	89	89	86
1973	89	89	91	92	91	92	93	92	91	88	91	91	91
1974	89	89	88	81	82	81	84	85	82	80	80	81	84
1975	80	81	81	80	83	85	82	84	85	85	83	83	83
1976	84	83	87	84	86	86	89	90	88	86	79	79	85
1977	75	84	83	84	87	84	85	87	86	83	82	83	84
1978	84	81	83	83	84	83	82	85	82	75	78	78	82
1979	80	81	81	81	81	82	84	82	77	78	73	72	79

Figura 6.1: Formato de los datos de humedad relativa entregados por la DMC

Fuente: DMC

Al igual que como se trabajó la temperatura, primero mostraremos el comportamiento histórico para la estación, ya que no se encontró información para medias históricas globales. El comportamiento en el tiempo para la estación de Quinta Normal es el siguiente:



Figura 6.2: Comportamiento histórico de la humedad relativa media de Santiago  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

De este gráfico podemos ver que dentro de ciclos, la humedad relativa se ha mantenido dentro de un rango bastante acotado a lo largo del tiempo, lo que hace ver que al calcular medias cumpliendo con la consideración general el error por este efecto se hace mínimo. Al igual que el procedimiento seguido con la temperatura, a continuación se presentarán algunos análisis simples de los datos entregados por la DMC, a modo de tener una referencia del posible comportamiento tendencial de los resultados que se obtendrán. Primero, debido a la distribución geográfica de Chile, el que se considera más importante es el comportamiento Norte-Sur, el que muestra el siguiente comportamiento:

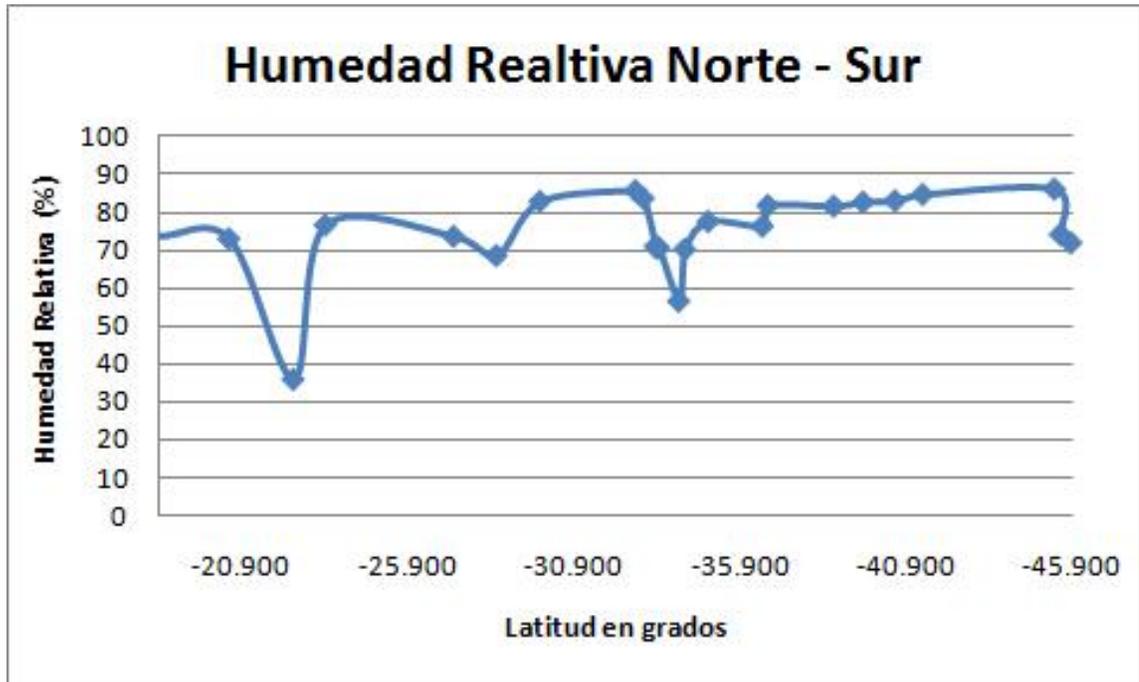


Figura 6.3: Comportamiento Norte – Sur de la humedad relativa media en Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

De este gráfico podemos observar que a medida que nos movemos hacia el sur existe un leve aumento en el nivel humedad, hecho que se ve claramente en la realidad, por cuanto en localidades del sur de Chile incluso se presentan precipitaciones durante todo el transcurso del año, sin embargo en Chile también existen regiones semiáridas con elevadas humedades relativas, por lo que esta apreciación no es concluyente.

A continuación presentaremos el gráfico que ilustra el comportamiento de la humedad relativa en la dirección Oeste – Este, y queda de la siguiente manera:

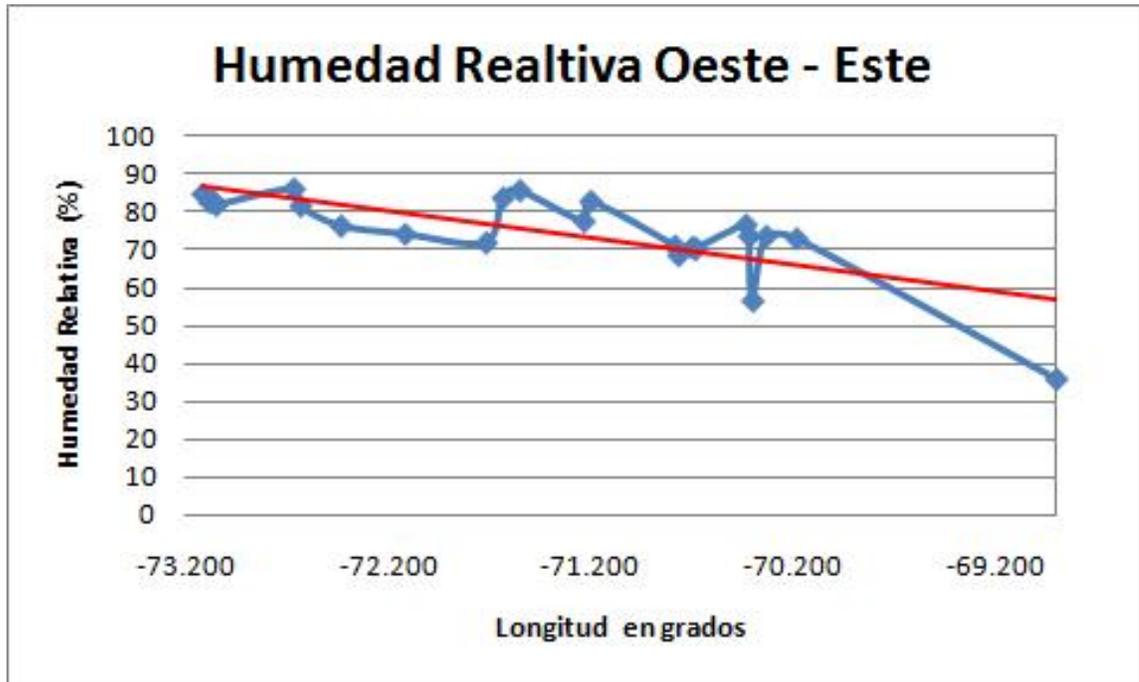


Figura 6.4: Comportamiento Oeste – Este de la humedad relativa media en Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Este gráfico, ilustra muy bien a Chile, por cuanto al oeste del país nos encontramos con el océano Pacífico, mientras que al movernos hacia el este nos vamos adentrando en el continente y esperaríamos que la humedad relativa vaya en descenso, que es exactamente la situación descrita en este gráfico.

Finalmente, presentaremos el comportamiento de la humedad relativa en comparación con la altura, ya que es de esperarse que a medida que se va tomando altura, la humedad relativa fuera descendiendo. Este hecho queda representado por el siguiente gráfico:

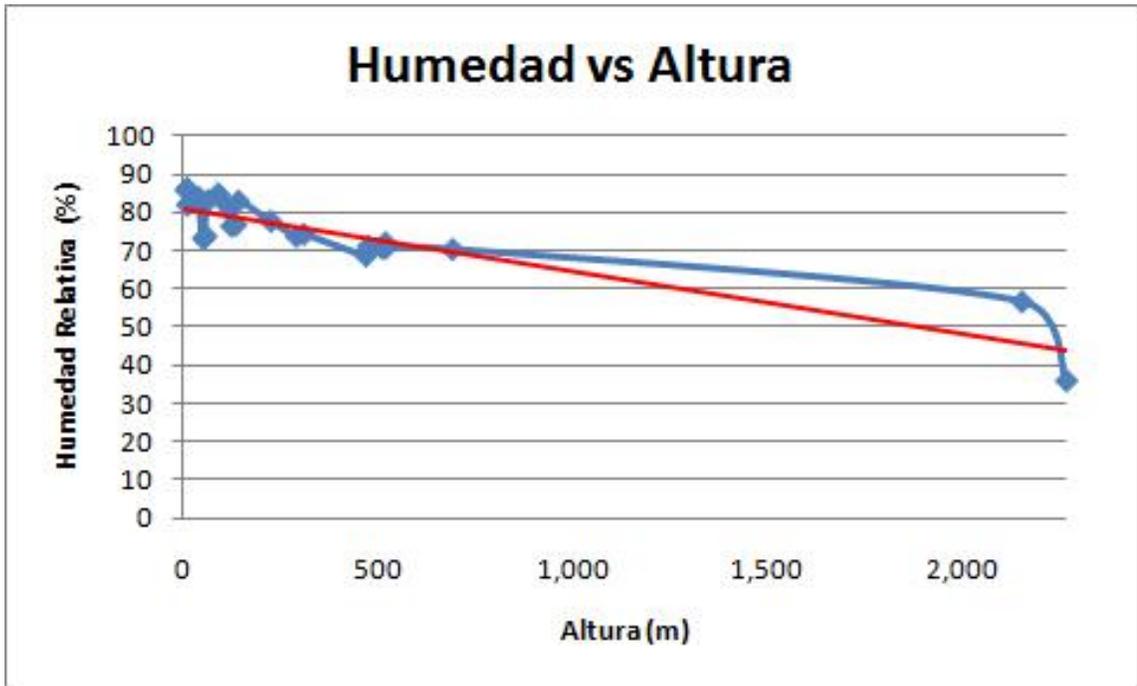


Figura 6.5: Comportamiento de la humedad relativa media con la altura en Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

Tal como se había comentado anteriormente, en este gráfico se puede observar una clara tendencia a la baja a medida que se aumenta la altura. Este hecho podrá ser aprovechado más adelante para complementar los métodos de interpolación en dos dimensiones, para transformarlos en tres dimensiones y obtener resultados que representen de mejor manera la situación que ocurre en la realidad.

## 6.2. PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS

Una vez clasificados los datos, se utilizaron dos métodos para estimar la humedad relativa, en primer lugar el que llamaremos “Brasil”, por ser basado en el utilizado en el atlas brasilero que impulsó el desarrollo del modelo Chile-SR y el segundo es el basado en la disminución empírica de la humedad relativa a medida que se aumenta la altura, que en adelante llamaremos método “Altura”.

El método “Brasil” trabaja en base a una interpolación de *kriging*, mientras que el método de alturas trabaja en base a la interpolación de inverso de la distancia. Para la humedad relativa no se utilizó un tercer método que combinará *kriging* con corrección por altura, dado que los variogramas no resultaron representativos.

A continuación, se presentarán los resultados y descripciones más detalladas para los dos métodos, para los meses de enero y julio por ser representativos de altas y bajas temperaturas en la región de Chile. Posteriormente se presentará el resto de los meses sólo para el método escogido, que en este caso resultó ser el método empírico asociado a altura.

### 6.2.1. BRASIL – SR

Para el método “Brasil”, básicamente se toman los datos clasificados dentro de los proporcionados por la DMC y se realiza una interpolación espacial utilizando el método de *Kriging*, para lo que es necesario desarrollar variogramas, que ayudarán a ponderar las interpolaciones que desarrolla el método, tomando en consideración los cambios que se presentan en las distintas direcciones cuando nos movemos desde un punto conocido. Sin embargo, la escasez de datos y la falta de homogeneidad en la distribución de los mismos, no permitió tener aproximaciones representativas para todas las direcciones, lo que llevó a buscar una aproximación que privilegiara el comportamiento en la dirección Norte – Sur por la geografía de Chile. Lo anterior queda representado en las siguientes figuras.

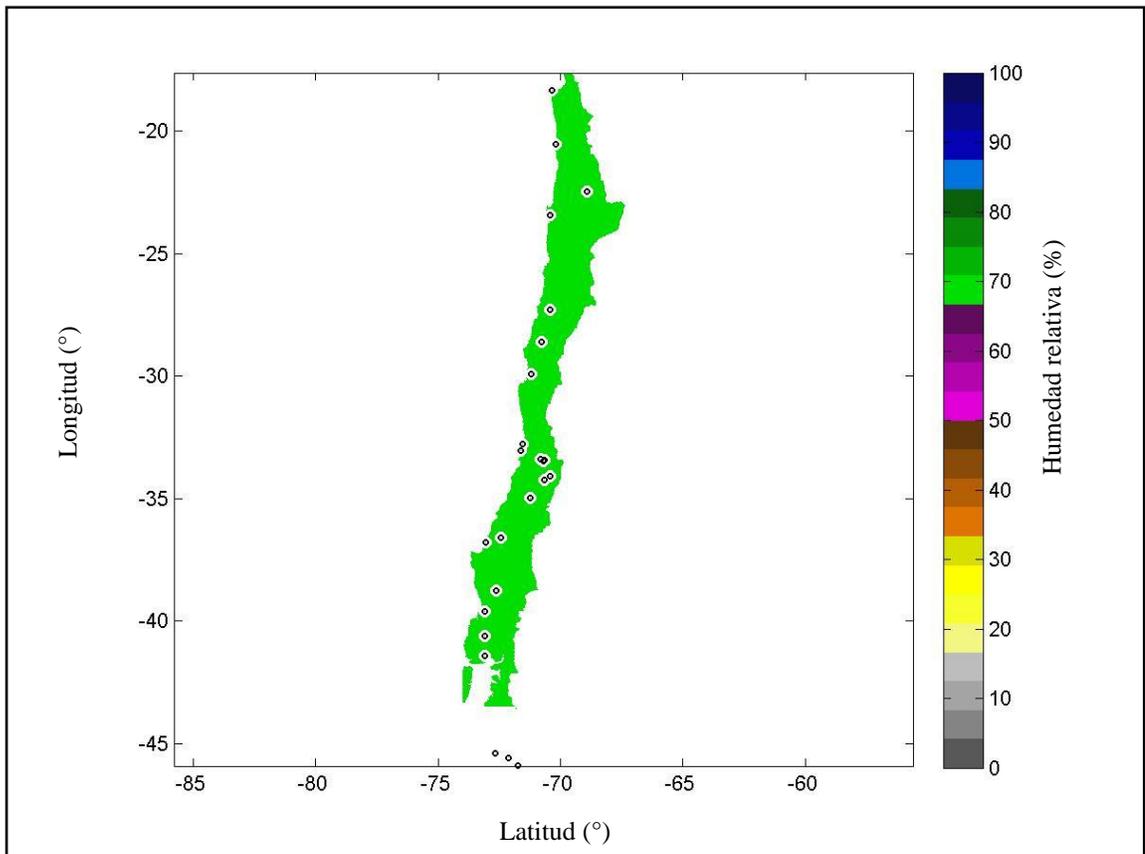


Figura 6.6: Mapa de humedad relativa media para el mes de enero en Chile con el método “Brasil-SR”

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

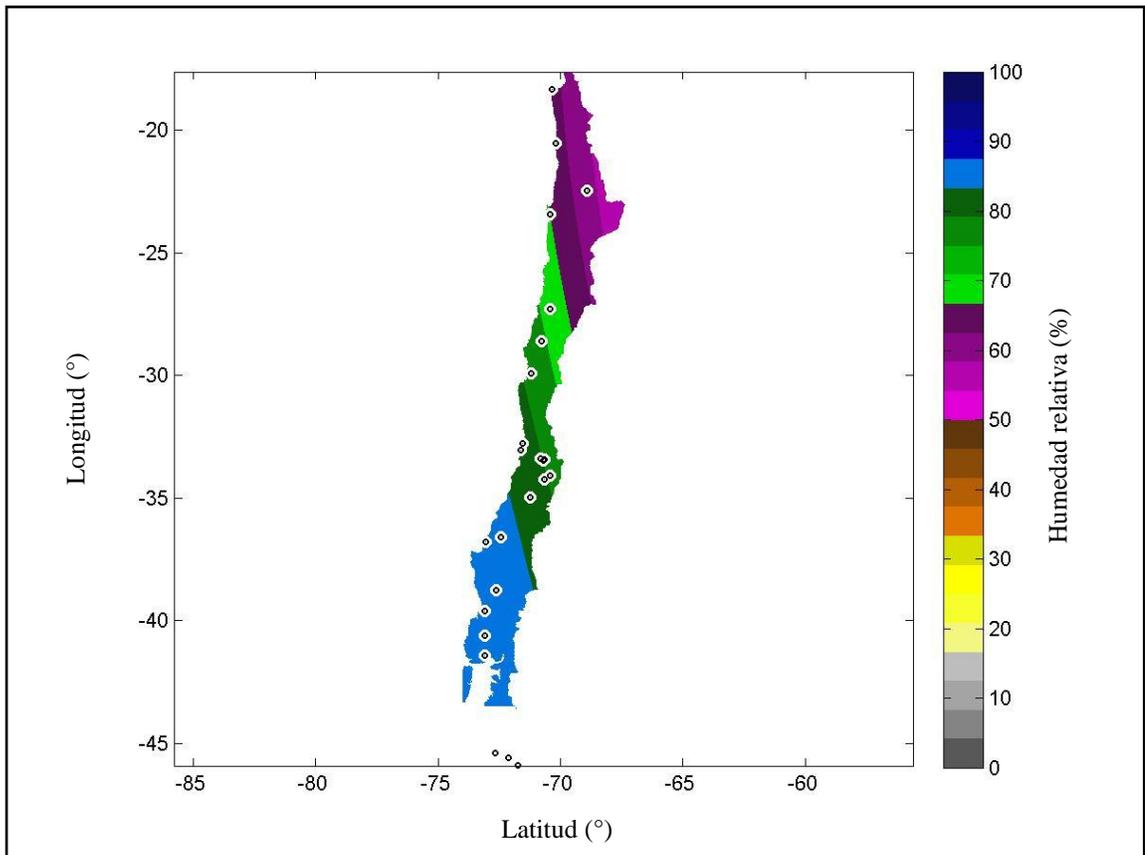


Figura 6.7: Mapa de humedad relativa media en el mes de julio para Chile con el método “Brasil-SR”

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

De estas imágenes se puede observar claramente que no se representa el comportamiento real que presenta la humedad relativa en el territorio chileno. Es de esperarse que la humedad relativa siga las tendencias descritas a partir de los gráficos presentados a comienzos de la sección, en lo que se refiere a latitud y longitud bajo esta imagen.

### **6.2.2. EMPÍRICO DE CORRECCIÓN POR ALTURA**

Dados los malos resultados obtenidos con el método de “Brasil” para el territorio chileno, fue necesario recurrir a otro método. Al revisar la literatura no se encontró ningún procedimiento que relacionase la altura o algún otro parámetro conocido para este estudio con la humedad relativa, por lo que fue necesario desarrollar un método empírico a partir de los datos conocidos para el territorio chileno.

Debido a que la información no está homogéneamente distribuida ni en latitud, longitud, ni altura, se complicó aún más el desarrollo de este procedimiento. Sin embargo, al realizar medias entre las cinco ubicaciones más altas y las cinco ubicaciones más bajas en todo el territorio, se pudo obtener una pendiente de descenso de la humedad relativa a medida que se aumenta la altura. (figura 6.5)

Del procedimiento descrito anteriormente se encontró una pendiente de -2,1 %, es decir al efectuar esta corrección por altura, la humedad relativa desciende 2,1 % por cada 100 metros que se asciende en altura. Para poder corroborar la existencia de esta tendencia se aplicó el test de correlaciones no paramétricas de Kendall, el cual arrojó que los datos de humedad relativa proporcionados por la DMC poseen una tendencia significativa a la baja con respecto al aumento de altura. En los anexos se incluye el informe de resultados del test de Kendall aplicado para todos los datos.

La manera de desarrollar este método fue, en primer lugar llevar todos los datos conocidos a nivel del mar, para luego realizar una interpolación de “inverso de la distancia” para toda la superficie de Chile y finalmente corregir todos los datos según la altura en la que se encuentren, siempre siguiendo el valor de pendiente calculado anteriormente. Luego, para el mes de enero y julio los mapas de resultados obtenidos quedan graficados de la siguiente manera:

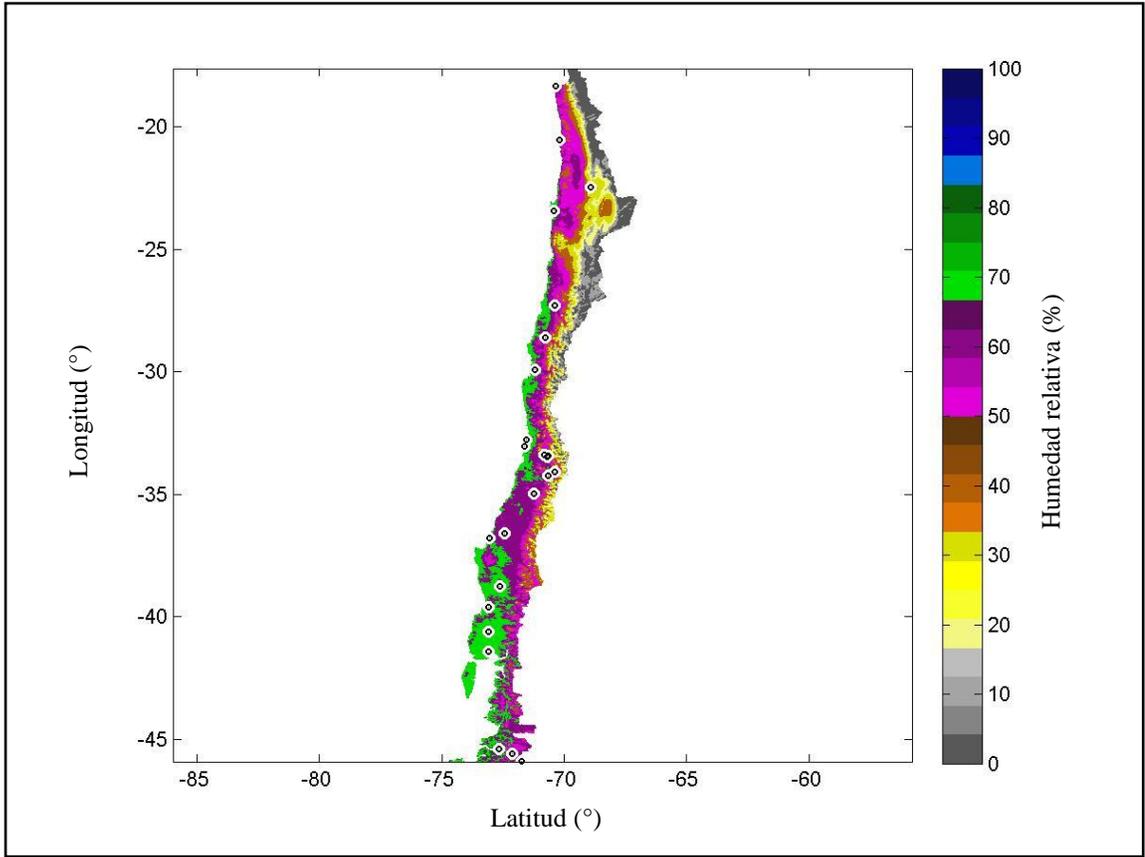


Figura 6.8: Mapa de humedad relativa media para el mes de enero en Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

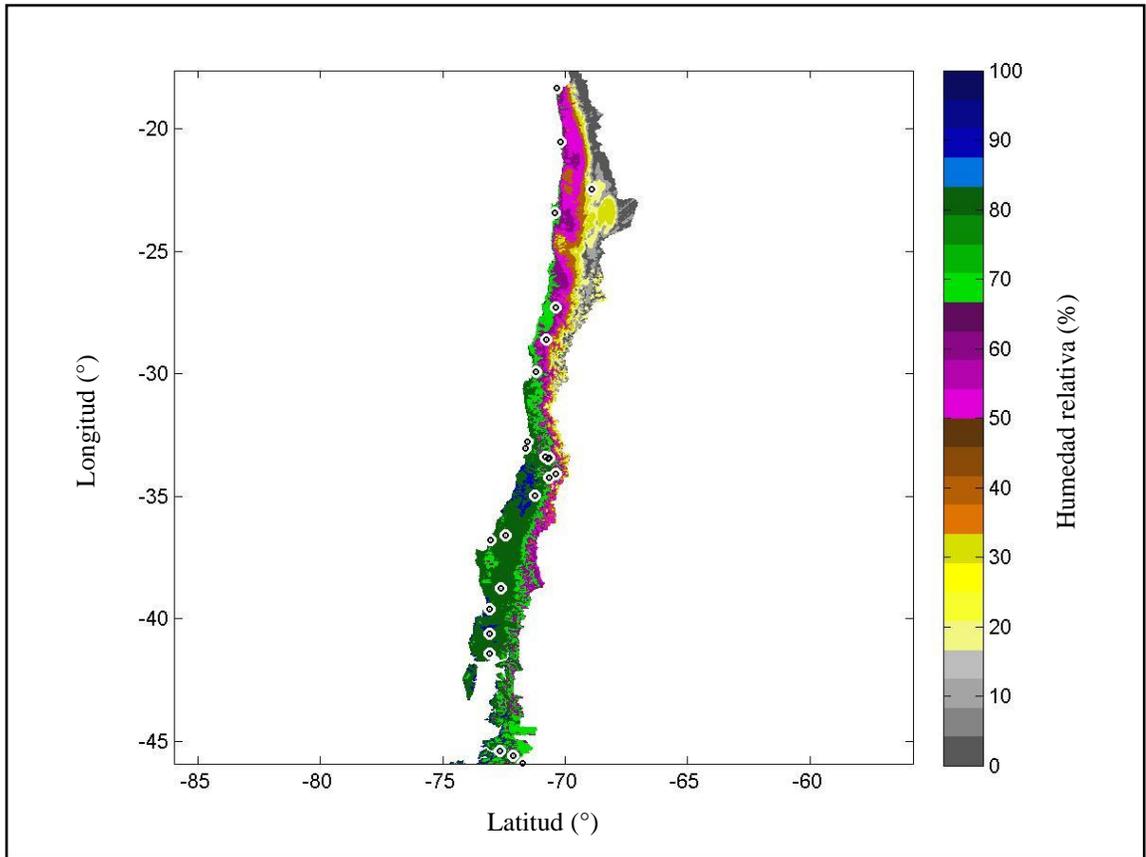


Figura 6.9: Mapa de humedad relativa media para el mes de julio en Chile  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

De estos mapas ya se pueden comenzar a observar las tendencias esperadas descritas al comienzo de la sección de humedad relativa, y que se encuentran completamente alineadas con la realidad de los datos chilenos.

## 7. ALBEDO

### 7.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Para comenzar, es fundamental explicar con palabras simples en qué consiste esta propiedad. Albedo se refiere a la porción de radiación que es reflejada por una superficie.

Al momento de referirnos al caso del albedo terrestre, es muy importante comentar que existen distintos tipos de albedo. En orden de llegada a la Tierra desde el Sol, en primer lugar nos encontramos con el “Albedo Atmosférico”, que corresponde a la porción de radiación reflejada en la atmósfera terrestre. En segundo lugar, nos encontramos con el “Albedo de Superficie”, que se refiere a la propiedad de albedo antes descrita, pero en relación superficie terrestre.

Cabe destacar que este estudio se enfoca en el cálculo de este último, tomando en consideración muchos elementos y procedimientos desarrollados por la agencia espacial de Estados Unidos NASA, dentro de los que se destacan el “Albedo Atmosférico” y el “*Normalized Difference Vegetation Index*”. Este último, a su vez ayuda a diferenciar entre los distintos tipos de cobertura que posee la superficie terrestre, ya sea un frondoso bosque, pampa, desierto, estepa, entre otros, tomando en consideración además importantes factores como la “aspereza de la superficie”, la “fotosíntesis” y la “evapotranspiración”(Sellers et. al ,1995).

Para el cálculo del albedo de superficie, es muy importante destacar que al revisar la literatura uno se encontrará con distintos tipos de albedos: “*black-sky*” albedo, “*white-sky*” albedo y “*blue-sky*” albedo ( $\alpha$ ) o también conocido como “*actual albedo*”. Estos albedos se encuentran relacionados.

## 7.2. PROCEDIMIENTO MODIS Y MAPAS OBTENIDOS

El “black-sky” albedo ( $\alpha$ ) es también conocido como “directional-hemispherical reflectance” y consiste como su nombre lo indica, en la componente direccional de la reflexión de la radiación en la superficie terrestre. Para su cálculo, la NASA (Schaaf et. al. 2001) desarrolló un polinomio simple que entrega una muy buena aproximación de sus valores para los distintos ángulos solares del zenit ( $\theta$ ) y las distintas longitudes de onda ( $\lambda$ ) según los canales satelitales con los que se está trabajando. Dicho polinomio es presentado a continuación:

$$\alpha_{\theta, \lambda} = f_{iso} \lambda (g_{0 iso} + g_{1 iso} \theta^2 + g_{2 iso} \theta^3) + f_{vol} \lambda (g_{0 vol} + g_{1 vol} \theta^2 + g_{2 vol} \theta^3) + f_{geo} \lambda (g_{0 geo} + g_{1 geo} \theta^2 + g_{2 geo} \theta^3) \quad \text{Ecuación 7.1}$$

Donde los valores  $f_{iso}$ ,  $f_{vol}$  y  $f_{geo}$  pueden ser obtenidos fácilmente de archivos que son proporcionados de manera gratuita del WIST de la NASA<sup>9</sup>, donde todos los datos fueron entregados en promedios mensuales a partir de mediciones de 16 días continuados y en una resolución de 0,05° (5.600 m.). Por su parte los valores  $g_i$ , con  $i = 0, 1, 2$ ; son proporcionados en la siguiente tabla:

Tabla 7.7.1: Constantes para cálculo de “black-sky” albedo  
Fuente: <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>

Término	Isotrópico (iso)	RossThick (vol)	LiSparseR (geo)
$g_0$	1,0	-0,007574	-1,284909
$g_1$	0,0	-0,070987	-0,166314
$g_2$	0,0	0,307588	0,041840

<sup>9</sup> <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>

A continuación, se presentan los resultados de “*black-sky*” *albedo* para los meses de enero y julio, para tener conocimiento de los resultados parciales y detectar anomalías en caso de que las haya.

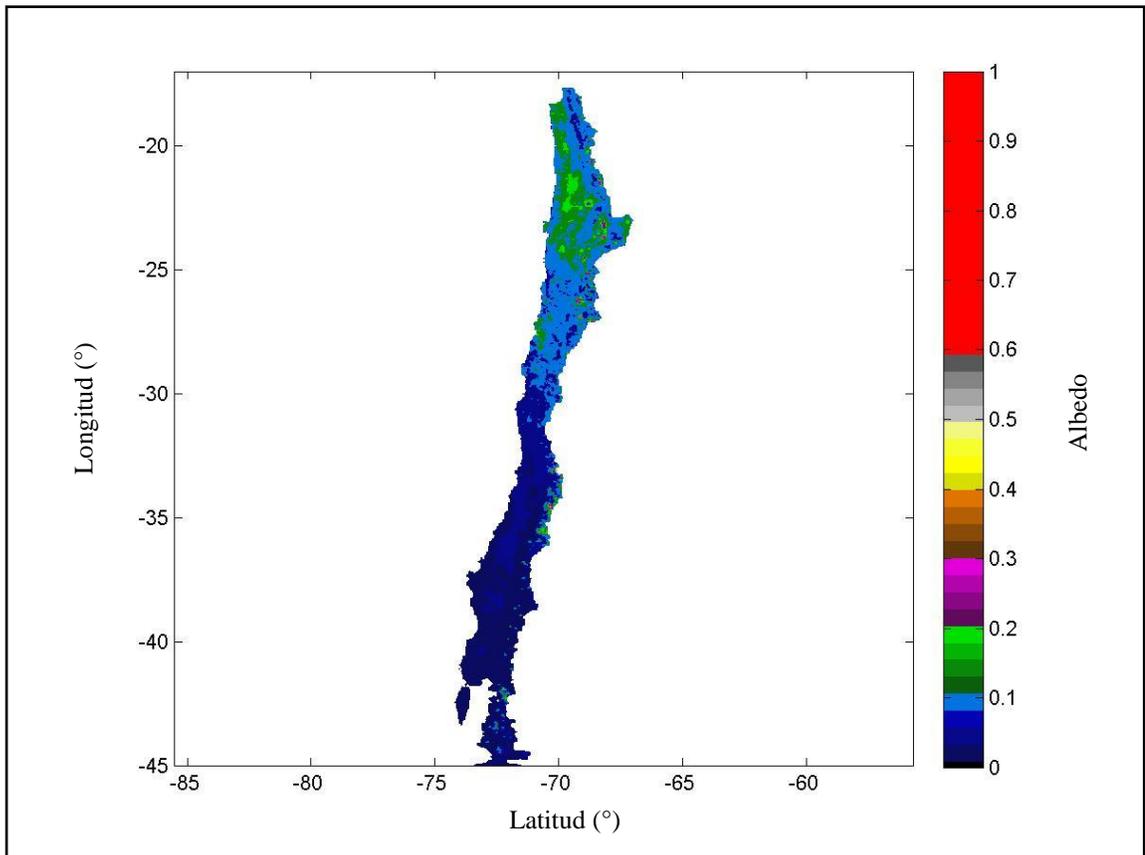


Figura 7.1: Mapa de “*black-sky*” *albedo* para el mes de enero en Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

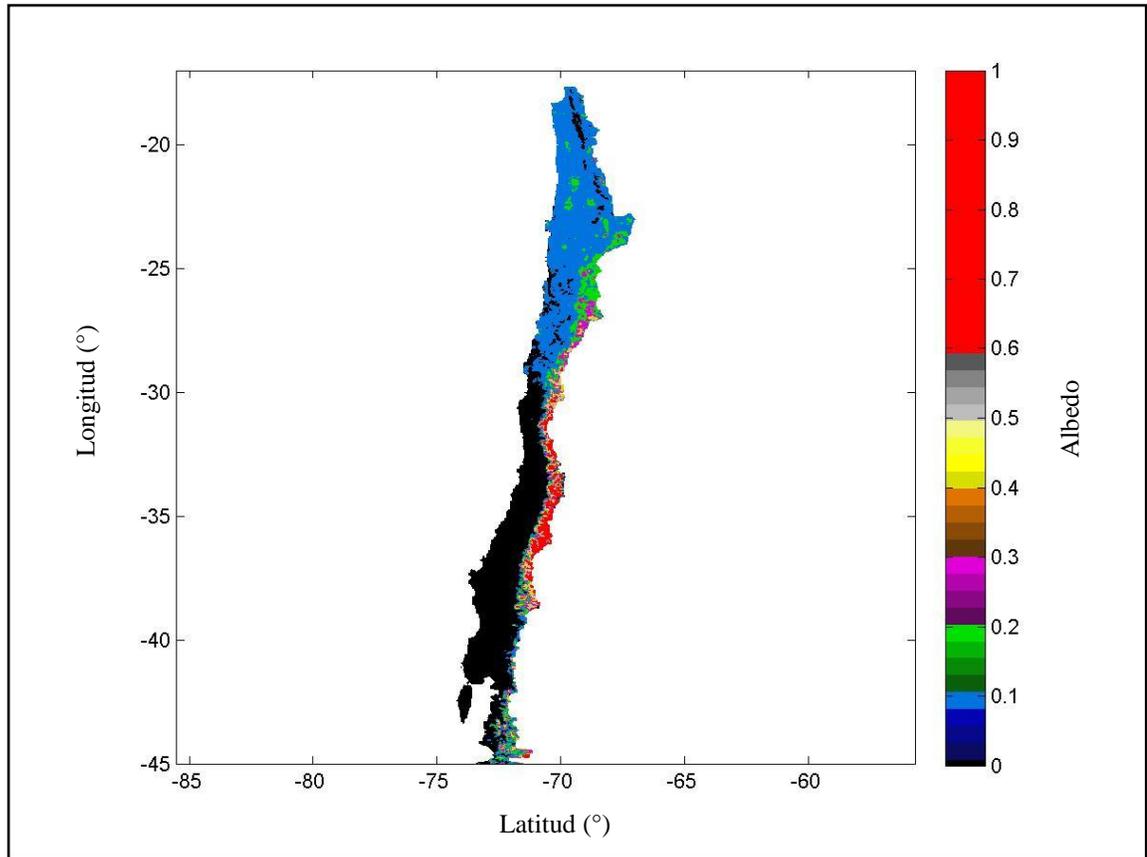


Figura 7.2: Mapa de “black-sky” albedo para el mes de julio en Chile  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

De estos mapas, podemos comprobar que todos los valores se encuentran dentro del rango esperado [0,1] y además se ven tendencias marcadas que diferencian las zonas Norte – Sur y además podemos observar diferencias en la zona de la Cordillera de los Andes, todo lo que viene a confirmar que los resultados son correctos.

Por su parte el “white-sky” albedo ( $\alpha$ ) es también conocido como “bi-hemispherical reflectance”, lo que hace referencia a la componente bi-hemisférica de la radiación. Para su cálculo, la NASA desarrolló un polinomio simple que entrega una muy buena aproximación de sus valores para las distintas longitudes de onda ( $\lambda$ ). Dicho polinomio es presentado a continuación:

$$\alpha_{\lambda} = f_{iso} g_{iso} + f_{vol}(\lambda)g_{vol} + f_{geo}(\lambda)g_{geo} \quad \text{Ecuación 7.2}$$

Análogamente al caso de “*black-sky*” *albedo*, los valores  $f_{iso}$ ,  $f_{vol}$  y  $f_{geo}$  pueden ser obtenidos fácilmente de archivos que son proporcionados de manera gratuita del WIST de la NASA<sup>10</sup>, o directamente de un servidor FTP, al cual se puede acceder desde la dirección web de la USGS<sup>11</sup>, donde todos los datos fueron entregados en promedios mensuales de dieciséis días del mes, medidos de forma continuada y en una resolución 0,05° (5.600 m.). Por su parte los valores  $g_i$  con  $i = \text{“iso”, “vol” y “geo”}$ , son proporcionados en la siguiente tabla:

Tabla 7.7.2: Constantes para cálculo de “*white-sky*” *albedo*  
Fuente: <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>

Término	Isotrópico	RossThick (vol)	LiSparseR (geo)
“ <i>white-sky</i> ” <i>integral</i> (g)	1,0	0,189184	-1,37762

A continuación se entregan los resultados “*white-sky*” *albedo*, para del mismo modo que con el “*black-sky*” *albedo* poder ir verificando el correcto funcionamiento del programa y tener un conocimiento básico de él.

<sup>10</sup> <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>

<sup>11</sup> [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get\\_data/data\\_pool](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool)

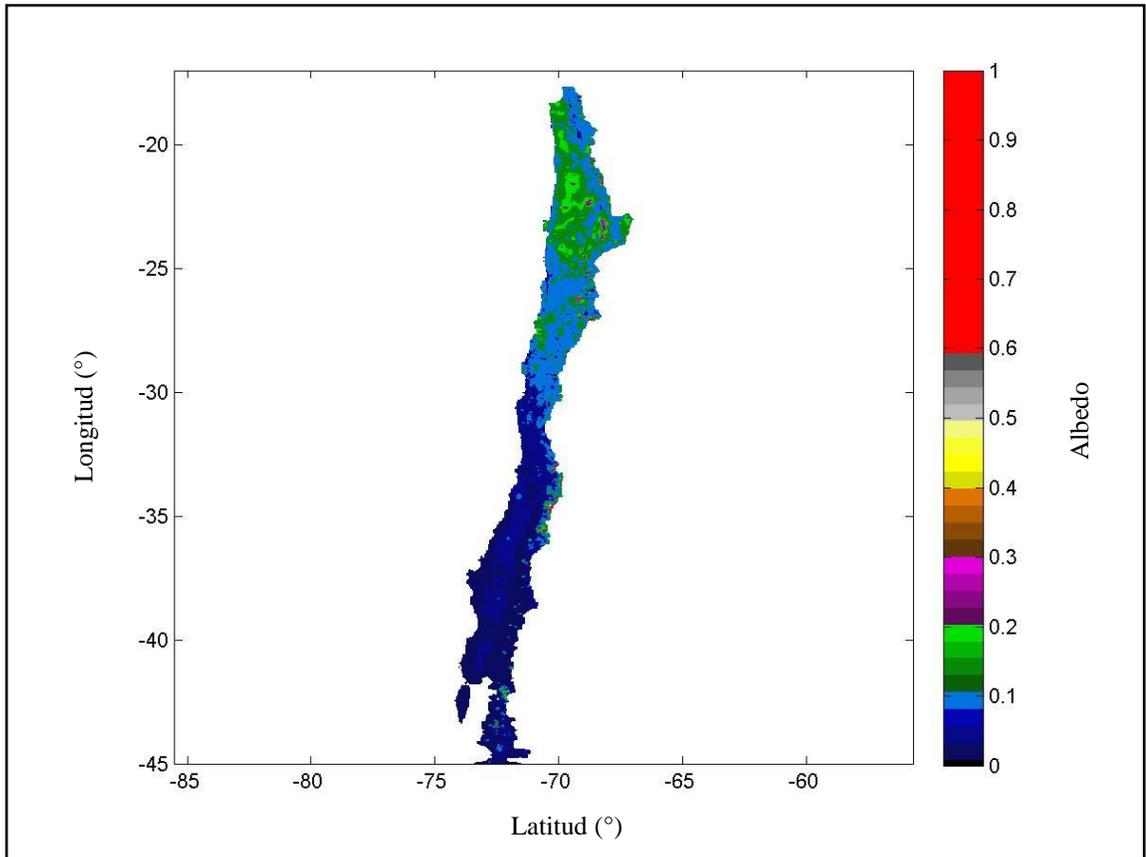


Figura 7.3: Mapa de “white-sky” albedo para el mes de enero en Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

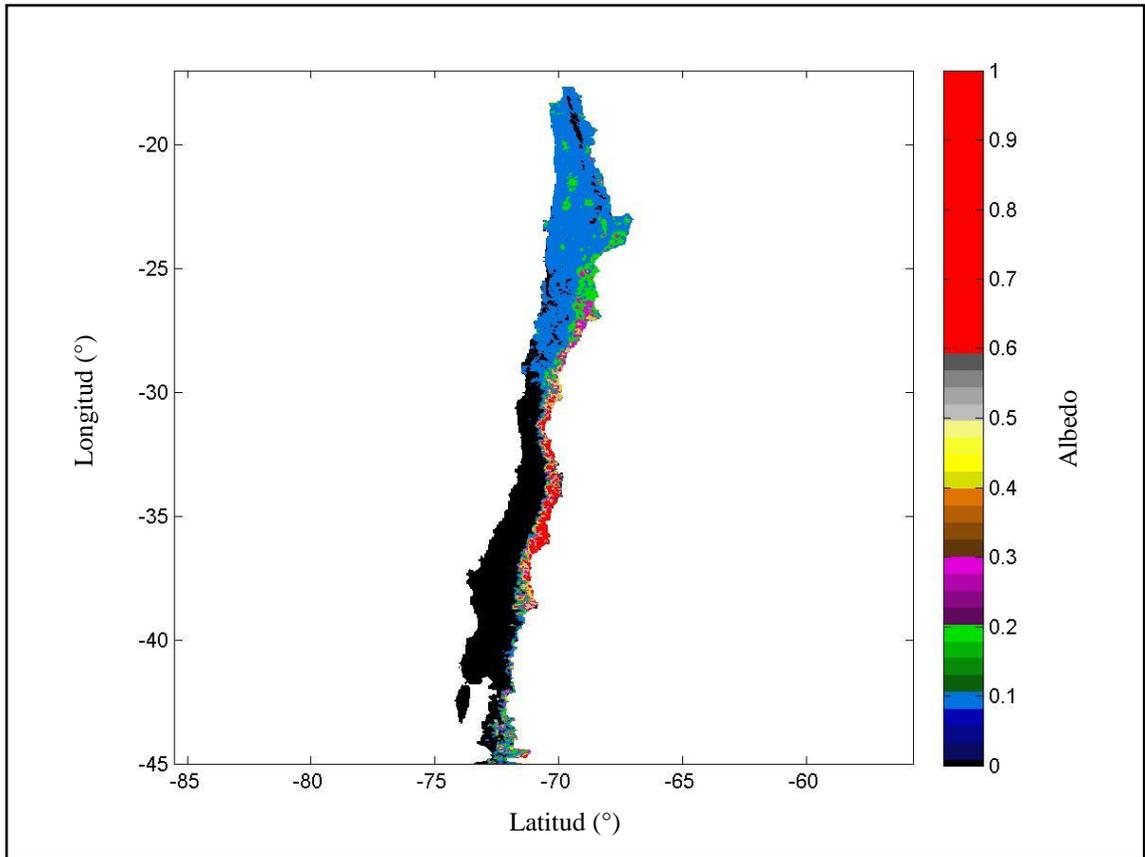


Figura 7.4: Mapa de “white-sky” albedo para el mes julio en Chile  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

Al igual que en con el caso del “black-sky” albedo podemos distinguir las zonas Norte – Sur y la Cordillera de los Andes por sobre el resto del territorio, reafirmando la validez de los resultados obtenidos.

A modo de analogía para facilitar la comprensión, podemos comparar el “black-sky” albedo y el “white-sky” albedo a las componentes directa y difusa de la radiación solar incidente respectivamente.

Una vez obtenidos los albedos de cielos “negro” y cielo “blanco”, es necesario obtener la iluminación difusa (D) para poder calcular el “blue-sky” albedo. La iluminación difusa se puede obtener de manera rápida y sencilla de la tabla de búsqueda que fue creada por NASA con ayuda del código 6S y que entrega valores para 90 ángulos solares

del zenit desde  $0^\circ$  a  $89^\circ$  con una variación de  $1^\circ$  y para 50 distintas profundidades ópticas adimensionales de 0 a 1,0 con saltos de 0,02 entre cada valor. Esta tabla puede ser descargada en lenguaje de programación C, desde la página web de NASA dentro de las especificaciones de los productos MODIS y se encuentra documentada en Lewis y Barnsley (1994), donde además se explican las ventajas y problemas de trabajar con los distintos ángulos solares.

A continuación, se presentan para todo el territorio chileno un mapa para los ángulos solares del zenit, obtenidos directamente del producto MCD43C3 de MODIS, que lo entrega en una resolución de  $0,05^\circ$  (5.600 m.) y dos mapas de “*optical depth*”, obtenidos del modelo Giovanni de la NASA con una resolución de  $1^\circ$ . Uno para enero y el otro para julio, a modo de confirmación y para conocer su comportamiento.

La diferencia de resoluciones para poder obtener los valores de iluminación difusa fue resuelta mediante el uso de una interpolación bilineal.

Para el ángulo local solar del zenit, se tiene:

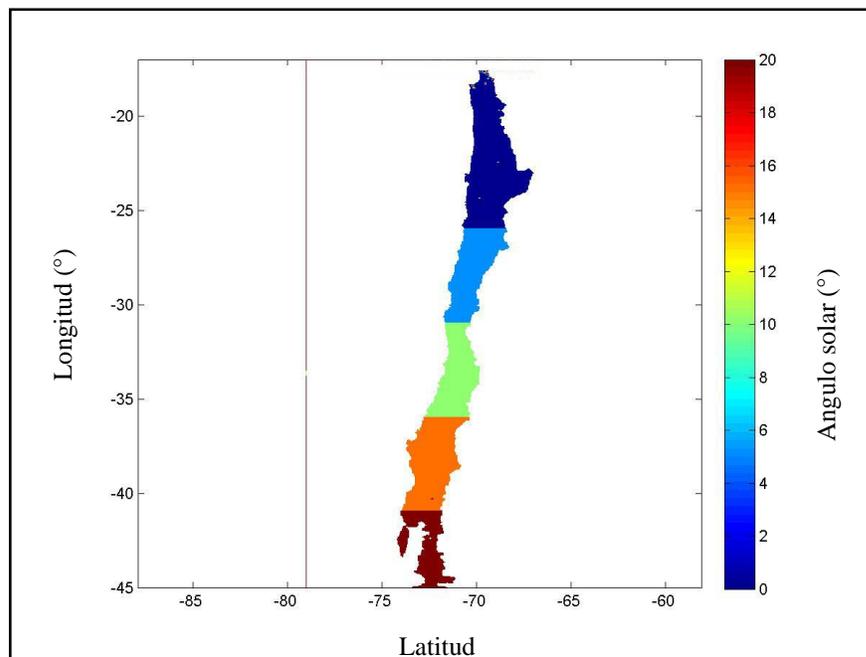


Figura 7.5: Mapa para los ángulos local solar del zenit en todo Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

De esta figura podemos comprobar que el ángulo local solar del zénit tiene directa relación con la latitud, hecho que concuerda con toda la literatura y viene a reafirmar que los datos obtenidos tienen validez.

Por su parte, la profundidad óptica de la atmósfera u “*optical depth*” para los meses de enero y julio queda representada por las siguientes imágenes:

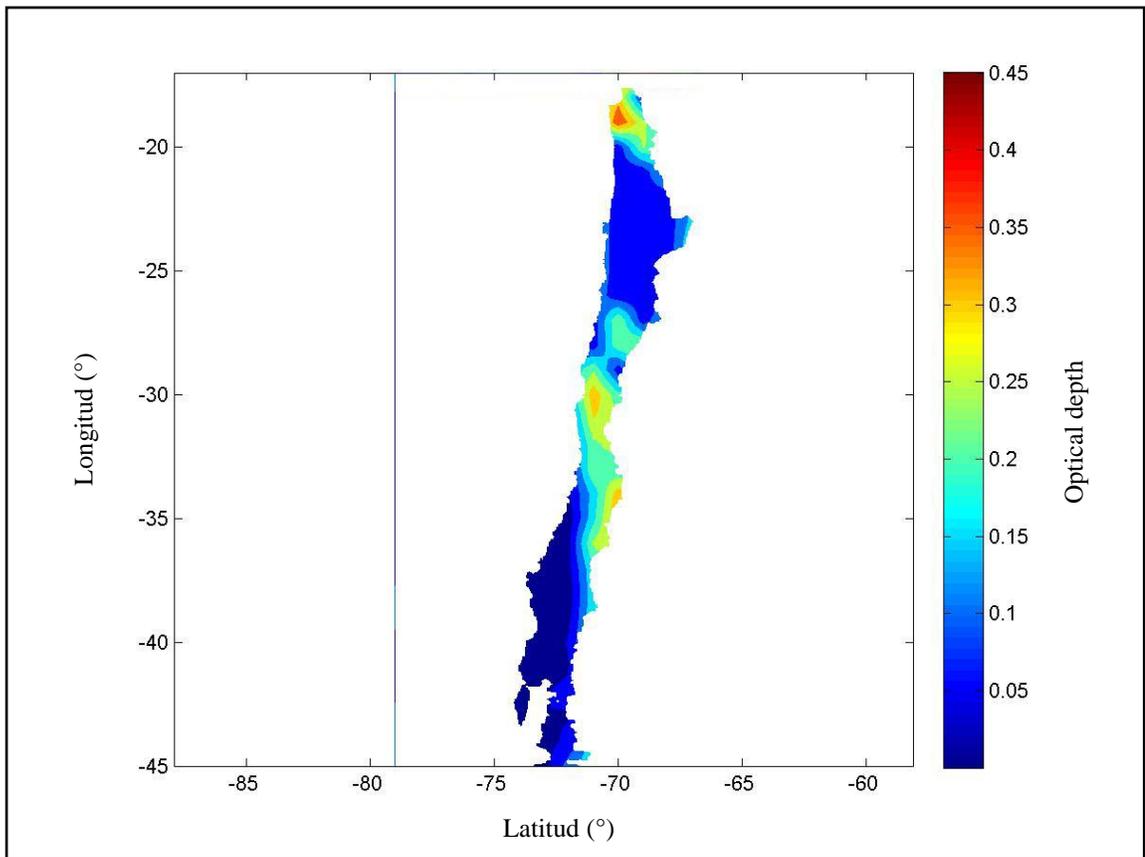


Figura 7.6: “*Optical depth*” para el mes de enero en todo Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

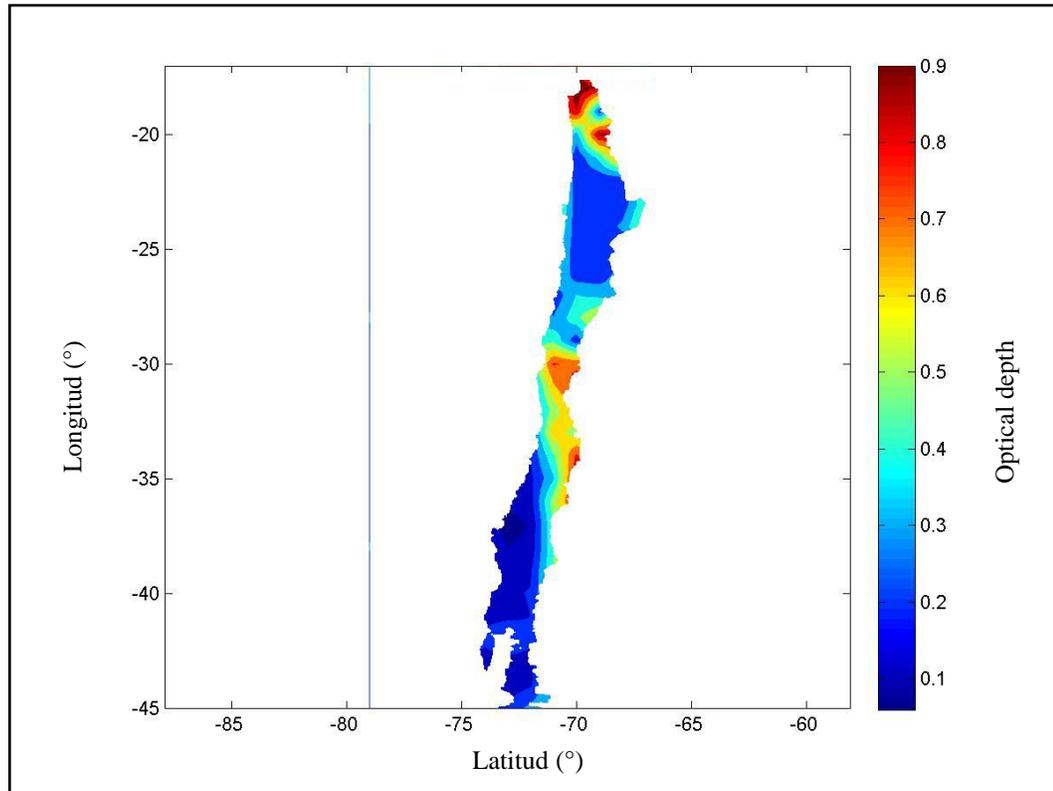


Figura 7.7: “Optical depth” para el mes de julio en todo Chile  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

Estos gráficos tienen directa relación con las imágenes que se muestran en la página del modelo Giovanni<sup>12</sup> de la NASA, al estudiar la región de Chile. Hecho que puede ser verificado de su página web citada en uno de los párrafos siguientes. Adicionalmente podemos comprobar que en el Norte y el Sur de Chile encontramos muy poca oposición al paso de la radiación, tal como la comunidad científica ha podido estudiar y reafirmar con proyectos como el telescopio en las vecindades de San Pedro de Atacama. Con los valores de “black-sky” albedo, “white-sky” Albedo e “iluminación difusa” podemos utilizar la siguiente ecuación para encontrar el valor del “blue-sky” albedo, el cual es el que se necesita entregar como variable de entrada al modelo Chile-SR.

<sup>12</sup> Modelo desarrollado y publicado por la NASA

$$\alpha = 1 - D \alpha \theta + D\alpha \quad \text{Ecuación 7.3}$$

Donde  $\alpha$  corresponde a “blue-sky” albedo,  $D$  es la iluminación difusa,  $\alpha$  es el “black-sky” albedo,  $\theta$  es el ángulo solar del zénit y  $\alpha$  corresponde al “white-sky” albedo.

Para efectos de este tipo de estudios, siguiendo los análisis de sensibilidad realizados para desarrollar el método Brasil-SR y tomando en consideración las recomendaciones de la NASA, es que se trabajó con valores del ángulo solar de zenit para el mediodía local. Esto permite utilizar directamente el resultado de uno de los productos MODIS de combinación de los satélites Terra y Aqua, que es MCD43C3, que trabaja con un valor del ángulo solar del zenit para cada pixel, que se calcula como el valor medio para cada período de dieciséis días en los que se entregan los resultados. Además este producto entrega directamente los valores para “black-sky” albedo y “white-sky” albedo para todo el territorio chileno.

Para el caso de la iluminación difusa, respetando los procedimientos entregados en Remer, Tanré, Kaufman (2006), los valores de “optical depth” fueron obtenidos directamente de los resultados del sistema Giovanni, que es otro de los modelos que entregan resultados procesados para variables climatológicas de la agencia espacial NASA, y que pueden ser descargados gratuitamente desde su dirección virtual<sup>13</sup>.

Para el cálculo del ángulo solar del zenit, se obtuvo para cada pixel el valor local para el mediodía local, entregado en cada uno los archivos de “black-sky” albedo y “white-sky” albedo, lo que permite entrar directamente a la tabla de búsqueda de la NASA antes mencionada y obtener directamente, sólo utilizando una simple interpolación lineal en dos dimensiones, los valores de iluminación difusa para cualquier par de datos.

A continuación, se presentan los resultados de iluminación difusa o “diffuse skylight” para los meses de enero y julio, para revisarlos y entender un poco más su comportamiento:

---

<sup>13</sup> [http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=MODIS\\_MONTHLY\\_L3](http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_MONTHLY_L3)

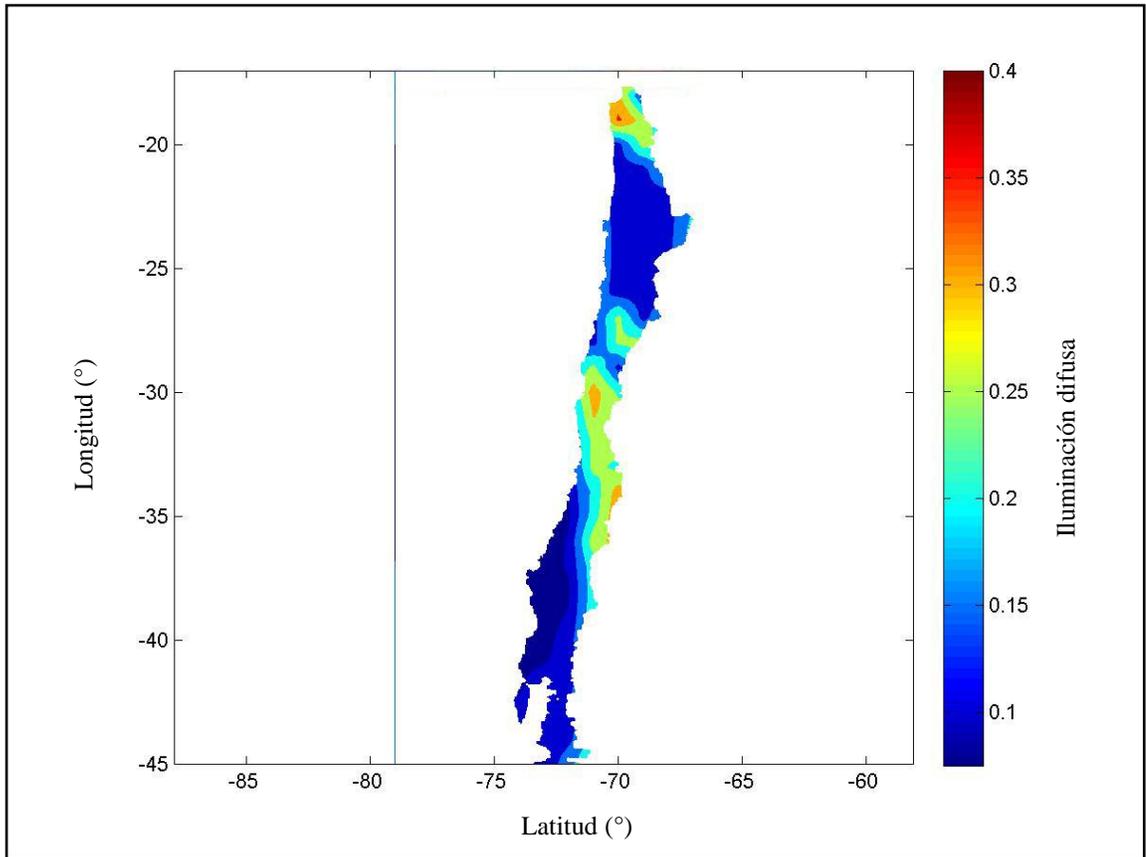


Figura 7.8: Iluminación difusa para el mes de enero para todo Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

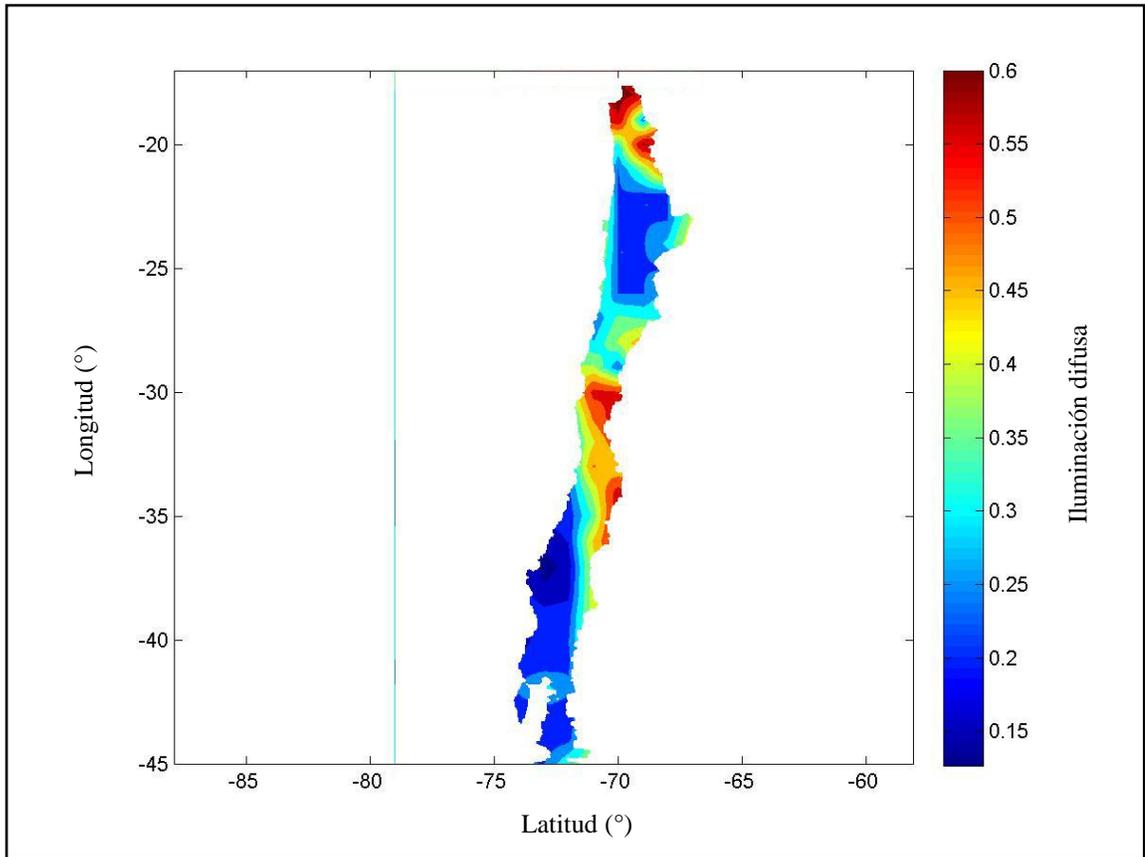


Figura 7.9: Iluminación difusa para el mes de julio para todo Chile  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

Para estos mapas si bien no existen precedentes para el territorio chileno, sí podemos observar valores razonables según la literatura (Rees 1990, Weast 1981), (cercanos al 25% en promedio) y con una distribución que distingue claramente las distintas zonas de Chile en sentido Norte – Sur muy acorde a la distribución de los climas, tal como se revisará en más detalles en la sección de resultados de este trabajo.

Finalmente, con esos datos podemos utilizar la ecuación (7.3) y obtener los resultados de Albedo Real Terrestre requeridos por el modelo Chile-SR, los que son presentados a continuación para los meses de enero y julio, mientras que para el resto de los meses, dichos resultados pueden ser encontrados en los anexos.

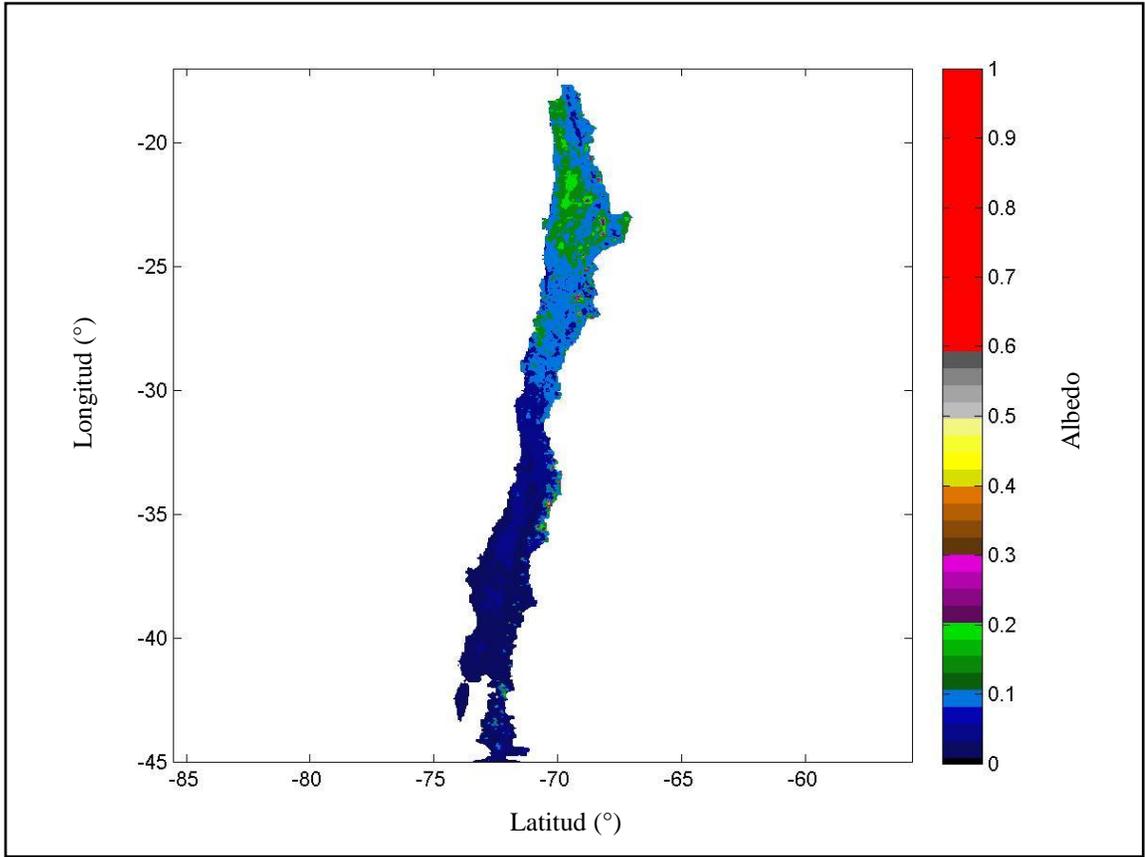


Figura 7.10: Albedo real terrestre para el mes de enero para todo Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

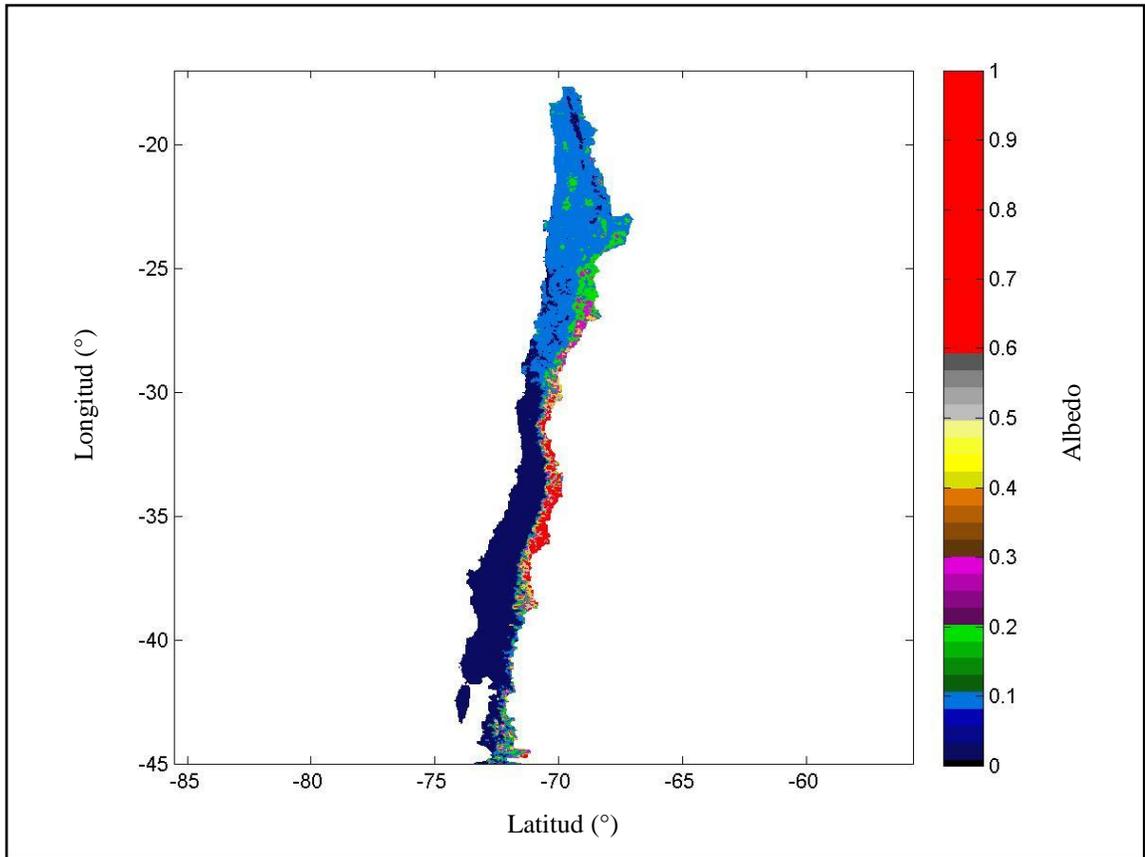


Figura 7.11: Albedo Real Terrestre para el mes de julio para todo Chile  
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

Al igual que en los casos de *“black-sky” albedo* y *“white-sky” albedo* podemos apreciar una clara distinción entre las zonas Norte – Sur y la Cordillera de los Andes del resto del territorio.

## **8. RESULTADOS**

Estableciendo la realidad de Chile dentro del contexto de una crisis energética en sus comienzos, pero que se ve acrecentada por una escasez hídrica, es que este trabajo toma más relevancia por el hecho de ayudar a diversificar la matriz energética del país, a la vez que entrega una alternativa para potenciarla en gran medida.

Cada una de las secciones de este trabajo fue desarrollada de manera independiente, por lo que se obtuvieron mapas de resultados para cada una de ellas y serán presentados individualmente. Sin embargo es muy importante destacar que sí existen cualidades en común para todos ellos, por lo que esas aclaraciones serán realizadas a continuación.

Es relevante destacar que dada la geografía de Chile, siempre se ha podido observar un comportamiento de los parámetros climatológicos abarcados en este estudio, muy característico y que puede ser relacionado con los diferentes climas que se presentan en el territorio chileno. Es por ello que a continuación se presenta un mapa con los distintos climas de Chile que ha sido obtenido del Informe Anual de Medio Ambiente del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2008), al cual se puede acudir en caso de requerir más información particular para cada uno de los climas de Chile.

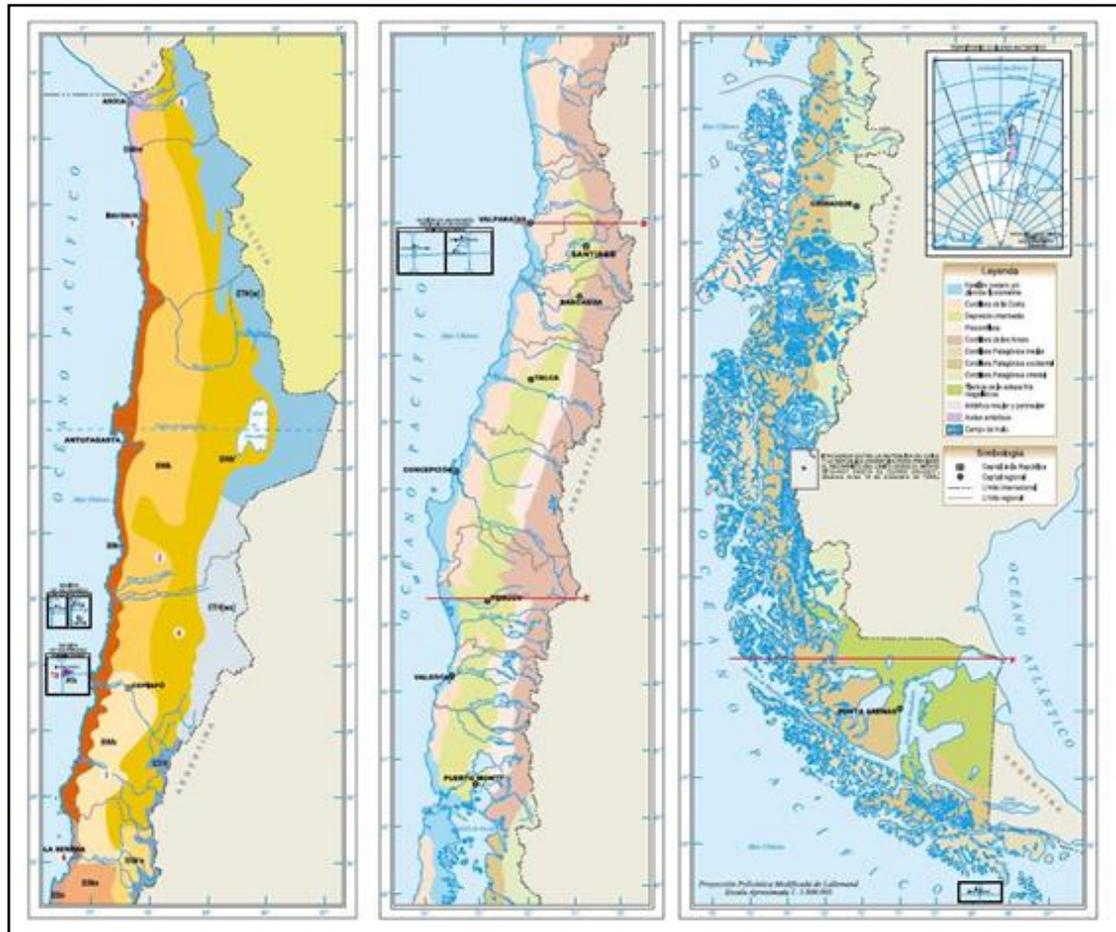


Figura 8.1: Mapa de climas de Chile  
 Fuente: Climas de Chile (INE, 2008)

Adicionalmente, podemos recurrir una definición de clima. Por ejemplo, en el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española<sup>14</sup>, se expresa como primera acepción: “Conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región”, mientras que la segunda acepción de la palabra, ahonda aún más diciendo: “Temperatura particular y demás condiciones atmosféricas y telúricas de cada país”. A partir de estas definiciones la relación entre el mapa de climas de Chile del (INE) y de los resultados de este estudio se hacen evidentes, ya que los parámetros de este estudio son un

<sup>14</sup> <http://www.rae.es>

subconjunto de las características que abarca el clima en cada una de las localidades en las que se encuentra descrito.

Para el caso del albedo, si bien la relación no es tan directa, también existe por cuanto esta propiedad es determinada en gran medida por la cobertura (flora) efectiva de cada ubicación, factor que también es considerado una característica dentro de un cierto tipo de clima. Es más, dentro de la literatura podemos encontrar formas alternativas de cálculos de albedo. Una de ellas es mediante el uso de tablas que a partir del tipo de suelo entregan un valor aproximado de albedo típico para esa superficie, hecho que refuerza el argumento anterior. Un ejemplo de este tipo de tablas puede ser encontrado en Rees (1990).

Tabla 8.1: Índices de albedos superficiales típicos  
Fuente: Rees (1990).

<b>Superficie</b>	<b>%</b>	<b>Superficie</b>	<b>%</b>	<b>Superficie</b>	<b>%</b>
Bosque	5-10	Granito	30-35	Pasto	5-30
Arena	20-40	Nieve	60	Suelo	5-30
Áreas Urbanas	5-20				

Cabe destacar que la altura juega un rol fundamental en las características climatológicas de Chile, ya que tal como en estudios de zonas montañosas en Estados Unidos y Canadá (Dodson y Marks 1997), en Chile las variaciones de altura, tanto por la presencia de la Cordillera de la Costa en el Norte del país, como la Cordillera de los Andes, casi en la totalidad del territorio, generan microclimas cobijados de la acción del mar o de los países aledaños, lo que permite crear una directa relación entre este factor y el resto. Este hecho fue claramente aprovechado en los mapas de temperatura y humedad relativa de manera directa, mientras que sus efectos en el albedo de superficie ya se encuentran

incorporados en las imágenes satelitales, lo que evita tener que incluirlos con correcciones posteriores.

Para el caso de la temperatura los resultados obtenidos con el método “Combinado” son los que se recomiendan utilizar para el modelo Chile-SR, ya que aprovechan las virtudes de los otros dos modelos presentados en este trabajo y no tendría una debilidad evidente salvo el requerimiento computacional para llevarlo a cabo.

A continuación se muestra la imagen final de temperatura correspondiente al mes de enero, con la resolución de 1km. por 1 km. para todo Chile, con los respectivos pixeles.

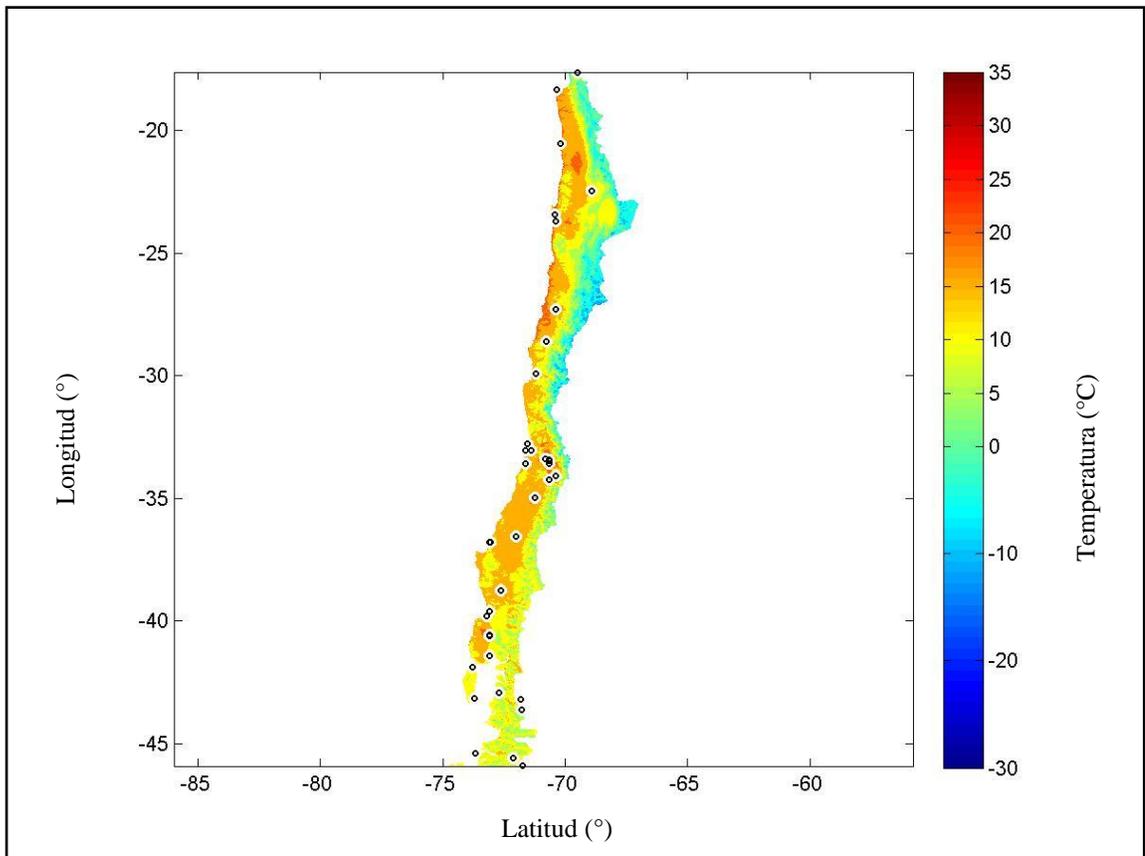


Figura 8.2: Mapa de temperatura media de enero con la resolución del “modelo combinado”

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

A partir de los mapas de temperaturas desarrollados, es que en el método Chile-SR se calcularán los distintos tipos de atmósferas para cada pixel de 1 km. por 1 km., donde la clasificación se realiza siguiendo la siguiente tabla de intervalos.

Tabla 8.2 Tabla de rangos de tipos de atmósfera  
Fuente: Modelo Brasil-SR

<b>Tipo de atmósfera</b>	<b>Rango de temperatura (°C)</b>
1	$T \geq 26,85$
2	$20,85 \geq T > 26,85$
3	$13,85 \geq T > 20,85$
4	$-1,15 \geq T > 13,85$
5	$-16,15 \geq T > -1,15$
6	$-16,15 \geq T$

Siguiendo estos parámetros para Chile se obtiene una distribución de tipos de atmósfera que ingresa al modelo Chile-SR que queda representado por la siguiente imagen en el caso del mes de enero, mientras que los demás meses son presentados en los anexos de este trabajo.

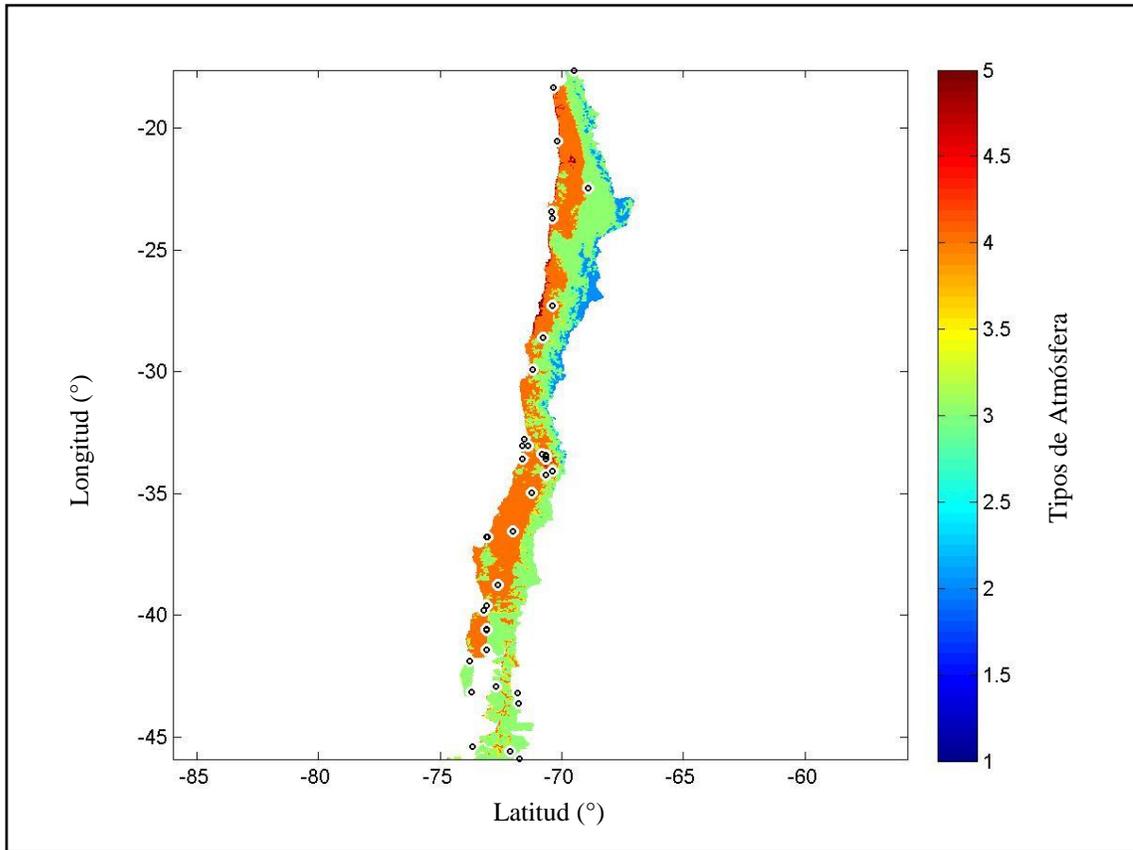


Figura 8.3: Mapa de tipos de atmósferas para el mes enero  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

Por su parte, para la humedad relativa se sugiere implementar el uso del modelo “empírico de corrección por altura”, ya que según lo determinado en este estudio, no existe ningún otro procedimiento que pueda representar de mejor manera el comportamiento de este factor climatológico en el territorio de Chile, ya que el modelo “Brasil-SR” no incorpora el efecto de la altura, hecho que en Chile condiciona todo tipo de resultados.

A continuación se muestra la imagen final de humedad relativa correspondiente al mes de enero, con la resolución de 1km. por 1 km. para todo Chile, con los respectivos pixeles.

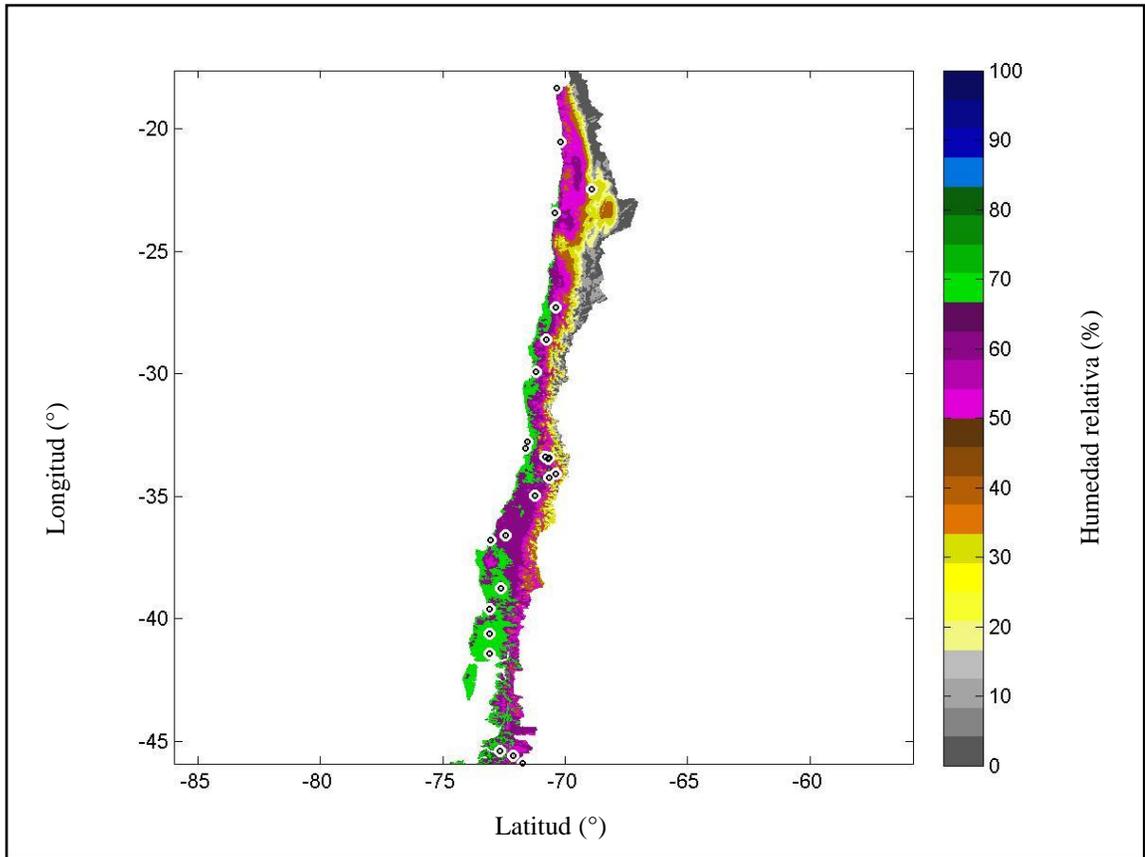


Figura 8.4: Mapa de humedad relativa media de enero con la resolución del “modelo empírico de altura”

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

En el caso de la visibilidad, es importante destacar que no se cuenta con información confiable para la elaboración de mapas que cumplan con los estándares internacionales, por lo que se tomarán los pocos datos existentes, para obtener un promedio ponderado para toda la extensión del territorio chileno a nivel del mar, para luego efectuar una corrección por altura incluida dentro del modelo Brasil-SR. Sin embargo, este aspecto debe ser considerado para trabajos futuros y comenzar lo antes posible con mediciones que cuenten con una correcta distribución espacial y temporal a lo largo y ancho de todo Chile.

Para el caso del Albedo, la literatura indica que no existen diferencias significativas entre los modelos existentes para su cálculo, tal como podemos observar en los trabajos

de Tasumi, Allen y Trezza (2008) y el de Mendoca, et. al. (2007), por lo que para este estudio se utilizó el modelo MODIS, obteniendo resultados en una resolución de 1 km. por 1 km.

A continuación se muestra la imagen final de albedo correspondiente al mes de enero, con la resolución de 1km. por 1 km. para todo Chile, con los respectivos pixeles.

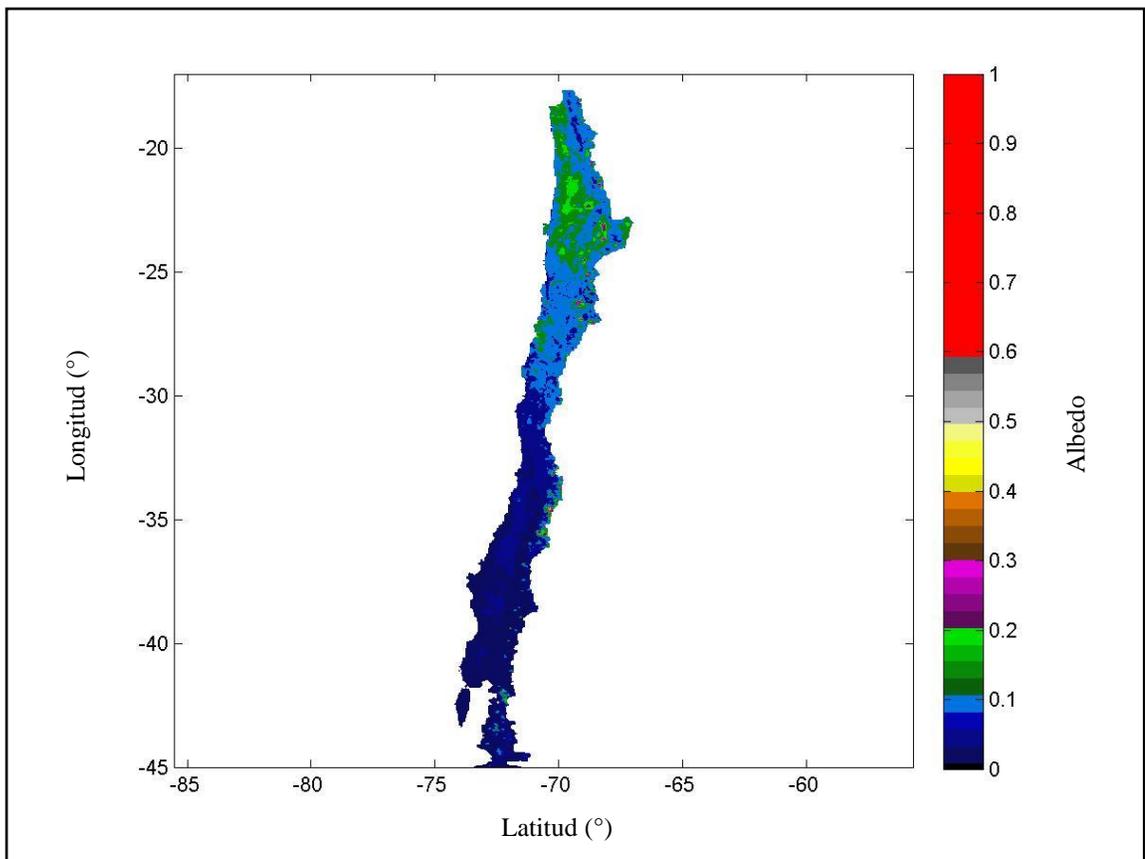


Figura 8.5: Mapa de albedo con la resolución del “modelo combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

Finalmente, a modo de resumen, dados los argumentos presentados a lo largo de este trabajo, los métodos aconsejados a utilizar para los distintos parámetros climatológicos quedan resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 8.3: Resumen de los métodos sugeridos  
 Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC y la NASA

Temperatura	Modelo combinado
Humedad relativa	Modelo empírico de corrección por altura
Albedo	Procedimiento MODIS

A modo de validar los resultados obtenidos, es que analizaremos puntos característicos del territorio chileno para las zonas Norte, Centro y Sur, comparando los mapas de temperatura, humedad relativa, albedo, tipos de atmósferas y climas mencionados en este trabajo para localidades específicas dentro de Chile.

En la zona Norte, podemos identificar las variaciones de albedo para la presencia de la Cordillera de la Costa, así como también las pequeñas aglomeraciones de sal que existen en el territorio chileno en las cercanías del gran salar de Uyuni, ubicado en el territorio boliviano. Estas características se pueden apreciar en las siguientes imágenes.

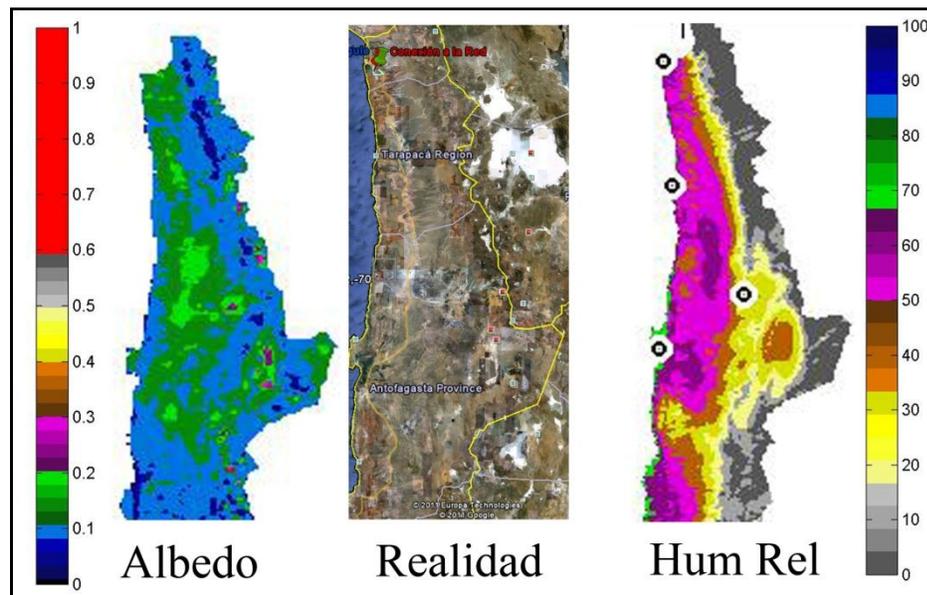


Figura 8.6: Comparación de mapas obtenidos para el mes de enero para análisis  
 Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la NASA, “Google Earth” y DMC

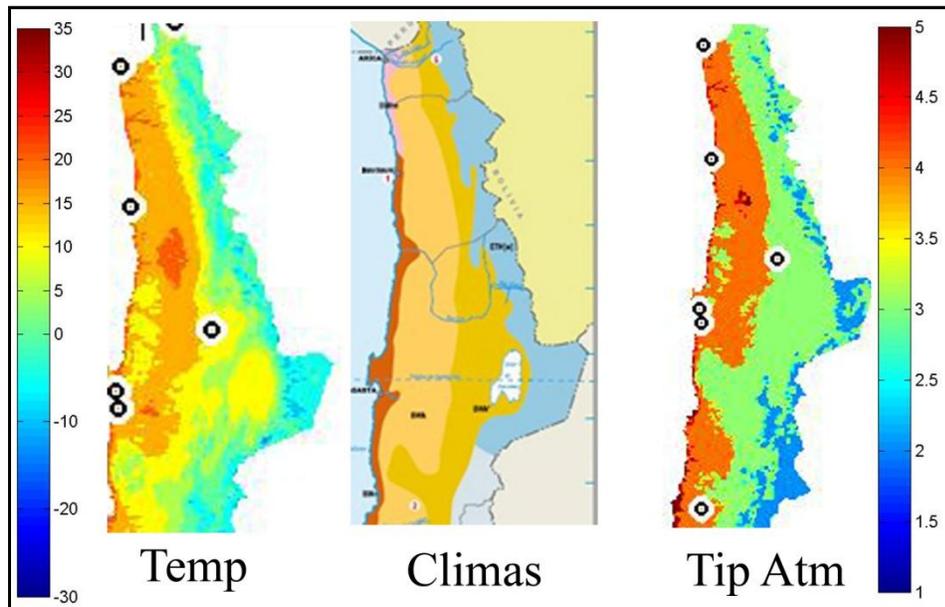


Figura 8.7: Comparación de mapas obtenidos para el mes de enero para análisis  
 Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC y INE

Observando con detención; las imágenes entregadas para la zona Norte de Chile, podemos notar que se cumplen los supuestos de disminución de temperaturas y humedades relativas con la altura, mientras que los tipos de atmósfera presentan una gran similitud con los climas chilenos entregados por la INE.

Recurriendo a la clasificación de los climas de Chile, nos encontramos que en las distintas tonalidades de color celeste tenemos Tundra por efecto de la altura, ya sea con precipitación estival, escasa o nula precipitaciones. En un color amarillo encontramos un clima desértico frío. En un color piel encontramos un clima desértico normal y finalmente en un color naranja oscuro tenemos un clima desértico con nublados abundantes.

Todo lo anterior va completamente de la mano con los mapas obtenidos, salvo por el efecto de precipitaciones a contra estación en lugares en los que no se cuenta con mediciones, sin embargo no es de alta relevancia por cuanto nos es muy factible el aprovechamiento de esas zonas en el potencial solar en el corto plazo, dada la

desfavorable geografía de esas ubicaciones específicas, así como también la lejanía de los centros de consumo o líneas eléctricas de distribución.

Para la zona Centro de Chile nos encontramos con cuatro climas principales adicionales a los descritos anteriormente, comenzando desde Oeste hacia Este son: clima templado cálido con lluvias invernales, que pueden estar presentes con gran nubosidad o con gran humedad atmosférica. A continuación nos encontramos con un clima templado cálido con lluvias invernales que abarca desde Santiago hasta Concepción. Luego en la zona precordillerana nos encontramos con un clima templado frío con lluvias invernales. Finalizando en el límite con Argentina con un clima de tundra por efecto de la altura.

Todas estas características pueden ser apreciadas en las siguientes figuras:

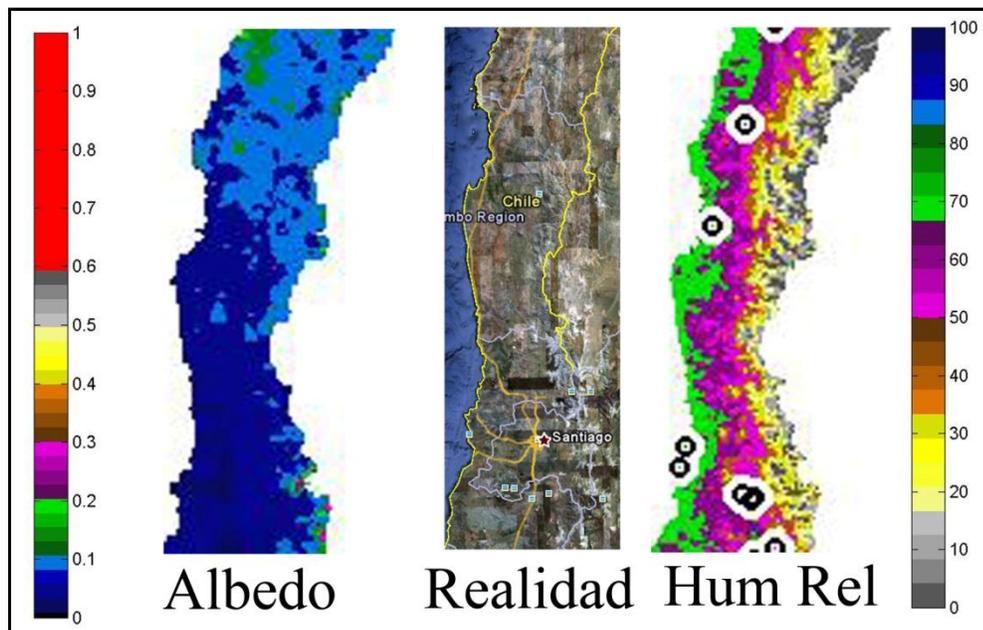


Figura 8.8: Comparación de mapas obtenidos para el mes de enero para análisis  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la NASA, “Google Earth” y DMC

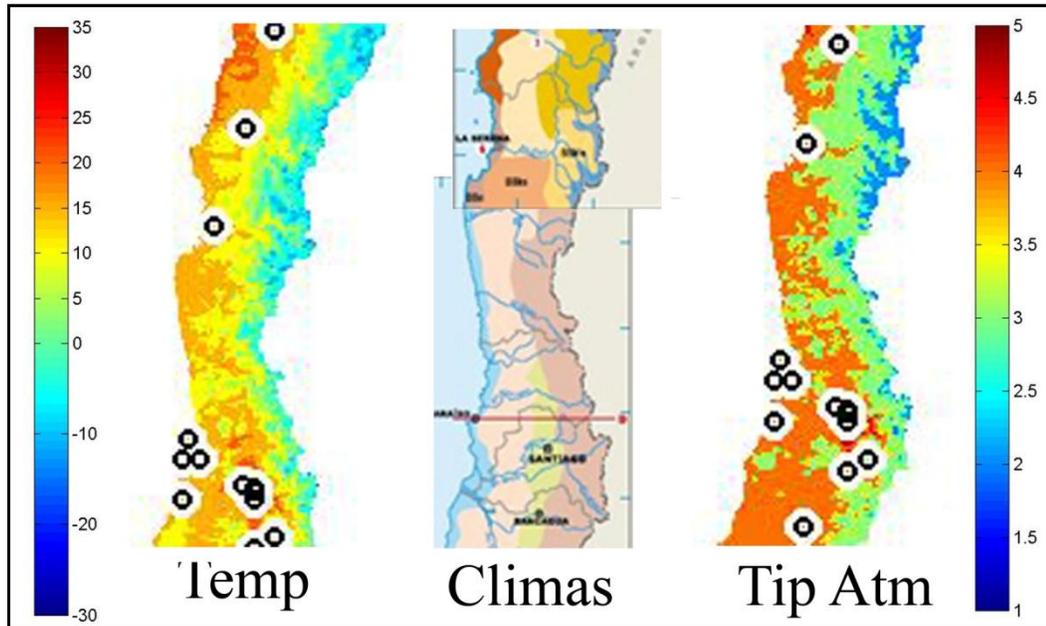


Figura 8.9: Comparación de mapas obtenidos para análisis  
 Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC y INE

Para finalizar, en la zona Sur de Chile nos encontramos con climas templados cálidos lluviosos con influencia mediterránea en el sector costero, mientras que nos adentramos en el continente encontramos un clima Templado frío lluvioso con influencia mediterránea, finalizando con un clima de tundra por efecto de la altura en las zonas cordilleranas, todo lo que puede ser apreciado en las siguientes imágenes.

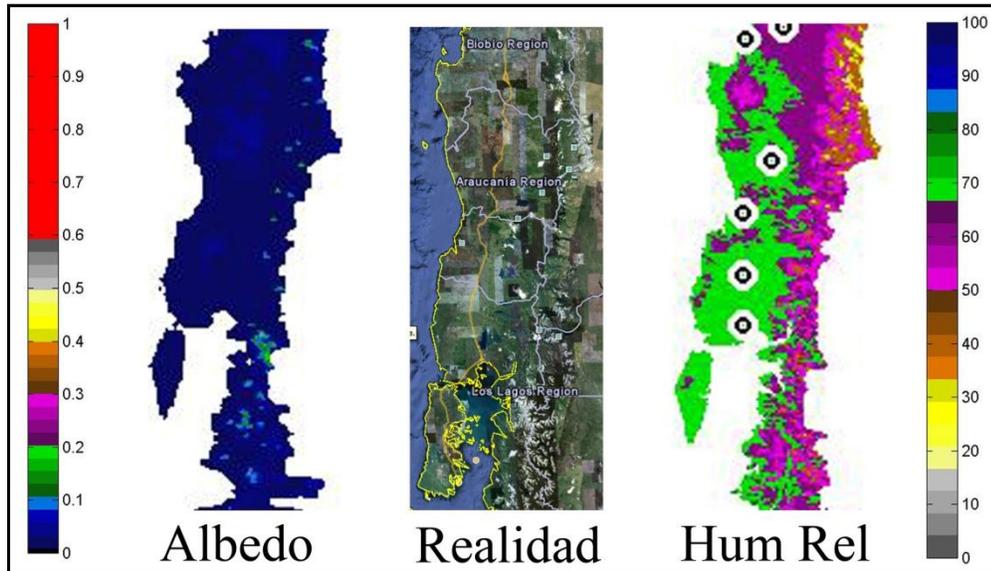


Figura 8.10: Comparación de mapas obtenidos para análisis  
 Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la NASA, “Google Earth” y DMC

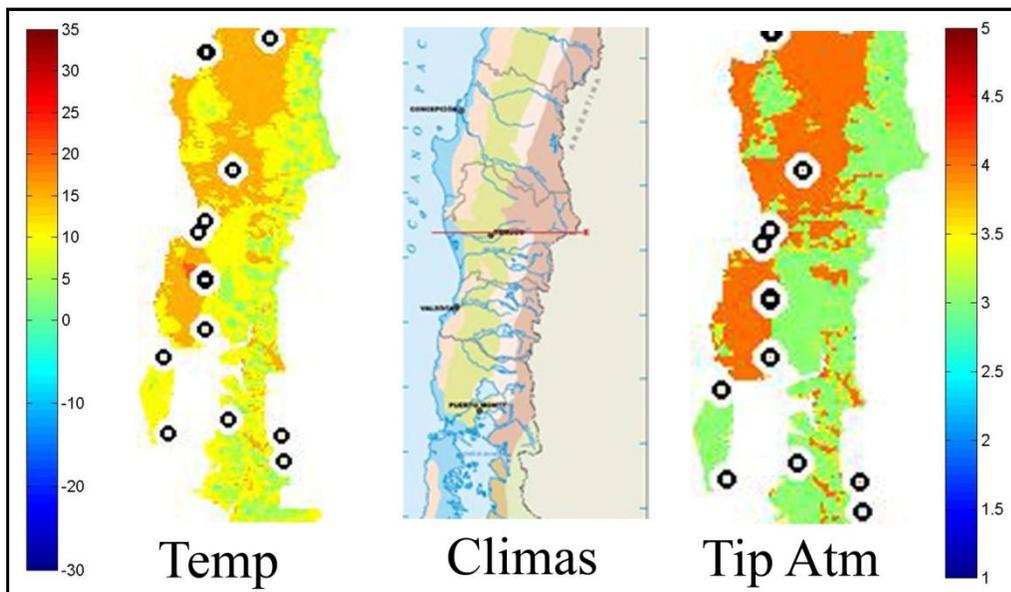


Figura 8.11: Comparación de mapas obtenidos para análisis  
 Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC y INE

## 9. CONCLUSIONES

La realidad mundial indica que la energía proveniente de fuentes fósiles evidentemente se va a agotar, ya que es un recurso no renovable que se consume a una tasa cada vez más alta. Esto hace vislumbrar que su precio continuará en aumento, hasta sobrepasar el de las ERNC, las que cada día se tornan más atractivas y rentables, tanto por sus avances tecnológicos, como por la creciente demanda de energía en todas las escalas.

Enmarcado en este contexto, este trabajo presenta un gran avance para el desarrollo energético de Chile, ya que entrega los conocimientos necesarios para continuar el desarrollo del modelo Chile-SR y permitir así dar un gran paso en la implementación de los distintos tipos de tecnologías existentes para el aprovechamiento integral de la energía solar en todas sus formas.

En primer lugar, es de vital importancia notar que la distribución, tanto espacial, ya sea analizándola referida a la latitud, longitud, altura o como una combinación de ellas, no es la más adecuada para este tipo de estudios, ya que para el caso de la temperatura y la humedad relativa, se cuenta solamente con 50 y 30 localidades respectivamente para todo el territorio continental chileno, lo que es muy bajo si se piensa que Chile tiene una superficie cercana a los 750.000 km.<sup>2</sup>. Es decir, cada estación debería representar 15.000 y 25.000 km.<sup>2</sup> para los casos de temperatura y humedad relativa, respectivamente. Si a ese factor además se le agrega el hecho que las estaciones no se encuentran bien distribuidas, tal como se explicó anteriormente, cada estación debería representar incluso una mayor área, lo que es absolutamente imposible dada la geografía que se presenta a lo largo de todo el territorio chileno.

Dentro de los alcances de este trabajo fue posible determinar las características de temperatura, humedad relativa y albedo real de superficie en una resolución de 1 km. por 1 km.<sup>15</sup> para todo el territorio de Chile, los que procederemos a explicar con más detalle de manera individualizada.

---

<sup>15</sup> Las diferencias de resolución espacial entre los datos originales y los resultados finales fue resuelta mediante interpolaciones bilineales entre datos conocidos calculados.

Para el caso de la temperatura, se consiguió realizar una interpolación de este factor para todo el territorio chileno a nivel del mar, para luego aplicar una corrección por altura para cada uno de los pixeles de 1km. por 1km. en los que se subdividió Chile continental, obteniendo así resultados de gran resolución y calidad, con lo que ellos pueden ser utilizados en la implementación del modelo Chile-SR.

Con la humedad relativa se logró implementar un modelo empírico corregido por altura para todo el territorio chileno, el que al igual que en el caso de la temperatura se obtuvo con una resolución espacial de 1km. por 1km., cumpliéndose así a cabalidad los requerimientos para su implementación en el modelo Chile-SR.

Para el caso de la visibilidad, dado que no existen mediciones de confianza científica que permitan elaborar este tipo de mapas, ya que en la actualidad sólo existe un instrumento de medición de esta propiedad y se ubica en el Aeropuerto Internacional de Santiago Arturo Merino Benítez, pero con sólo ese dato no es posible realizar una interpolación para toda la extensión del territorio en estudio y además necesita de trabajo, ya que trabaja con otro propósito, que es el de simular la visibilidad de los pilotos desde la cabina y no la de un observador en suelo. Adicionalmente, existen registros muy limitados y obtenidos mediante mediciones visuales humanas, las que no estuvieron disponibles para este estudio, por lo que se recomienda comenzar la recopilación de este tipo de información para un trabajo futuro. Sin embargo, dado el bajo impacto que este parámetro representa para el desarrollo inicial del modelo Chile-SR, se implementará un promedio ponderado para todo el territorio chileno a partir de las mediciones humanas existentes, el que será corregido por altura mediante un procedimiento que se encuentra incorporado en el modelo Brasil-SR, pero hay que tener sumo cuidado al realizar interpolaciones de este parámetro, ya que la visibilidad es muy localizada y no se ha validado debidamente el uso de interpolaciones para ella. Estos resultados serán interpolados en una resolución espacial de 1km. por 1km. para poder ser implementados en el modelo Chile-SR y obtener así los resultados preliminares de esta primera versión.

En el caso del albedo real de superficie, se implementó el modelo MODIS desarrollado por la agencia espacial de Estados Unidos NASA, específicamente para el territorio de Chile continental, lo que permitió obtener resultados dentro de los rangos normales de este parámetro (con un promedio cercano a 25%), en una resolución espacial de 1km. por 1km., lo que permitirá utilizarlo en también en la puesta en marcha del modelo de estimación de radiación solar incidente para el territorio chileno, Chile-SR.

Es importante tener en consideración que si bien los resultados obtenidos se ajustan cuantitativamente y cualitativamente a los comportamientos esperados en Chile, es necesario saber que la validación científica final de ellos no podrá llevarse a cabo sino a través del tiempo, ya que la escasez de datos no permite realizar procedimientos de validación de las interpolaciones realizadas como la exclusión de puntos de medición para comparar resultados, ya que el peso significativo de cada medición es demasiado alto en el procedimiento.

La validación científica de estos resultados se obtendrá una vez completada la calibración del modelo Chile-SR, es decir, cuando sus estimaciones alcancen los rangos de error aceptados para este tipo de modelos o se instale un mayor número de estaciones de medición en el territorio chileno, que permita ir comparando los resultados de este modelo con las mediciones de las nuevas estaciones.

Cabe resaltar que si bien los datos numéricos obtenidos en este estudio pueden presentar modificaciones a medida que se desarrollan mejoras tanto en las estaciones de medición existentes<sup>16</sup>, como en la instalación de nuevas instalaciones que consideren las distribuciones espaciales y temporales ideales, los procedimientos desarrollados en este trabajo presentan el mayor de los avances en este aspecto, pudiendo ser realizados nuevamente paso a paso una vez que las condiciones antes citadas sean mejoradas.

Con los resultados obtenidos en este trabajo no sólo se pueden utilizar los parámetros de entrada del modelo Chile-SR para estimar la radiación solar incidente en el territorio chileno, sino que además se puede seleccionar localidades con potencial para el

---

<sup>16</sup> Algunas estaciones de medición no cuentan con todos los tipos de mediciones necesarias para este estudio.

desarrollo de distintas actividades económicas en el país, como por ejemplo determinar a partir de los mapas de temperatura y humedad relativa mensuales, qué ubicaciones pueden ser más atractivas para el desarrollo agrícola en los distintos tipos de cultivos, permitiendo ahorros significativos en toda la búsqueda o prospección de lugares sin ningún tipo de conocimientos previos.

Todo lo anterior además permite a las autoridades conocer los distintos tipos de potenciales de cada uno de sus suelos, con una mejor resolución pudiendo aplicar estos conocimientos al valor real de cada uno de esos terrenos al momento de su venta<sup>17</sup>.

### **9.1. RECOMENDACIONES FUTURAS**

A lo largo de todo este estudio, se han destacado varios puntos que deben ser mejorados en futuro para poder obtener mejores resultados. Sin embargo, resumiéndolos en esta sección encontramos los siguientes aspectos.

En primer lugar, es importante para el modelo Chile-SR establecer estaciones de medición de visibilidad en toda la extensión del territorio chileno, tomando en consideración las distribuciones espaciales y temporales de ellas desde un comienzo.

En segundo lugar, sería de gran utilidad para el modelo Chile-SR la implementación de nuevas estaciones de medición, tanto de temperatura como de humedad relativa, incluyendo los factores de distribución espacial y temporal desde su planificación, aún cuando haya que postergar las estaciones de ciudades de mayor tamaño, pero que poseen mediciones más cercanas, priorizando aquellas localidades con un mayor potencial explotable.

En tercer lugar puede ser de gran utilidad implementar estaciones en los microclimas que no se encuentran representados por alguna estación en la actualidad.

Sería muy interesante también realizar estudios de comportamiento asociados a la altura en las distintas localidades, tal como el trabajo realizado por Cavieres y Arroyo (1999), ya que tal como se comentó en este estudio, la altura juega un rol fundamental en la

---

<sup>17</sup> Hay muchos terrenos en el norte de Chile que se venden a precios cercanos a los \$12 el m<sup>2</sup>, que con penalizaciones por falta de condiciones como acceso a agua y descenden su precio hasta valores cercanos los \$5 el m<sup>2</sup>, pero se podría aplicar bonificaciones por potencial solar para contrarrestar las penalizaciones.

definición de los climas en Chile, para ver si se logra una mejor descripción de los puntos con valores extremos, que si bien son pocos, pueden presentar un error puntual mejorable en el futuro.

Para el caso del albedo de superficie puede ser muy interesante implementar metodologías propuestas para otros modelos satelitales como el Landsat e implementar los cálculos con mayor cantidad de datos y considerando una variación de ángulos para obtener resultados más precisos y no sólo trabajar en el ángulo solar del zénit, como se recomienda en la NASA como una buena primera aproximación.

Finalmente, es muy importante destacar que el desarrollo del atlas de radiación solar en Chile está pensado para tener actualizaciones cada cinco años, ya que no se presenta una gran variación año a año y este es el período que sus encargados han propuesto para que sus resultados continúen siendo válidos en el tiempo y entreguen un real aporte para el desarrollo de este tipo de energía en Chile.

## BIBLIOGRAFÍA

Beyer, H. G; Pereira, E. B.; Martins, F. R; Abreu, S. L.; Colle, S; Perez, R.; Schillings, C; Mannstein, H; Meyer, R. (2004). *Assessing satellite derived irradiance information for South America within the UNEP resource assessment project SWERA. Proceedings of the 5th Ises Europe Solar Conference, held in Freiburg, Germany.*

Cavieres, L.A; Arroyo M.T.K. (1999) Tasa de enfriamiento adiabático del aire en el Valle del Río Molina, Provincia de Santiago, Chile Central (33°S). *Revista Geográfica Terra Australis* 44: 79-86 [www.ieb-chile.cl/focus/people\\_focus1/MaryKalin.php](http://www.ieb-chile.cl/focus/people_focus1/MaryKalin.php)

Comisión Nacional de Energía (CNE). (2008). *Anuario Energético 2008*. Obtenido en agosto 2010, de [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

Dodson, R., Marks, D. (1997). *Daily air temperature interpolated at high resolution over large mountainous region.*

Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes. Third Edition. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin-Madison.*

Falvey, M. y Garreaud, R. (2009). *Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the SE Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006)*. *J. Geophys. Res.*, 114,D04102, doi:10.1029/2008JD010519. <http://www.dgf.uchile.cl/rene/PUBS/ttrend.pdf>

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report, Summary for policymakers. Valencia, Spain: IPCC.*

Instituto Nacional de Estadísticas (INE), (2010). *Informe Anual de Medio Ambiente 2008*

Lewis P., Barnsley M.J. (1994). *Influence of the Sky Radiance Distribution on Various Formulations of the Earth Surface Albedo. Remote Sensing Unit, Department of Geography, University College London.*

Mendoca J. C., Fernandez de Souza E., Morais de Freitas R., Oliveira Lopes P. M., Bouhid André R. G., Barbosa Silva B. (2007). *Avalicao de metodologías de estimativas do albedo da superficie terrestre a partir de imagens MODIS.*

Muneer, T.(1997). *Solar Radiation and Daylight Models.*

Ortega, A., Escobar, R. and Colle, S. (2008). *Solar Energy Resource Assesment for Chile. Paper presented at the 2nd ASME Energy Sustainability Conference, ES2008-54130, Jacksonville, Florida, USA.*

Perez, R., Seals, R., Zelenka, A. (1997) *Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data*. *Solar Energy*, 60 (2): 89-96.

Pitz-Paal R., Geuder Norbert, Hoyer-Klick Carsten, Schillings Christoph. (2007). *How to get bankable meteo data? DLR solar resource assessment*. In: *NREL 2007 parabolic trough technology workshop, March 8-9, 2007, Golden, Colorado*; [http://www.nrel.gov/csp/troughnet/wkshp\\_2007.html](http://www.nrel.gov/csp/troughnet/wkshp_2007.html) ; 2007 [accedido 29.12.09]

Ramos F., Bueno E., Luna S. (2005). *Influencia do processo de determinacao da cobertura de nuvens obtido a partir de imagens de satélite na precisao das estimativas de energia solar incidente na superficie*.

Real Academia de la Lengua Española (2011). <http://www.rae.es> [accedido 10.3.11]

Rees, W. G. (1990) *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge, England: Cambridge University, p. 46.

Remer L. A., Tanré D., Kaufman Y. J. (2006) *Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collection 5*. NASA Goddard Space Flight Center, code 913, Greenbelt, MD 20771, USA. Laboratoire d'Optique Atmospherique, Université de Sciences et Techniques de Lille, Villeneuve d'Ascq, France, on frequent visits to NASA/GSFC. Science Systems and Applications, Inc. c/o NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771, USA. [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod02.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf) [accedido 6.3.11]

Schaff C.B., Gao F., Strahler A.H., Lucht W., Li X., Tsang T., Strugnell N. C., Zhang X., Jin Y., Muller J., Lewis P., Barnsley M., Hobson P., Disney M., Roberts G., Dunderdale M., Doll C., d'Entremont R. P., Hu B., Linag S., Privette J. L., Roy D. (2001). *First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS*.

Sellers, P.J., Los, S.O., Tucker, C.J., Justice, C.O., Dazlich, D.A., Collatz, G.J., Randall, D.A. (1995). *A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data*. *Journal of Climate*, 9:706-737.

Tasumi M., Allen R. G., Trezza R. (2008) *At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation o Land Surface Energy Balance*.

Weast, R. C. (Ed.). *Handbook of Chemistry and Physics*, 61st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, p. E-398, 1981.

## 10. ANEXOS

La totalidad de las estaciones de temperaturas entregadas para este trabajo se detalla a continuación:

T° Medias Mensuales	Latitud	Longitud	Altura	Altura DEM	T° Medias Mensuales	Latitud	Longitud	Altura	Altura DEM
01-VISVIRI	-17,62	-69,50	4.070	4.206	26-TEMUCO	-38,75	-72,63	114	96
02-ARICA	-18,33	-70,33	58	80	27-VALDIVIA	-39,63	-73,08	19	18
03-IQUIQUE	-20,53	-70,18	52	224	28-VALDIVIA LAS MARIAS	-39,80	-73,23	10	6
04-CALAMA	-22,48	-68,90	2.270	2.331	29-JUAN KALT BODE	-40,58	-73,10	50	101
05-ANTOFAGASTA	-23,43	-70,43	135	216	30-OSORNO	-40,60	-73,07	65	108
06-U DEL NORTE	-23,68	-70,42	30	313	31-PUERTO MONTT	-41,43	-73,12	90	14
07-ISLA PASCUA	-27,15	-109,42	51		32-ANCUD PUELDE	-41,90	-73,80	116	9
08-COPIAPO	-27,30	-70,42	350	321	33-CASTRO AD	-49,48	-73,78	45	
09-VALLENAR	-28,58	-70,77	469	503	34-QUELLON	-43,17	-73,72	12	1
10-LASERENA	-29,90	-71,20	142	141	35-FUTALEUFU	-43,20	-71,82	317	1.198
11-QUINTERO	-32,78	-71,55	8	5	36-ALTO PALENA	-43,63	-71,78	281	632
12-VALPARAISO	-33,02	-71,63	41	125	37-PUERTO AYSEN	-45,40	-73,67	10	23
13-EL BELLOTO	-33,05	-71,40	121	138	38-COYHAIQUE	-45,58	-72,12	310	457
14-PUDAHUEL	-33,38	-70,78	475	451	39-BALMACEDA	-45,90	-71,72	520	530
15-QUINTA NORMAL	-33,43	-70,68	520	514	40-CHILE CHICO	-46,53	-71,68	327	
16-CERRILLOS	-33,48	-70,68	519	513	41-COCHRANE	-47,23	-72,55	182	
17-EL BOSQUE	-33,55	-70,68	568	576	42-PUNTA ARENAS	-53,00	-70,85	37	
18-SANTO DOMINGO	-33,60	-71,63	71	147	43-INSTITUTO DE LA PATAGONIA	-53,13	-70,88	3	
19-JUAN FERNANDEZ	-33,67	-78,95	30	1	44-MONSEÑOR FAGNANO	-53,15	-70,90	32	
20-SEWELL	-34,08	-70,40	2.155	2.150	45-PUERTO WILLIAMS	-54,93	-67,63	36	
21-PARRON	-34,27	-70,67	692	715	46-DIEGO RAMIREZ	-56,50	-68,77	42	
22-CURICO	-34,97	-71,23	228	211	47-BASE FREI	-62,42	-58,88	10	
23-CHILLAN	-36,57	-72,03	124	155	48-BASE PRAT	-62,50	-59,68	5	
24-CONCEPCION	-36,77	-73,05	12	12	49-BASE OHIGGINS	-63,32	-59,68	10	
25-CONCEPCION U BELLAVISTA	-36,78	-73,12	15	14	50-CHAITEN	-42,92	-72,72	3	82

Figura 10.1: Lista de estaciones de temperatura entregadas por la DMC

Fuente: DMC

Los mapas de temperatura media para el modelo combinado que no fueron entregados con anterioridad son presentados a continuación:

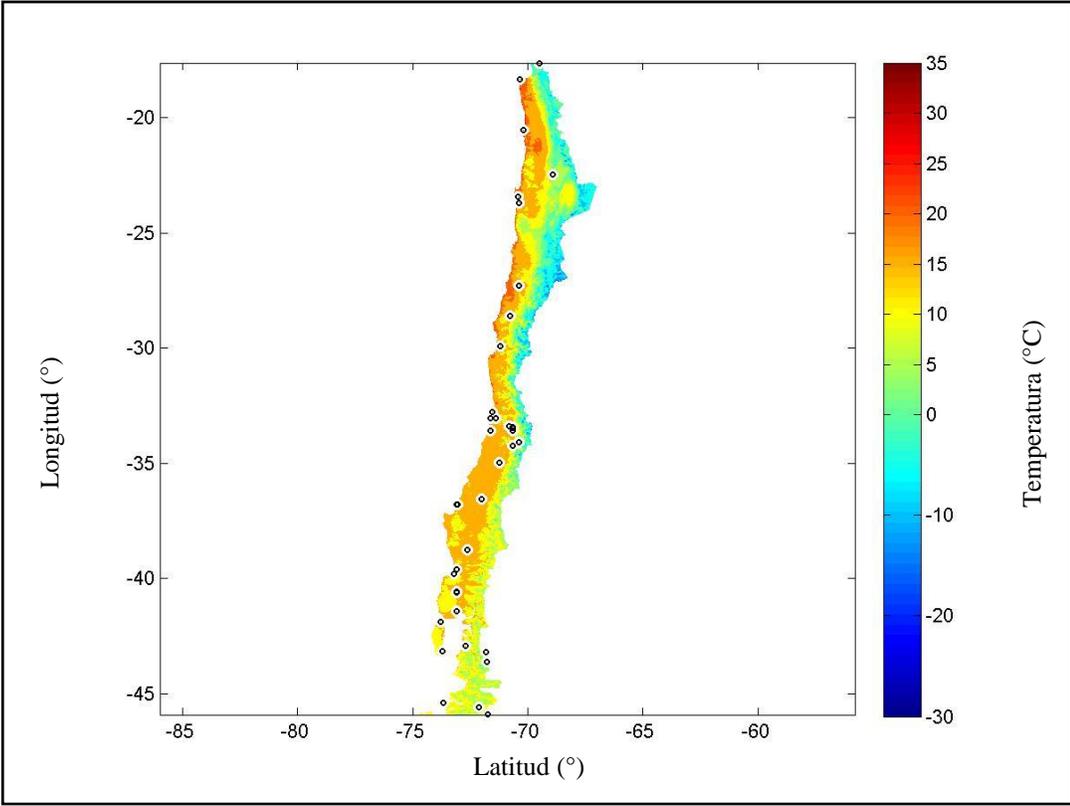


Figura 10.2: Temperaturas de febrero en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

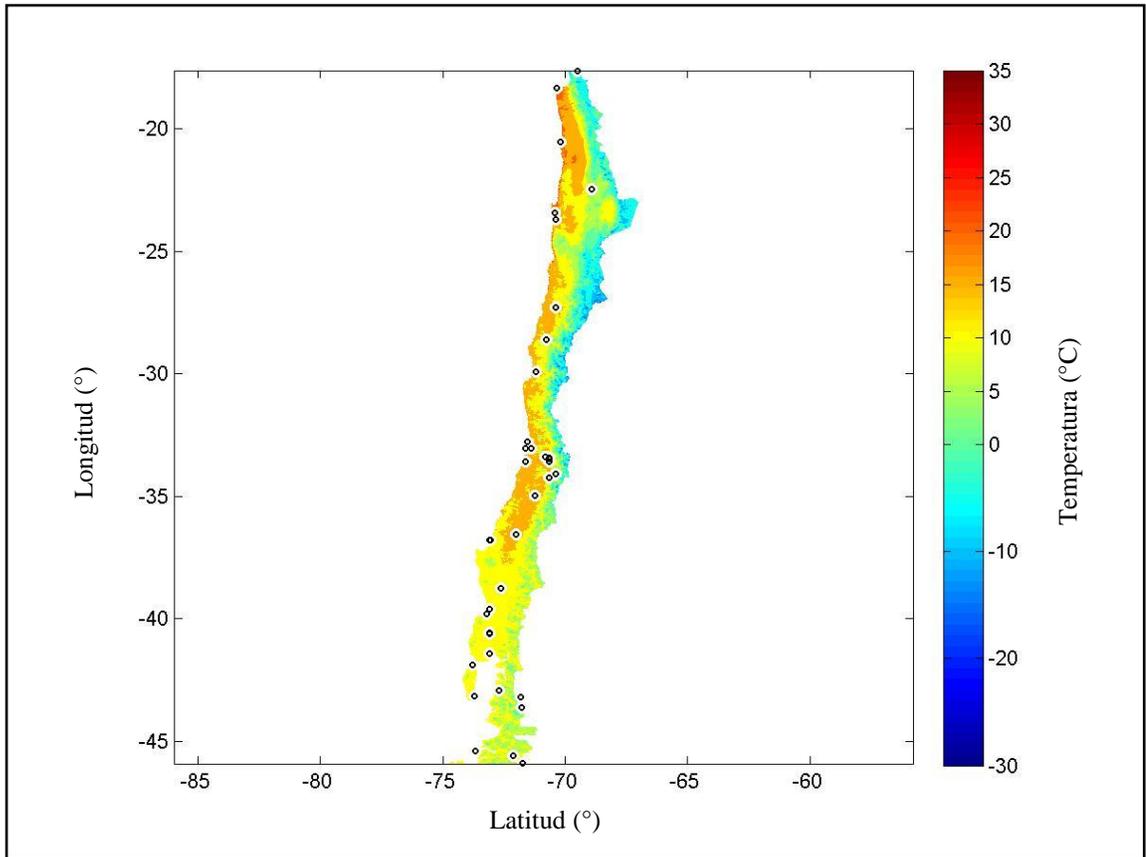


Figura 10.3: Temperaturas de marzo en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

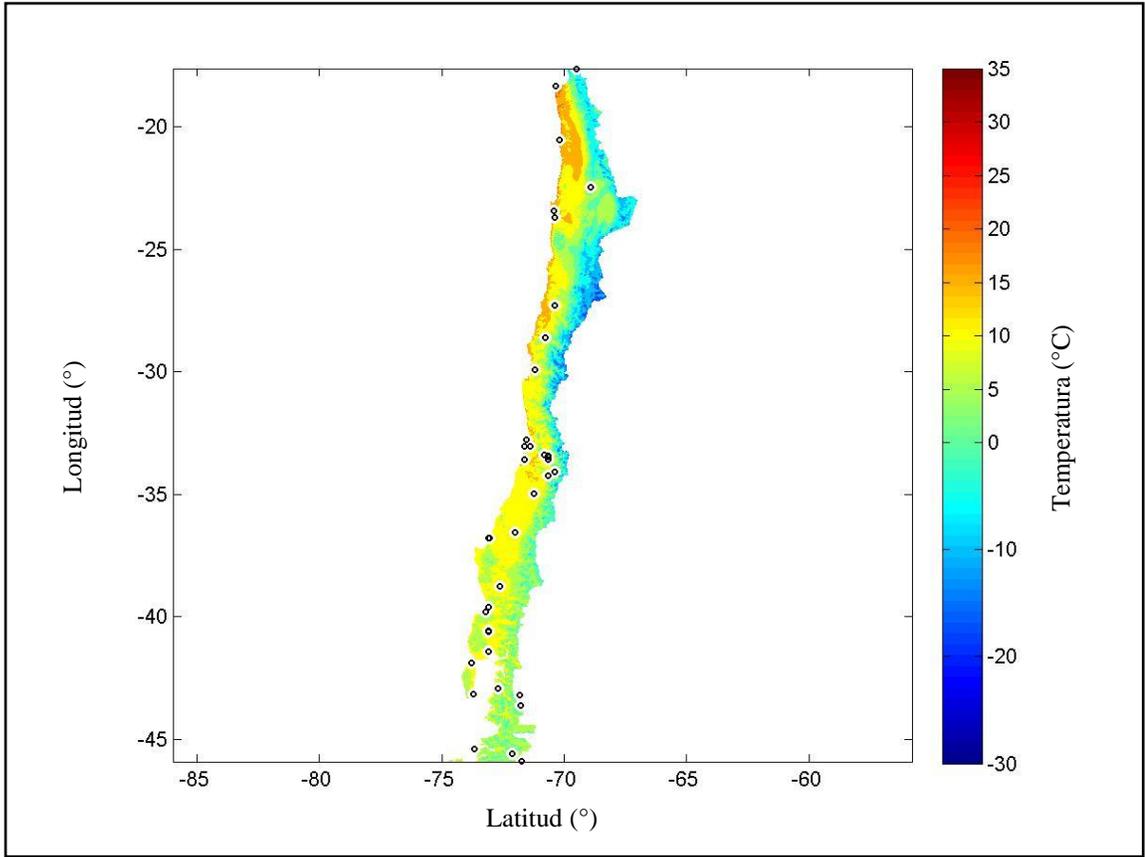


Figura 10.4: Temperaturas de abril en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

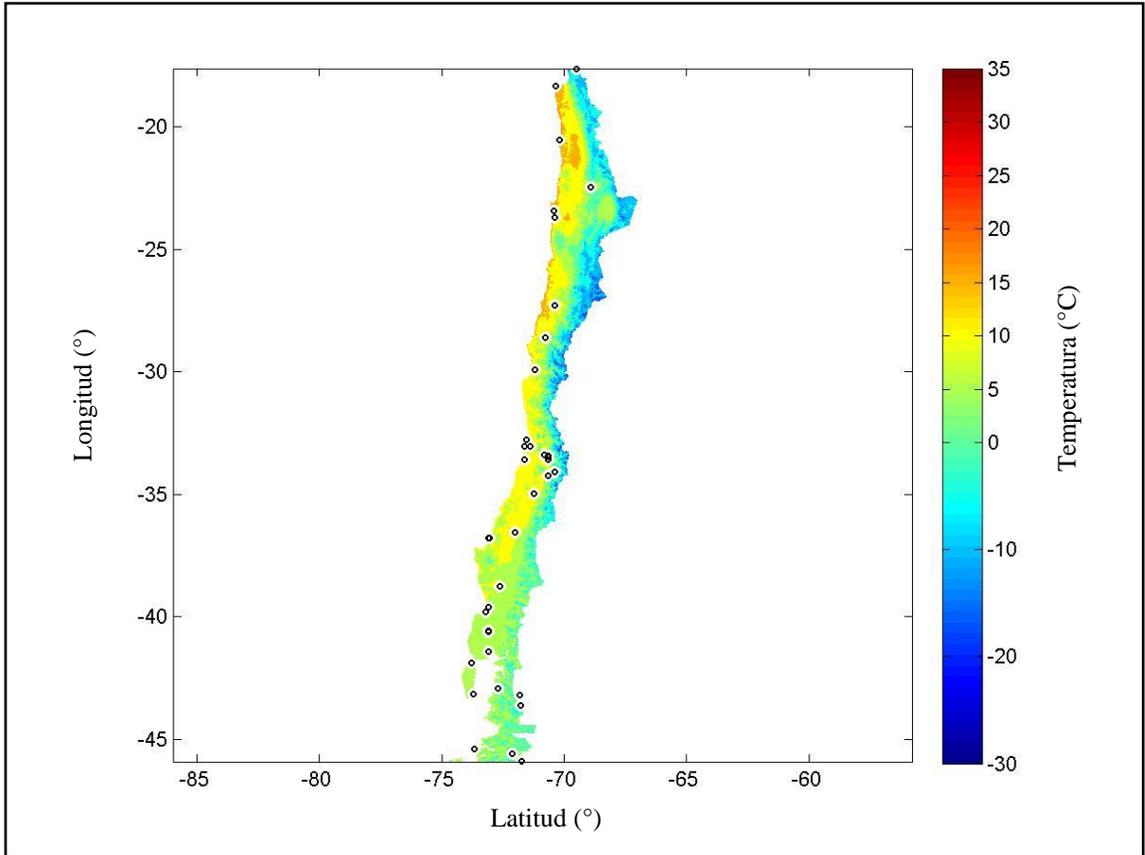


Figura 10.5: Temperaturas de mayo en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

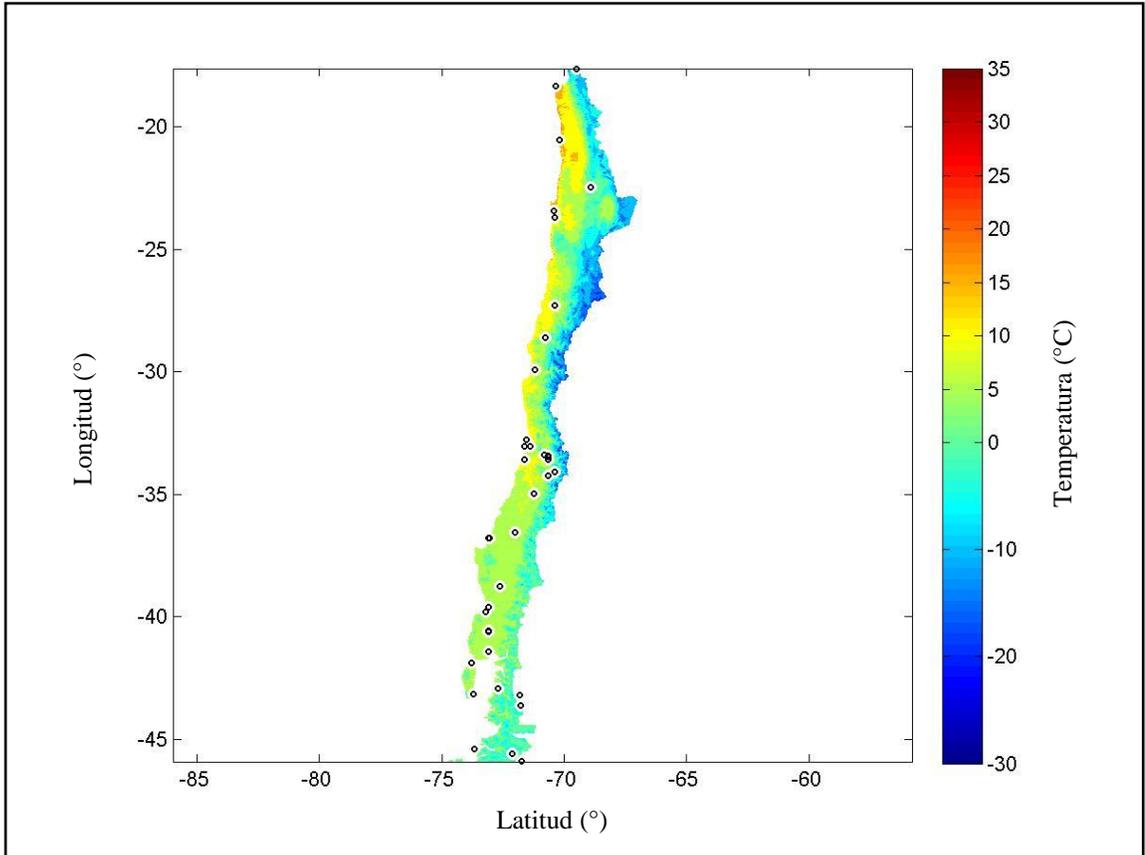


Figura 10.6: Temperaturas de junio en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

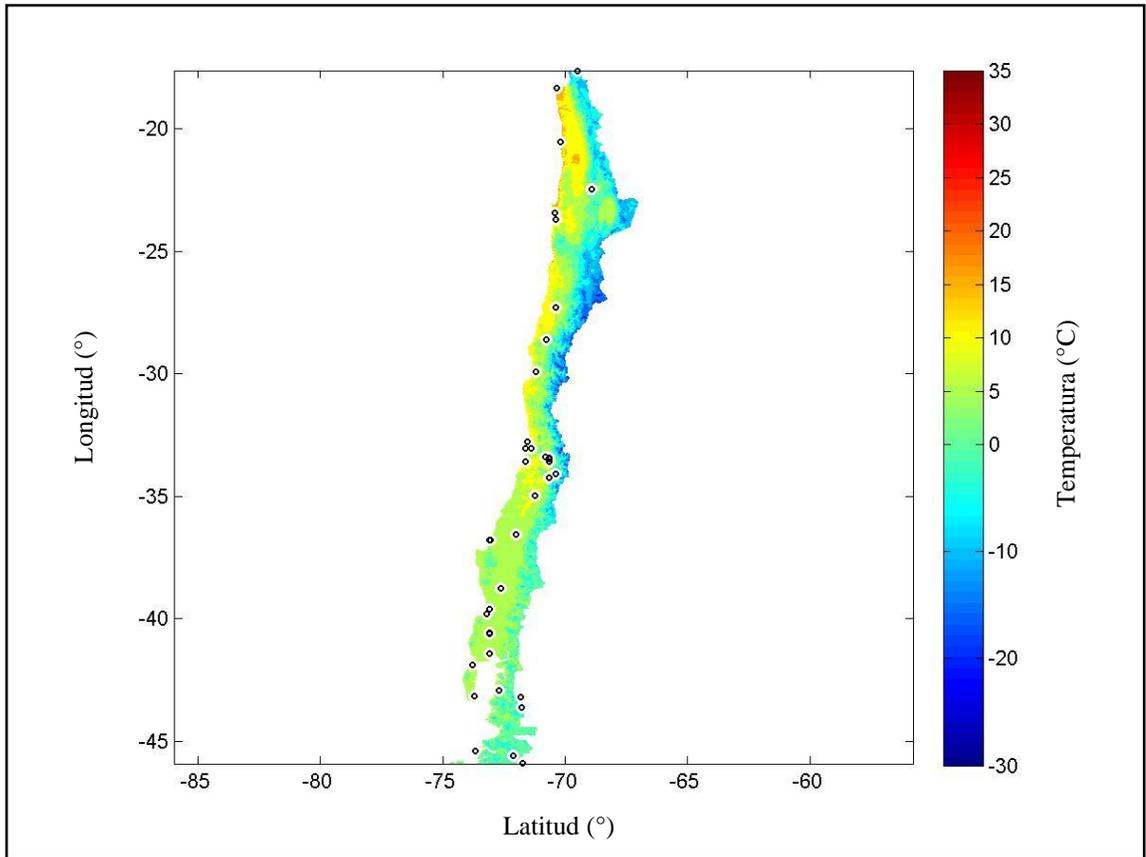


Figura 10.7: Temperaturas de agosto en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

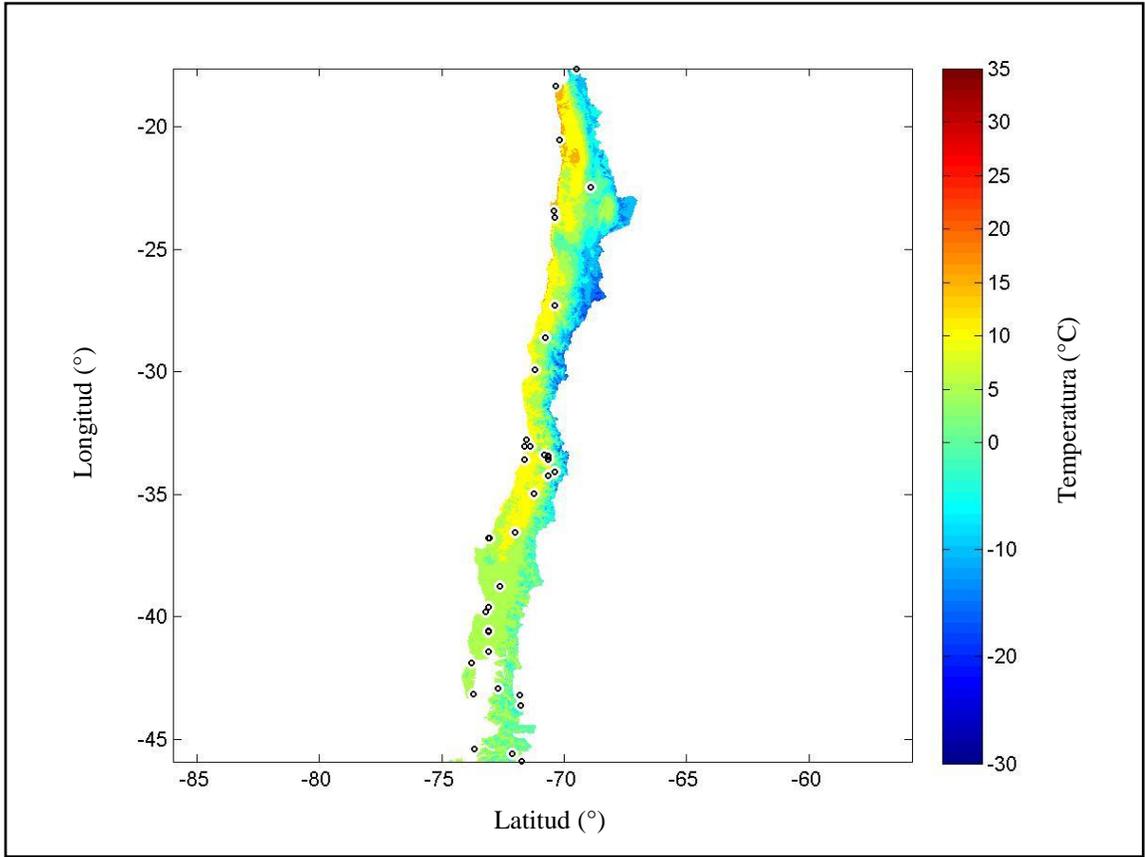


Figura 10.8: Temperaturas de septiembre en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

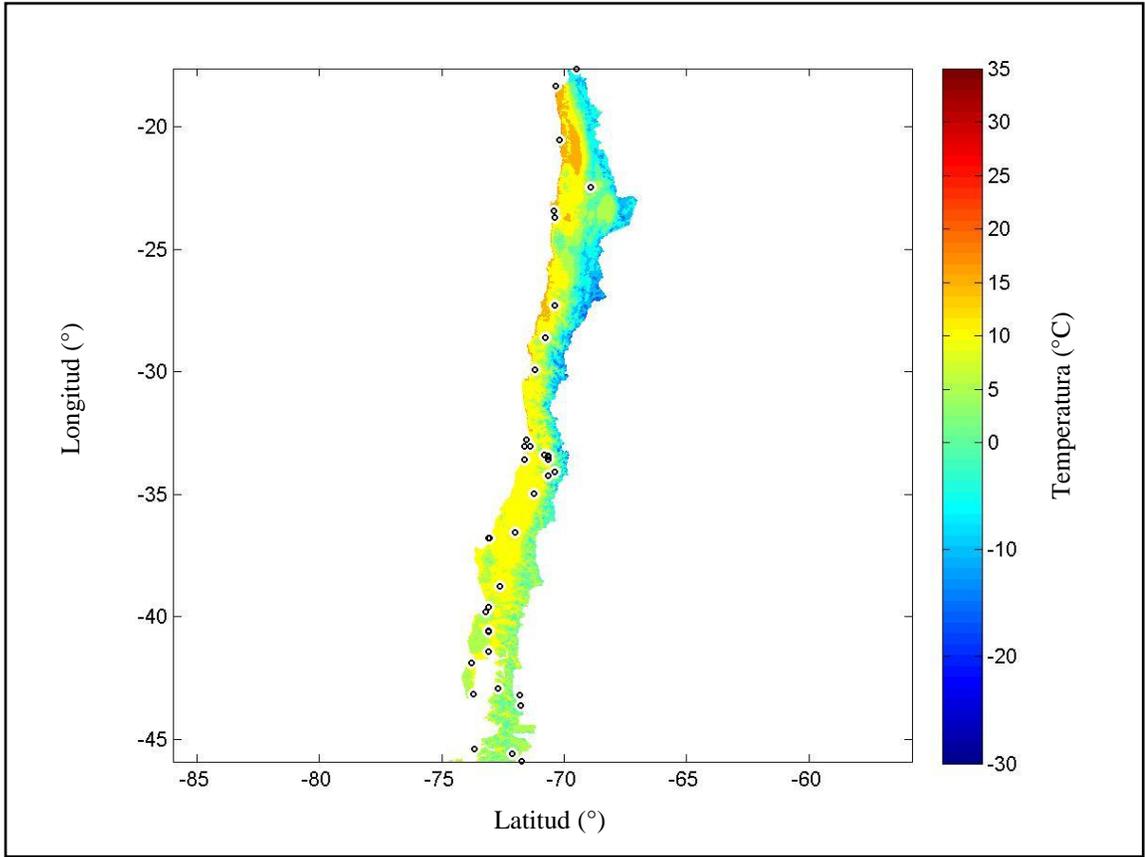


Figura 10.9: Temperaturas de octubre en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

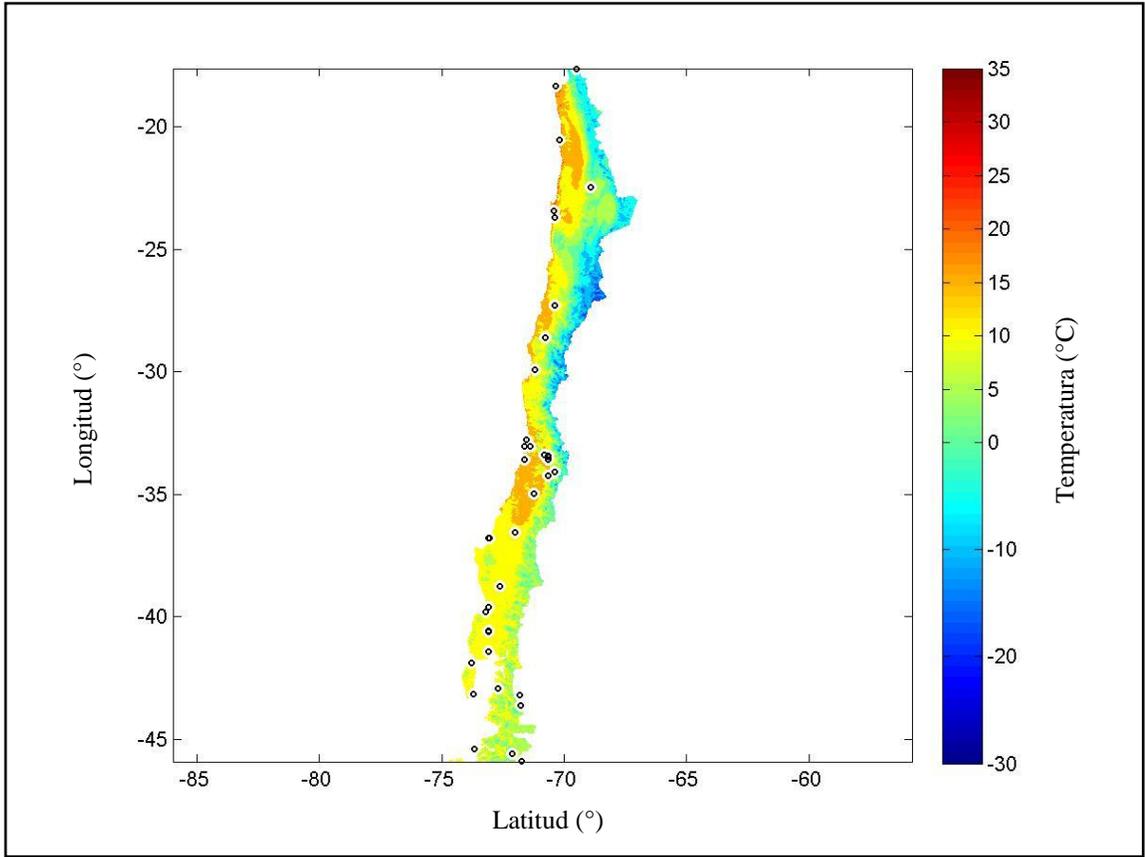


Figura 10.10: Temperaturas de noviembre en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

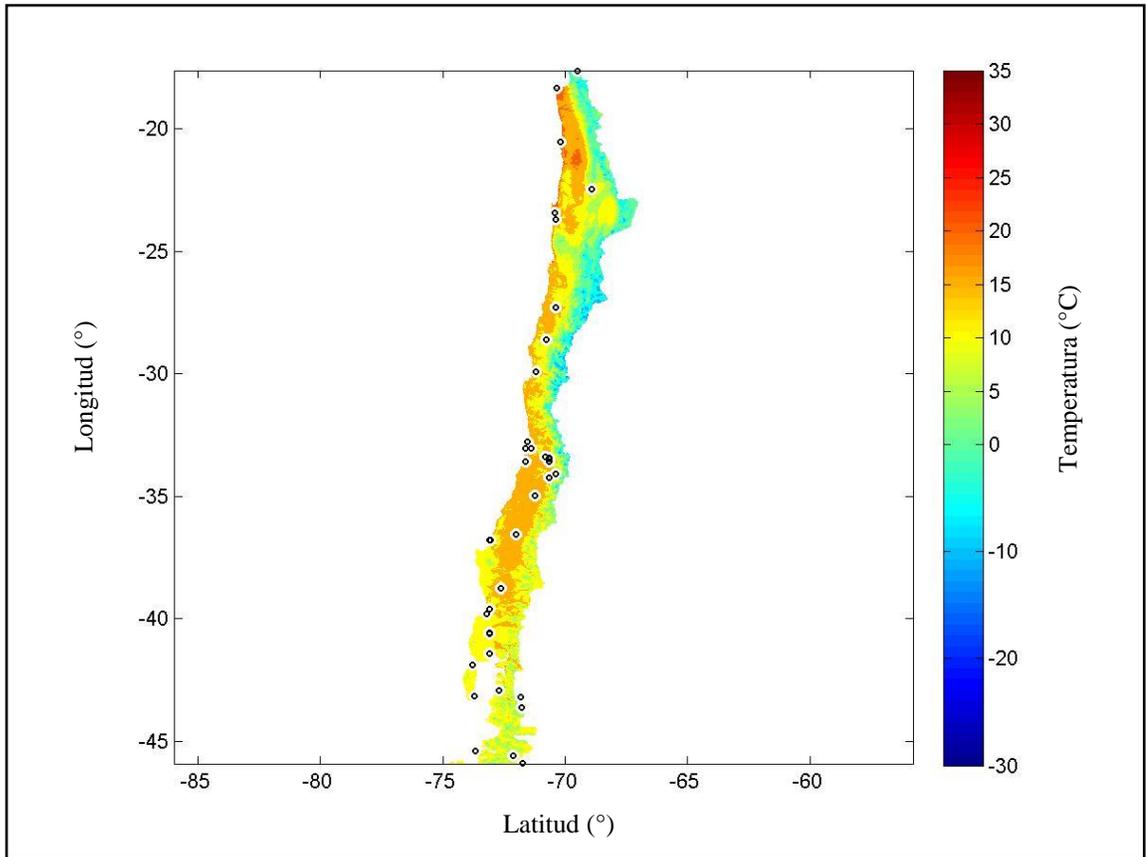


Figura 10.11: Temperaturas de diciembre en Chile utilizando el modelo “Combinado”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

A continuación se presentan los resultados del test de correlación no paramétrica de Kendall para los datos de humedad relativa entregados por la DMC:

Para la correlación entre humedad relativa y latitud se tiene:

Correlations				
			Latitud	Enero
Kendall's tau_b	Latitud	Correlation Coefficient	1,000	-,138
		Sig. (2-tailed)	.	,346
		N	24	24
	Enero	Correlation Coefficient	-,138	1,000
		Sig. (2-tailed)	,346	.
		N	24	24

Figura 10.12: Resultados correlación humedad relativa vs latitud según el Test no paramétrico de Kendall

Fuente: DMC

Para la correlación entre humedad relativa y longitud se tiene:

Correlations				
			Enero	Longitud
Kendall's tau_b	Enero	Correlation Coefficient	1,000	-,388**
		Sig. (2-tailed)	.	,008
		N	24	24
	Longitud	Correlation Coefficient	-,388**	1,000
		Sig. (2-tailed)	,008	.
		N	24	24

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Figura 10.13: Resultados correlación humedad relativa vs longitud según el Test no paramétrico de Kendall

Fuente: DMC

Para la correlación entre humedad relativa y altura se tiene:

Correlations				
			Enero	Altura
Kendall's tau_b	Enero	Correlation Coefficient	1,000	-,650**
		Sig. (2-tailed)	.	,000
		N	24	24
Altura	Altura	Correlation Coefficient	-,650**	1,000
		Sig. (2-tailed)	,000	.
		N	24	24

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Figura 10.14: Resultados correlación humedad relativa vs altura según el Test no paramétrico de Kendall  
Fuente: DMC

A continuación se presenta la totalidad de las estaciones que se entregaron por la DMC con datos de humedad relativa media:

HR Medias Mensuales	Latitud	Longitud	Altura	Altura DEM	HR Medias Mensuales	Latitud	Longitud	Altura	Altura DEM
01-ARICA	-18.333	-70.333	58	52	16-PARRON	-34.267	-70.683	692	631
02-IQUIQUE	-20.533	-70.183	52	1	17-CURICO	-34.967	-71.233	225	211
03-CALAMA	-22.467	-68.900	2,270	2,264	18-CHILLAN	-36.600	-72.433	124	177
04-ANTOFAGASTA	-23.433	-70.433	135	217	19-CONCEPCION	-36.767	-73.050	11	20
05-ISLADE PASCUA	-27.150	-109.433	47		20-TEMUCO	-38.750	-72.633	114	81
06-COPIAPO	-27.300	-70.417	291	304	21-VALDIVIA	-39.633	-73.083	19	14
07-VALLENAR	-28.583	-70.767	469	486	22-OSORNO	-40.600	-73.067	65	106
08-LA SERENA	-29.900	-71.200	142	66	23-PUERTO MONTT	-41.433	-73.117	90	15
09-QUINTERO	-32.783	-71.550	8	7	24-PUERTO AYSEN	-45.400	-72.667	10	355
10-VALPARAISO	-33.017	-71.633	41	1	25-COYHAIQUE	-45.583	-72.117	310	397
11-PUDAHUEL	-33.383	-70.783	475	451	26-BALMACEDA	45.900	-71.717	520	530
12-QUINTA NORMAL	-33.433	-70.683	520	512	27-CHILE CHICO	-46.550	-71.700	63	
13-LOS CERRILLOS	-33.483	-70.700	510	482	28-COCHRANE	-47.233	-72.550	182	
14-JUAN FERNANDEZ	-33.617	-78.817	30	2	29-PUNTA ARENAS	-53.000	-70.850	37	
15-SEWELL	-34.083	-70.400	2,155	2,790	30-DIEGO RAMIREZ	-56.500	-68.667	42	

Figura 10.15: Lista de estaciones de humedad relativa entregadas por la DMC  
Fuente: DMC

Análogamente a temperatura, a continuación se entregan los mapas de humedad relativa que no fueron comparados con anterioridad con los demás procedimientos.

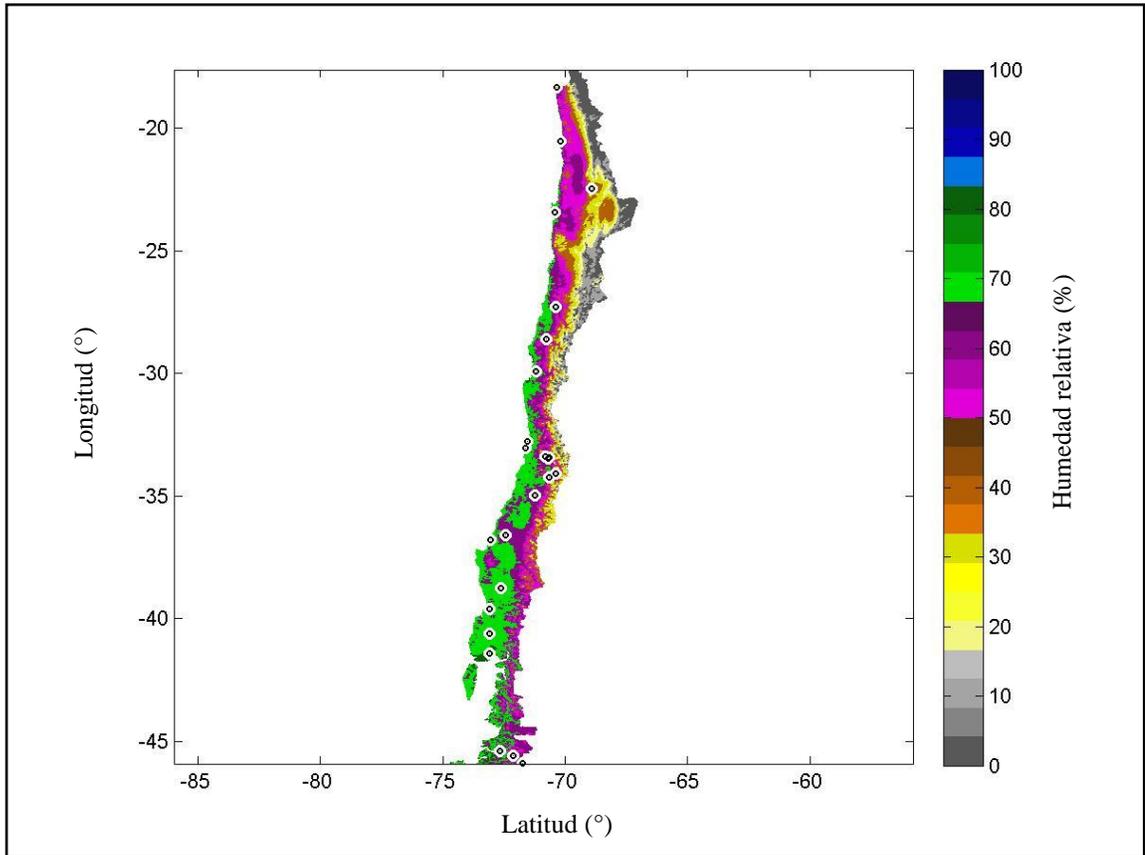


Figura 10.16: Humedad relativa para el mes de febrero con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

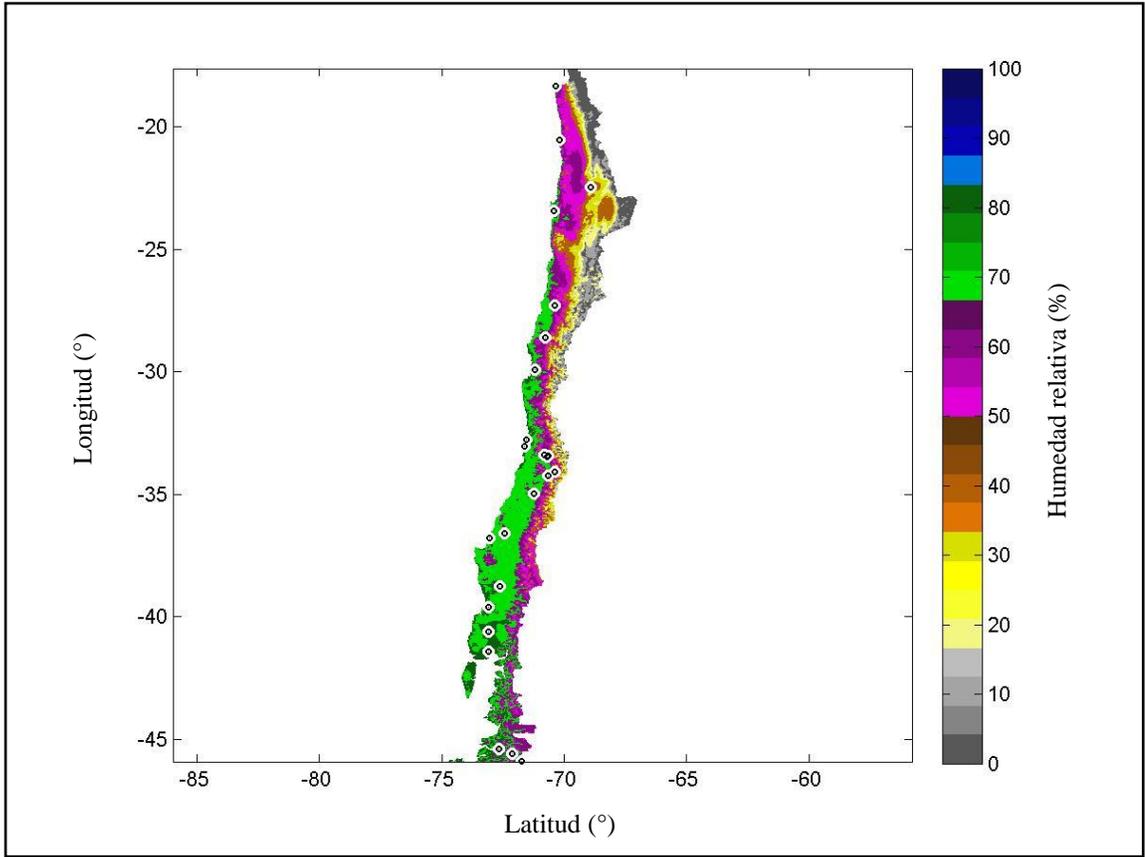


Figura 10.17: Humedad relativa para el mes de marzo con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

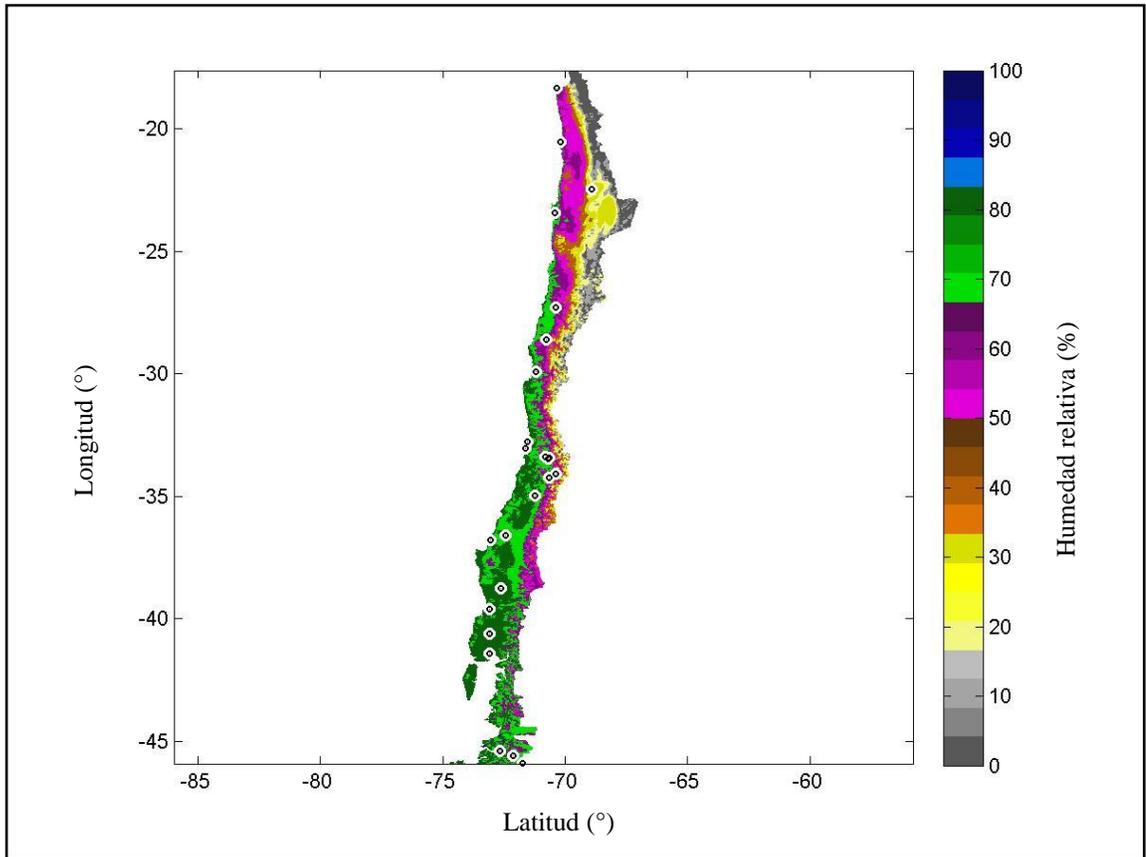


Figura 10.18: Humedad relativa para el mes de abril con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

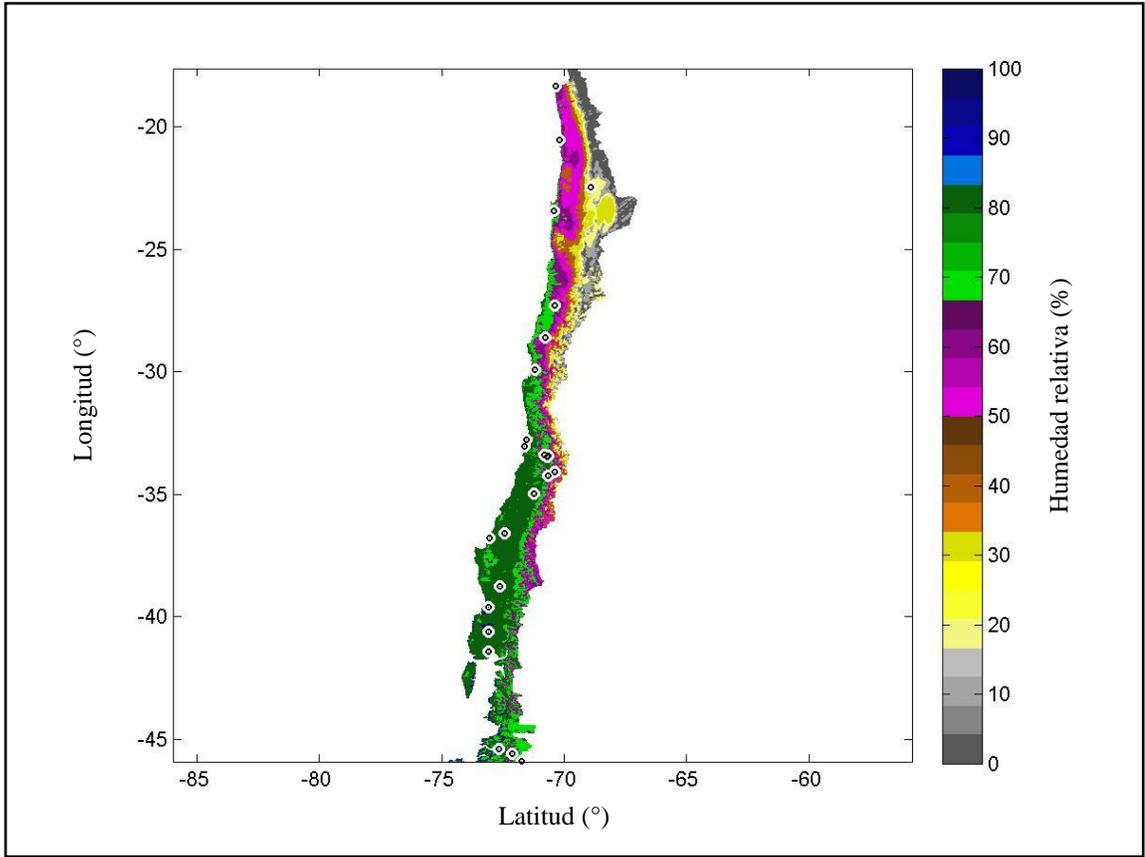


Figura 10.19: Humedad relativa para el mes de mayo con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

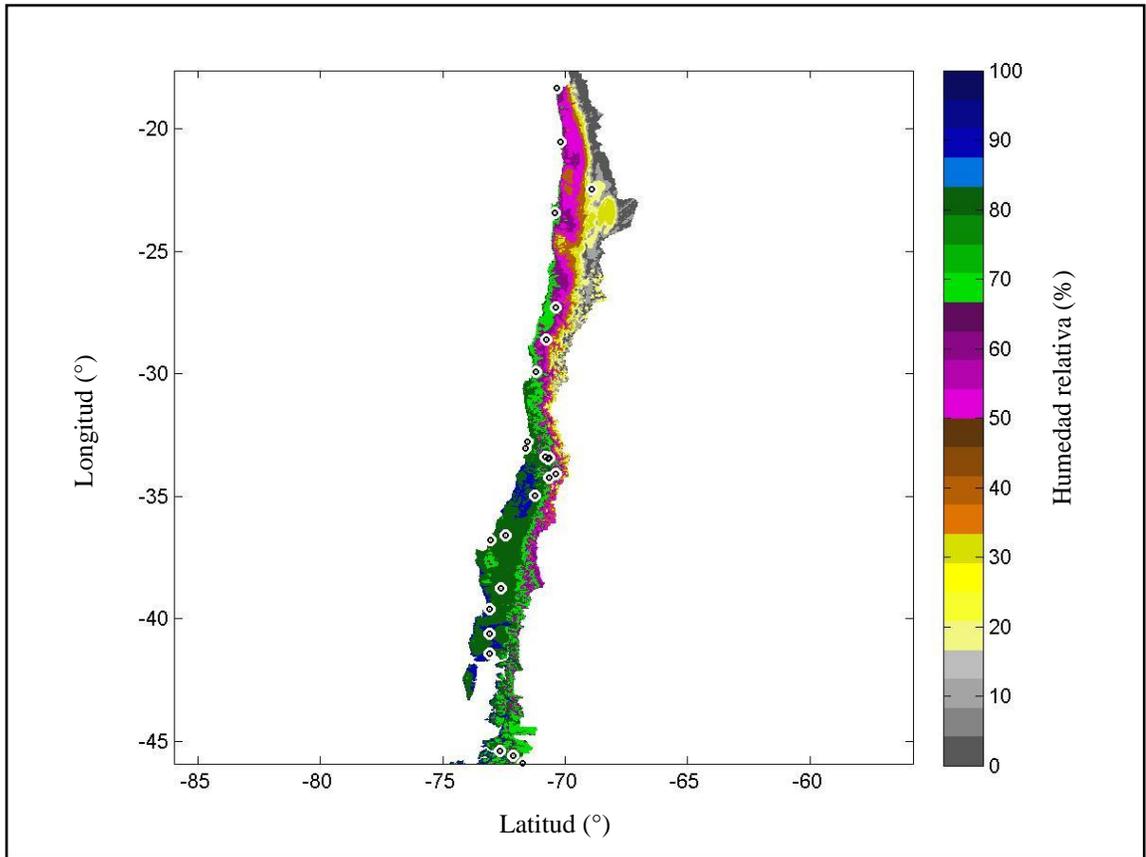


Figura 10.20: Humedad relativa para el mes de junio con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

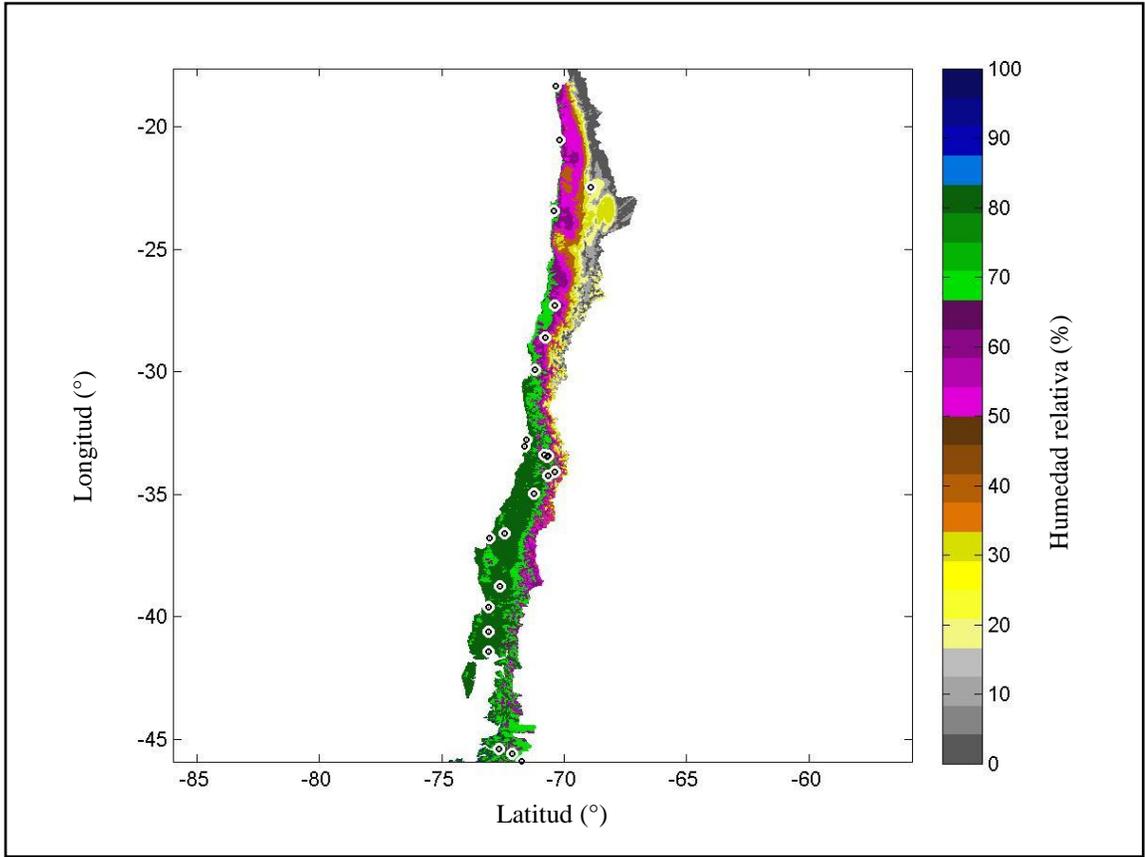


Figura 10.21: Humedad relativa para el mes de agosto con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

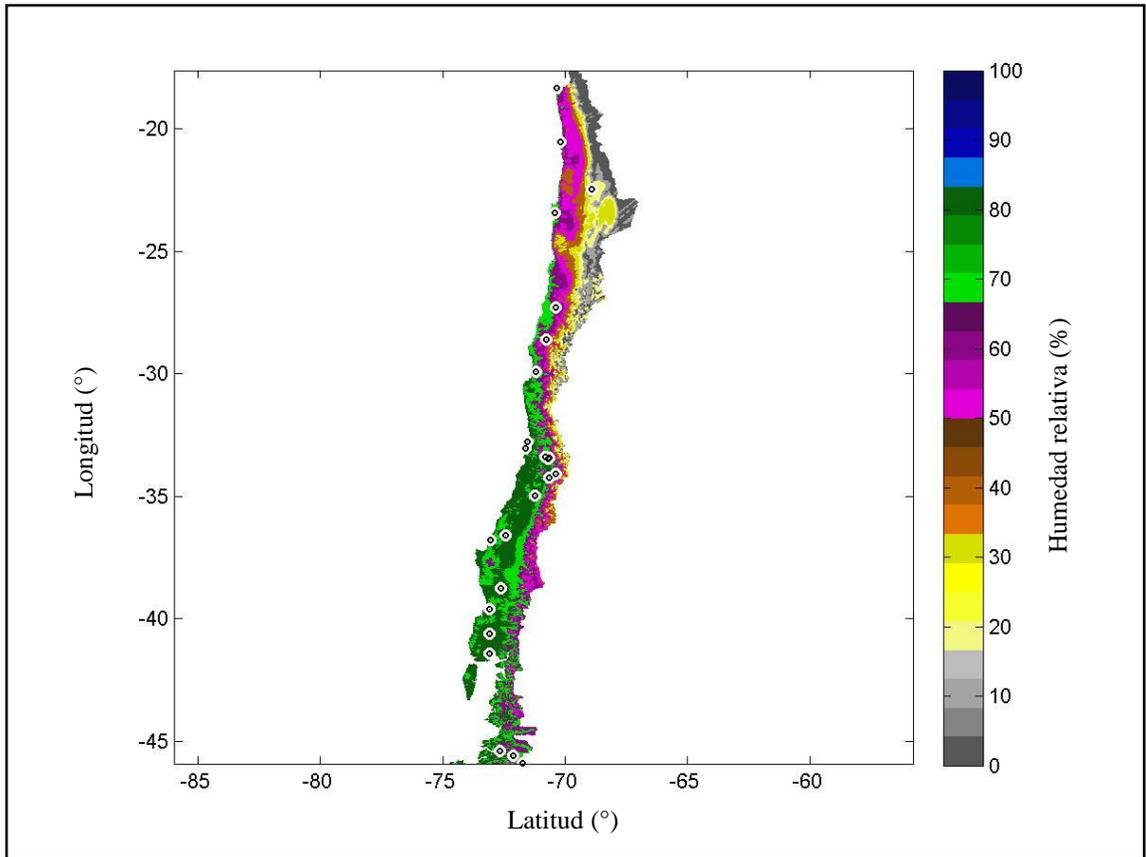


Figura 10.22: Humedad relativa para el mes de septiembre con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

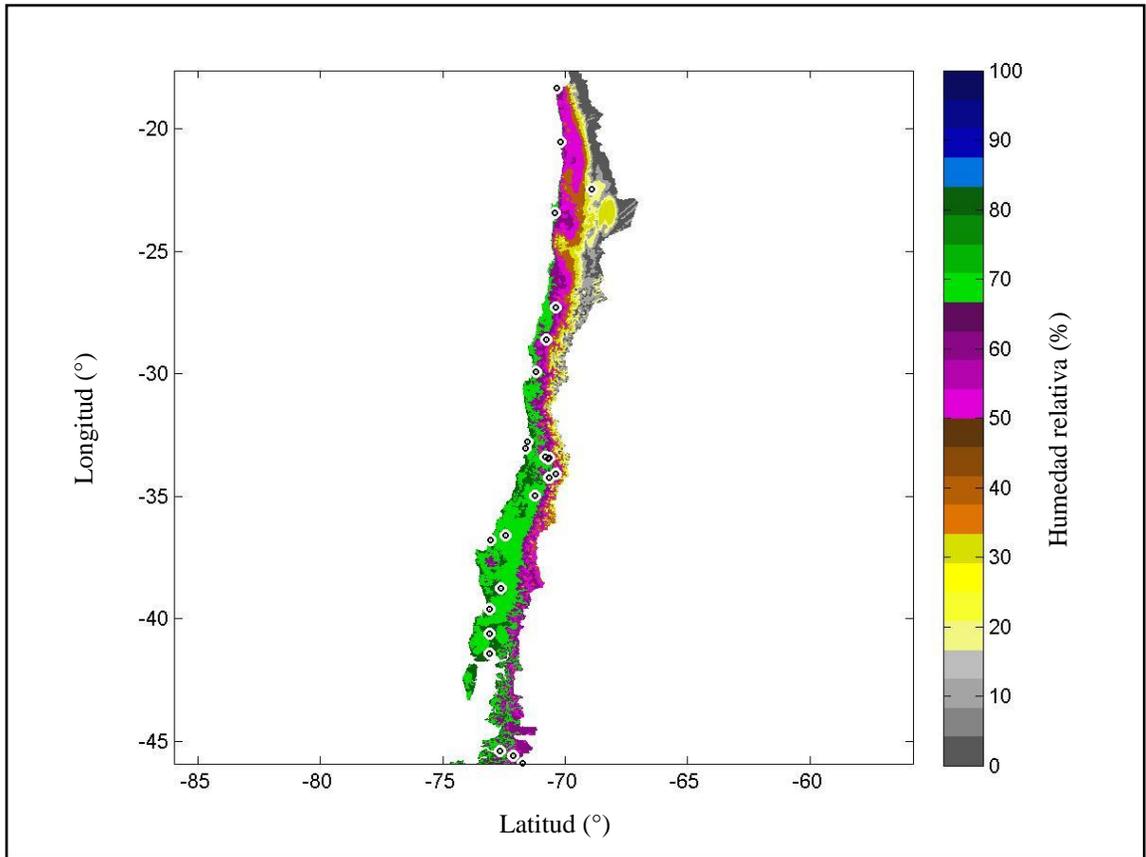


Figura 10.23: Humedad relativa para el mes de octubre con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

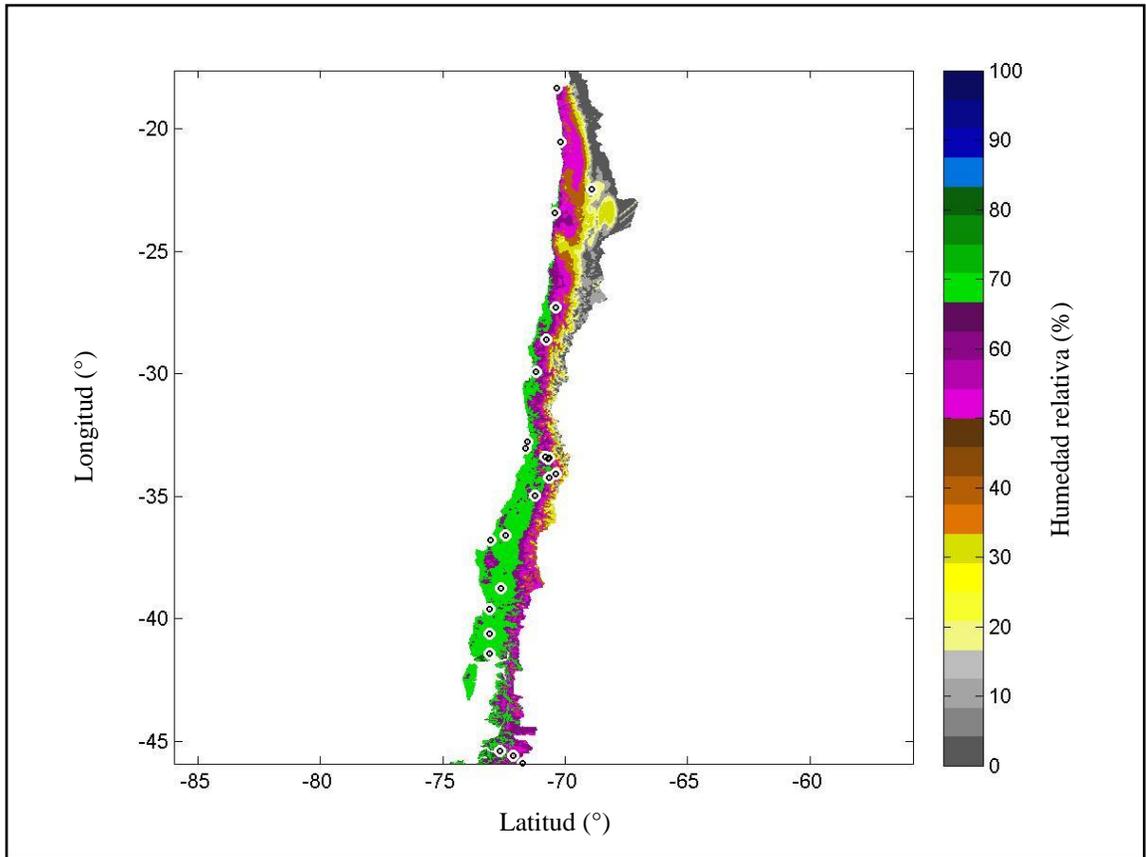


Figura 10.24: Humedad relativa para el mes de noviembre con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

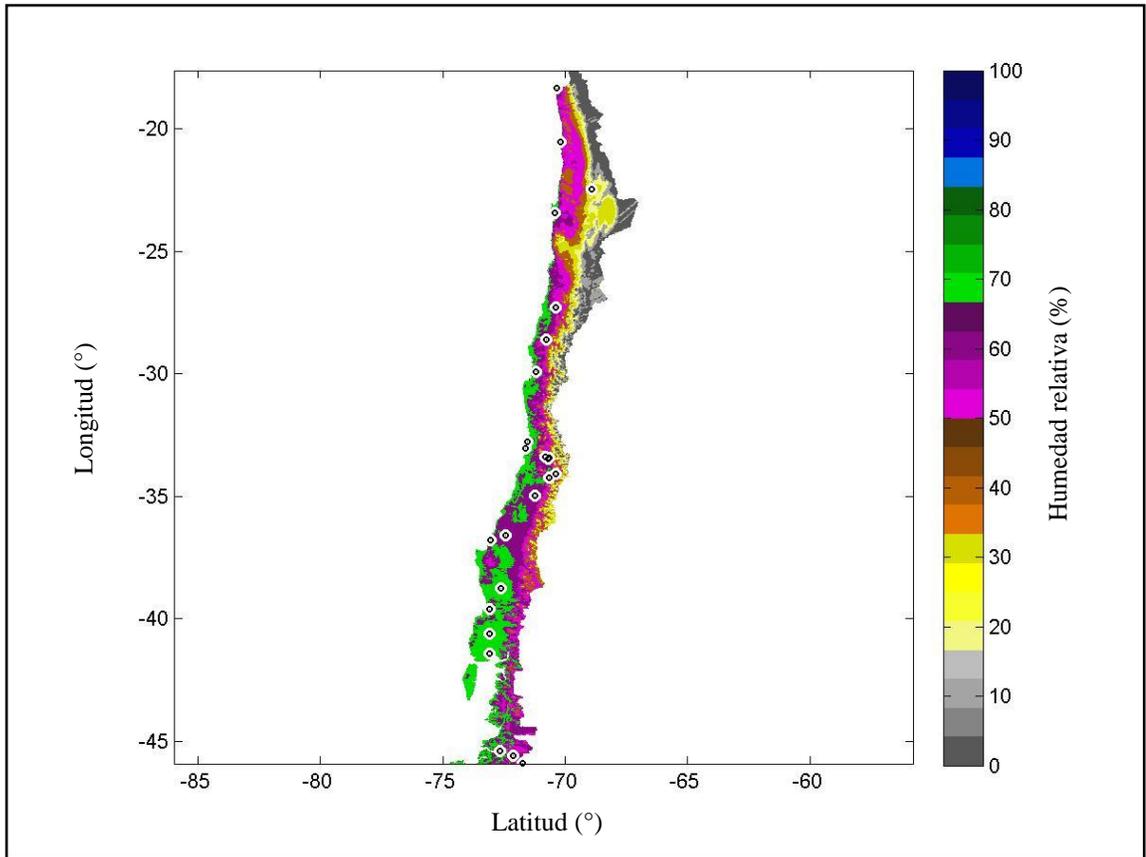


Figura 10.25: Humedad relativa para el mes de diciembre con el método “empírico”  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la DMC

De igual forma que con la temperatura y la humedad relativa, a continuación se presentan los mapas faltantes para Albedo real o “*actual albedo*”.

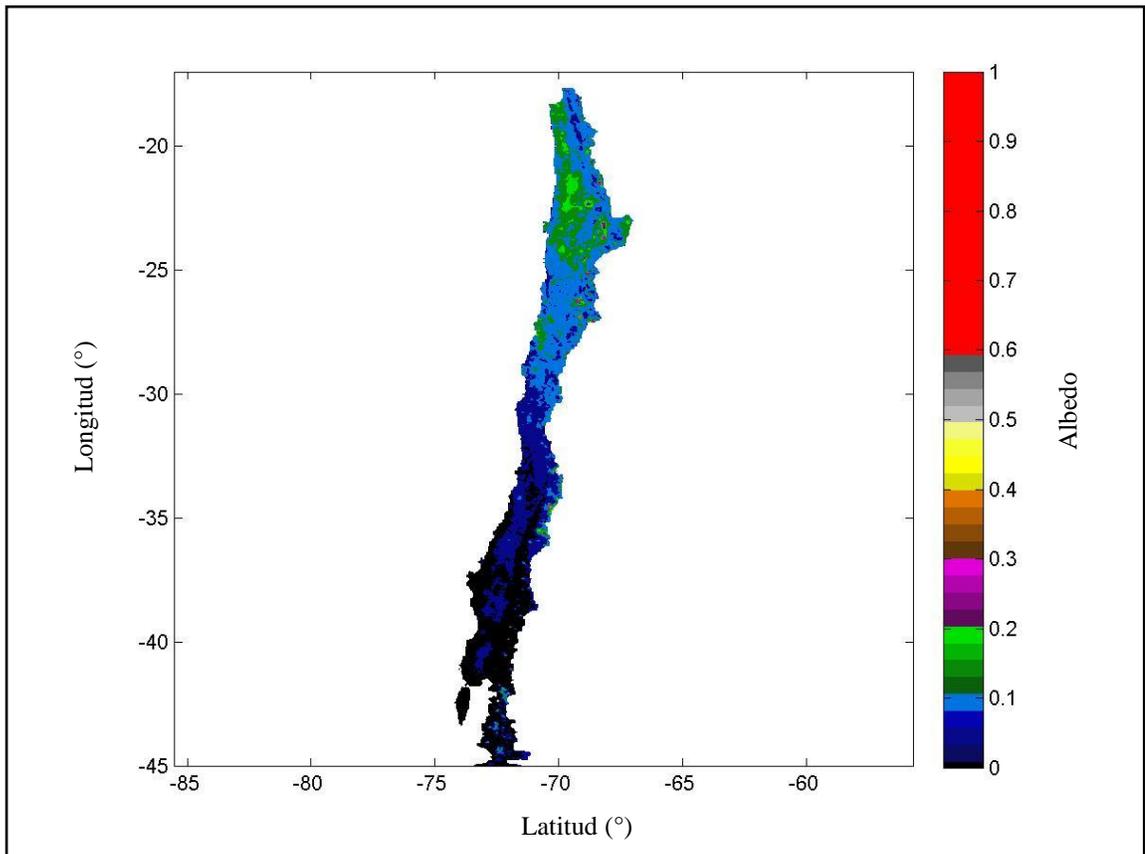


Figura 10.26: Albedo real superficial para el mes de febrero para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

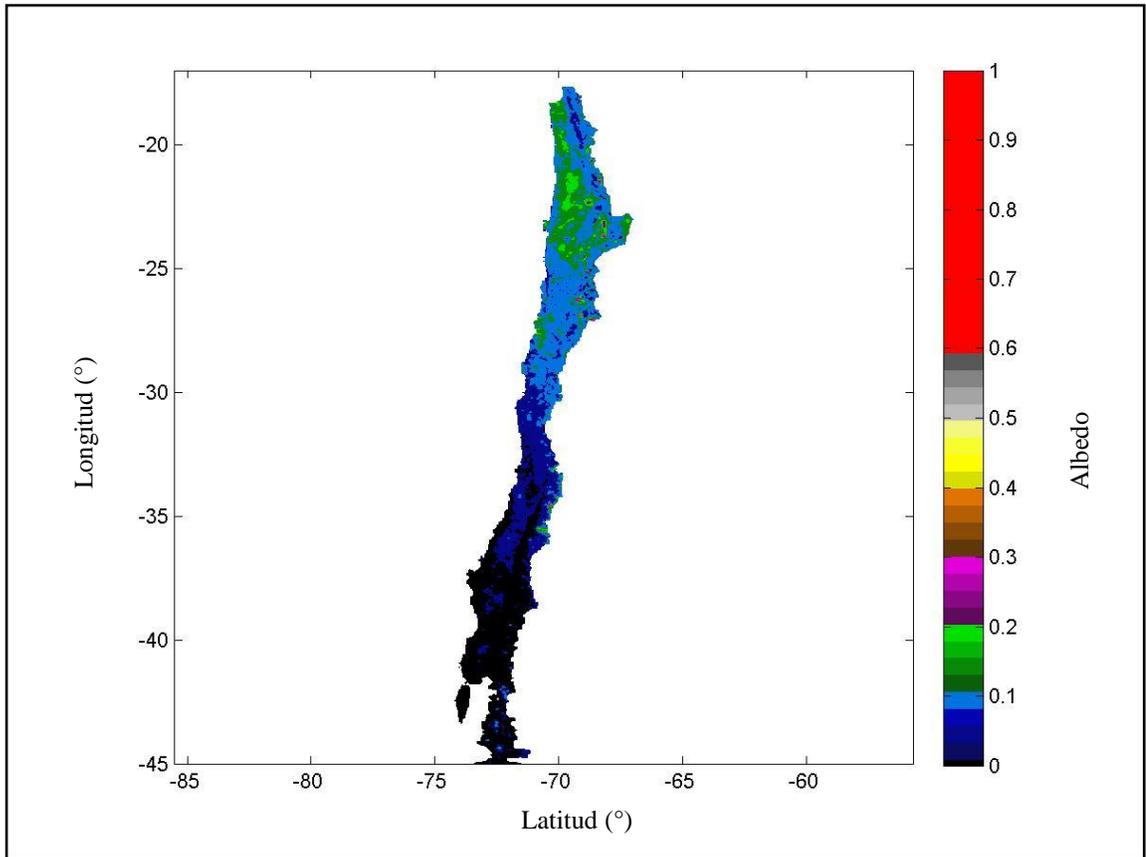


Figura 10.27: Albedo real superficial para el mes de marzo para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

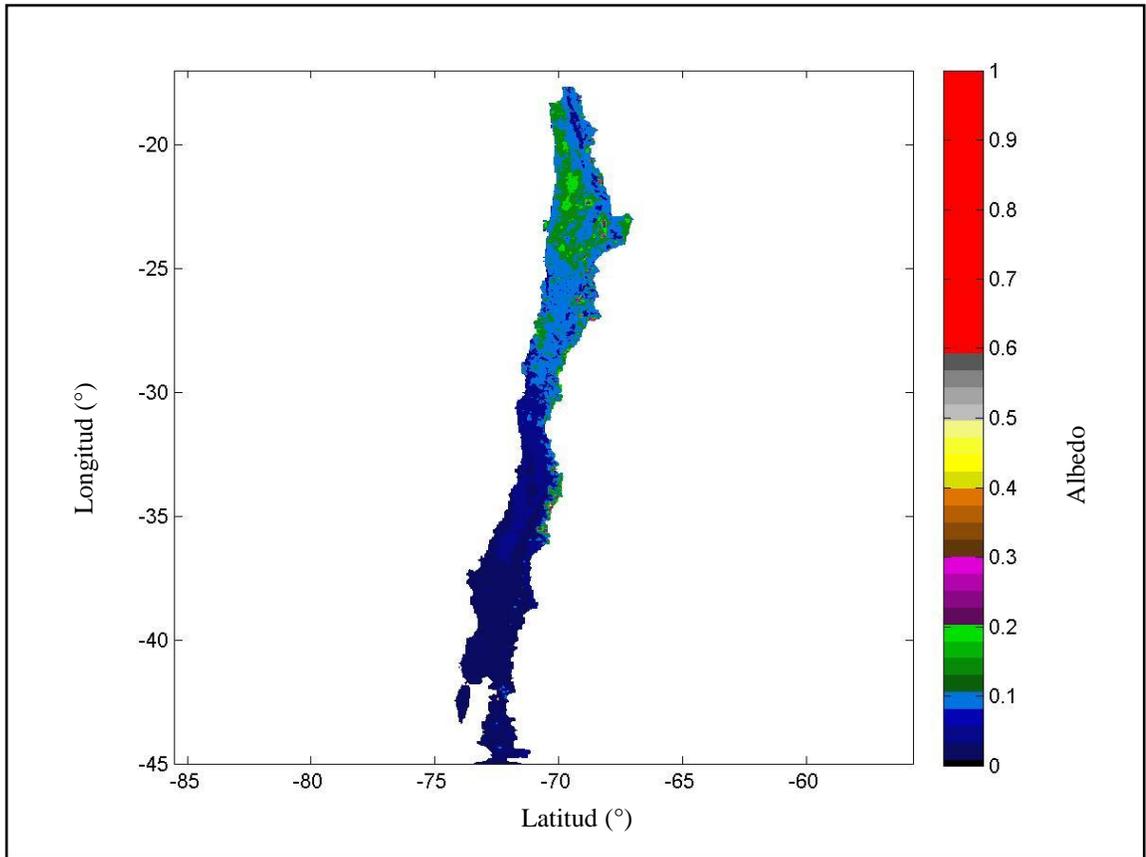


Figura 10.28: Albedo real superficial para el mes de abril para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

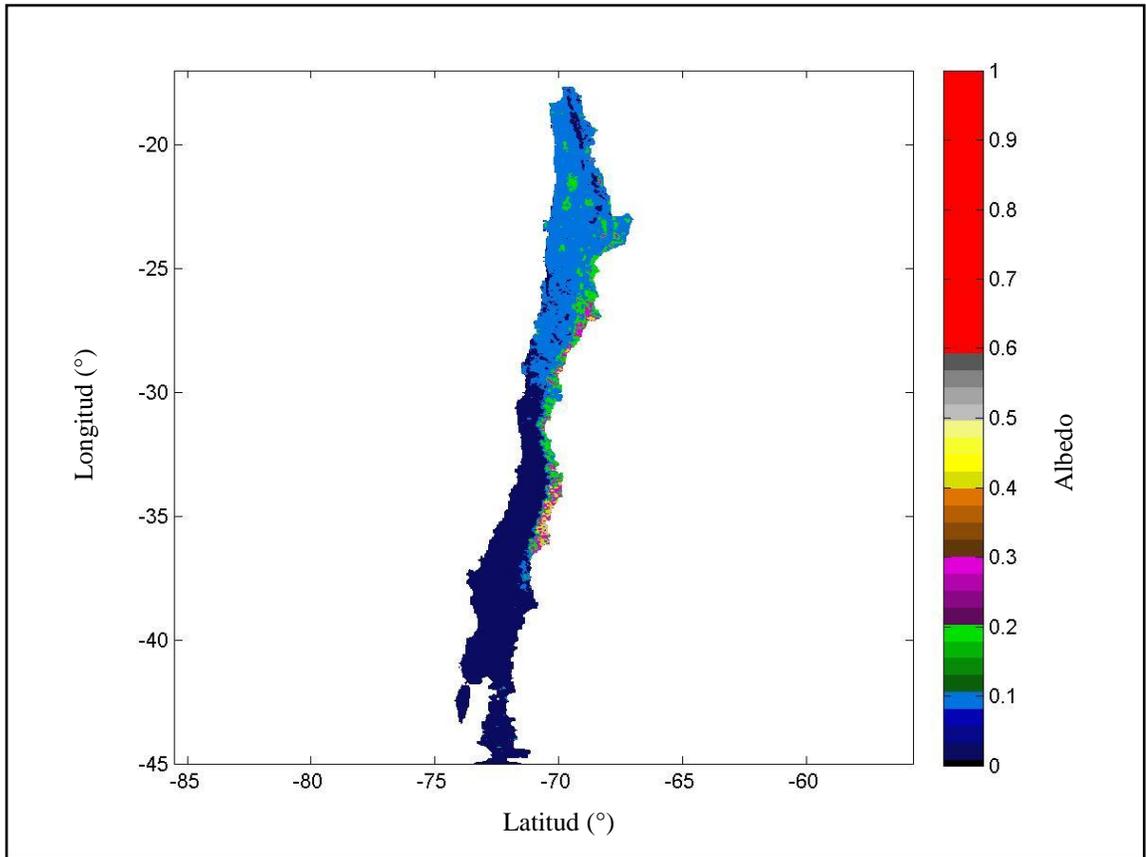


Figura 10.29: Albedo real superficial para el mes de mayo para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

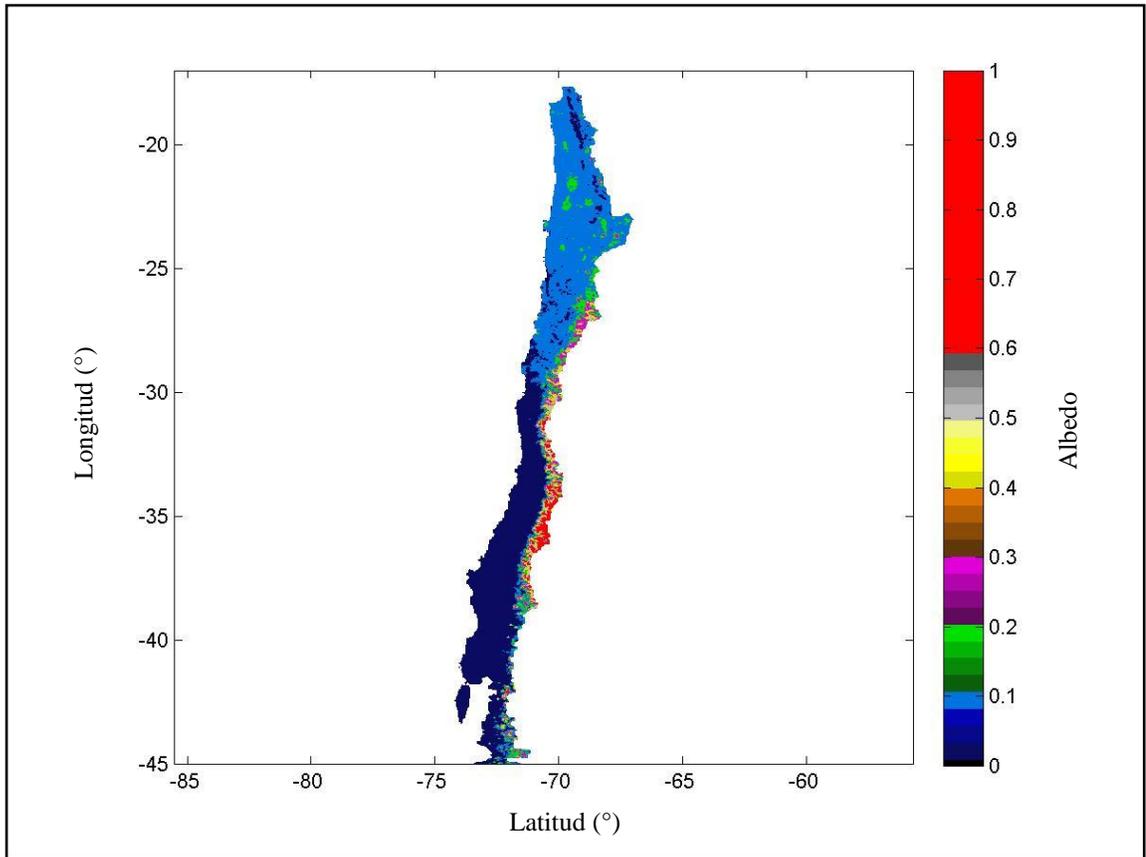


Figura 10.30: Albedo real superficial para el mes de junio para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

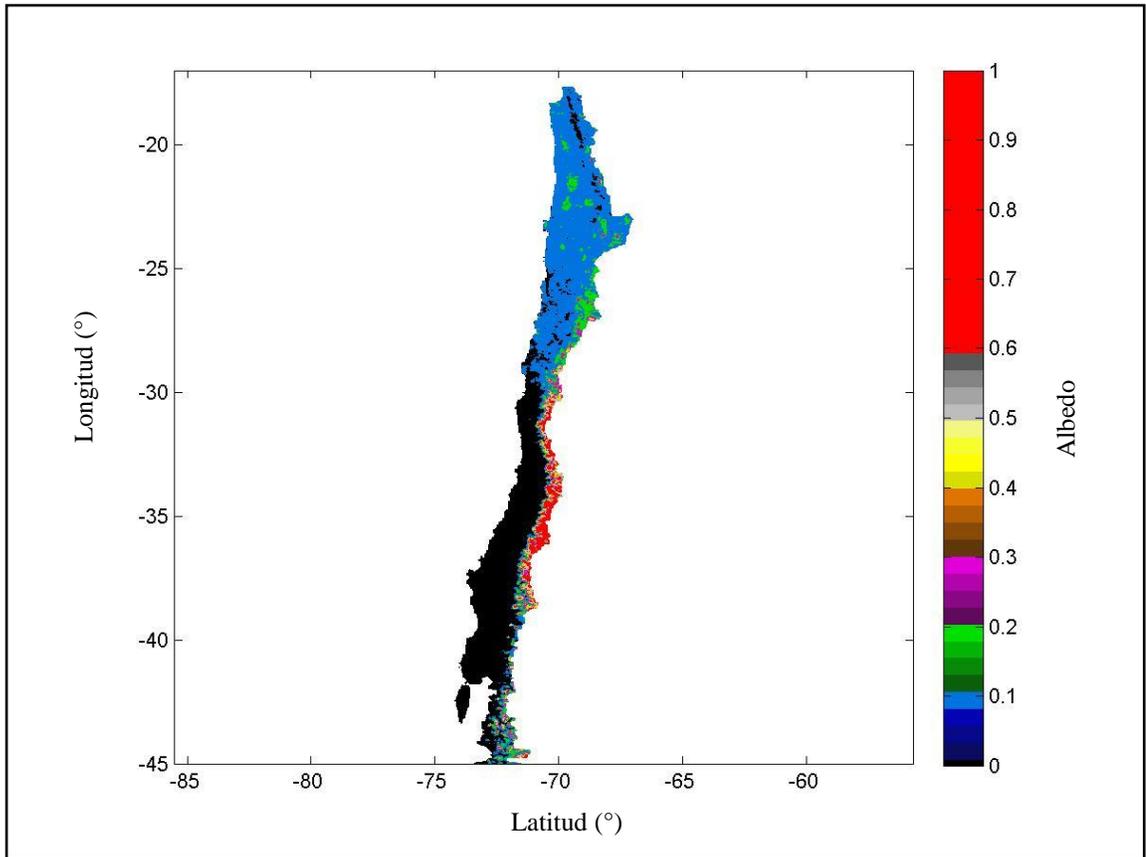


Figura 10.31: Albedo real superficial para el mes de agosto para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

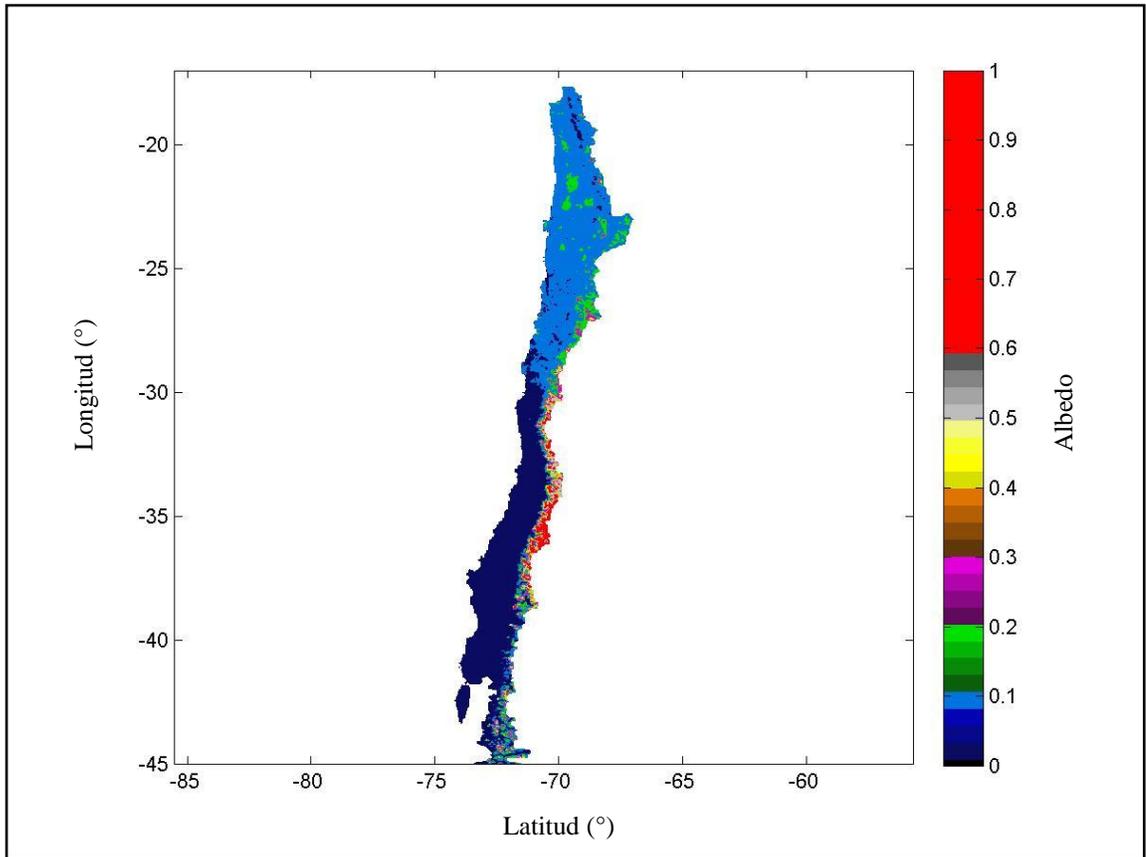


Figura 10.32: Albedo real superficial para el mes de septiembre para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

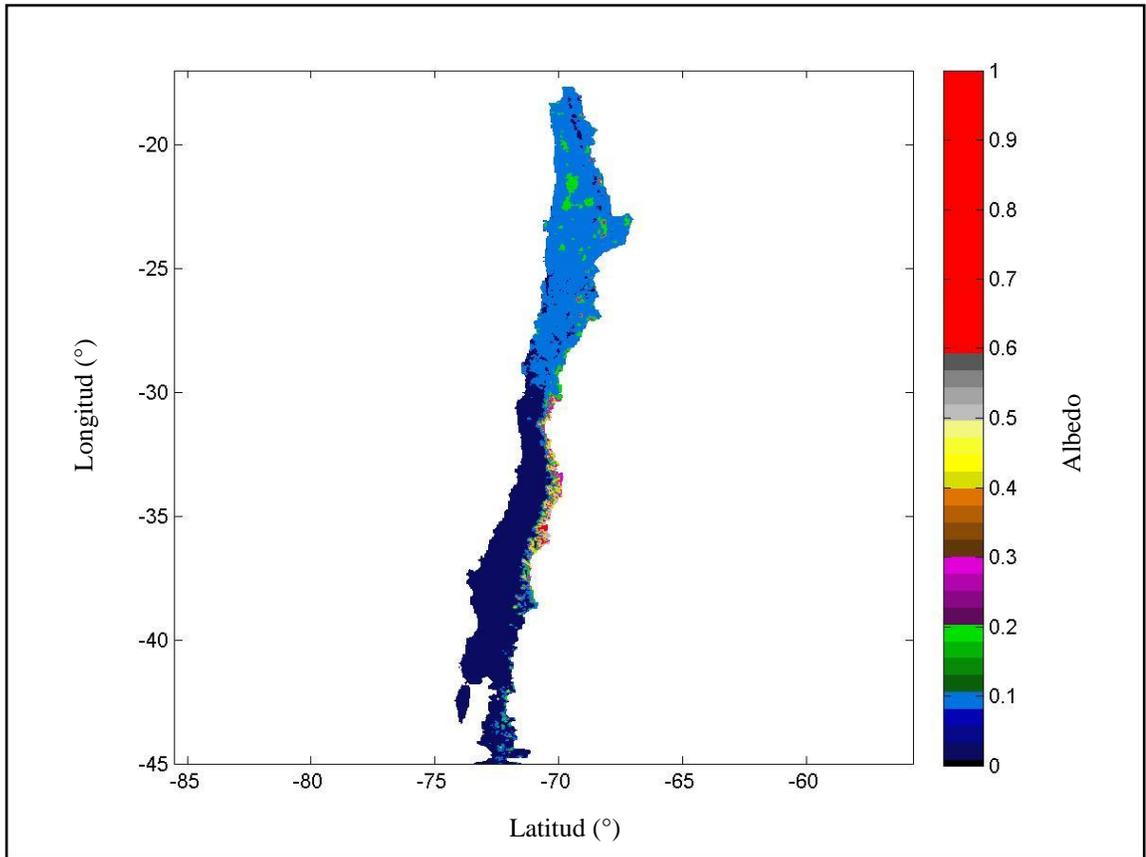


Figura 10.33: Albedo real superficial para el mes de octubre para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

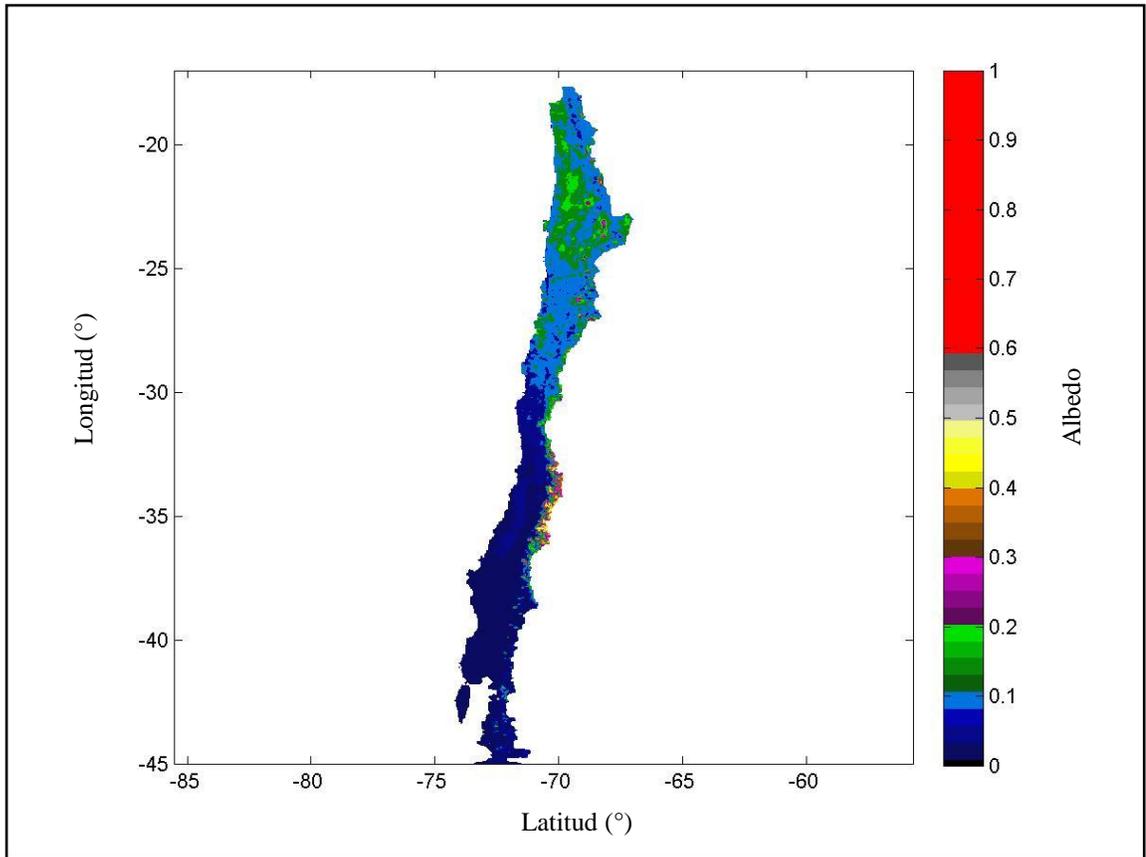


Figura 10.34: Albedo real superficial para el mes de noviembre para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

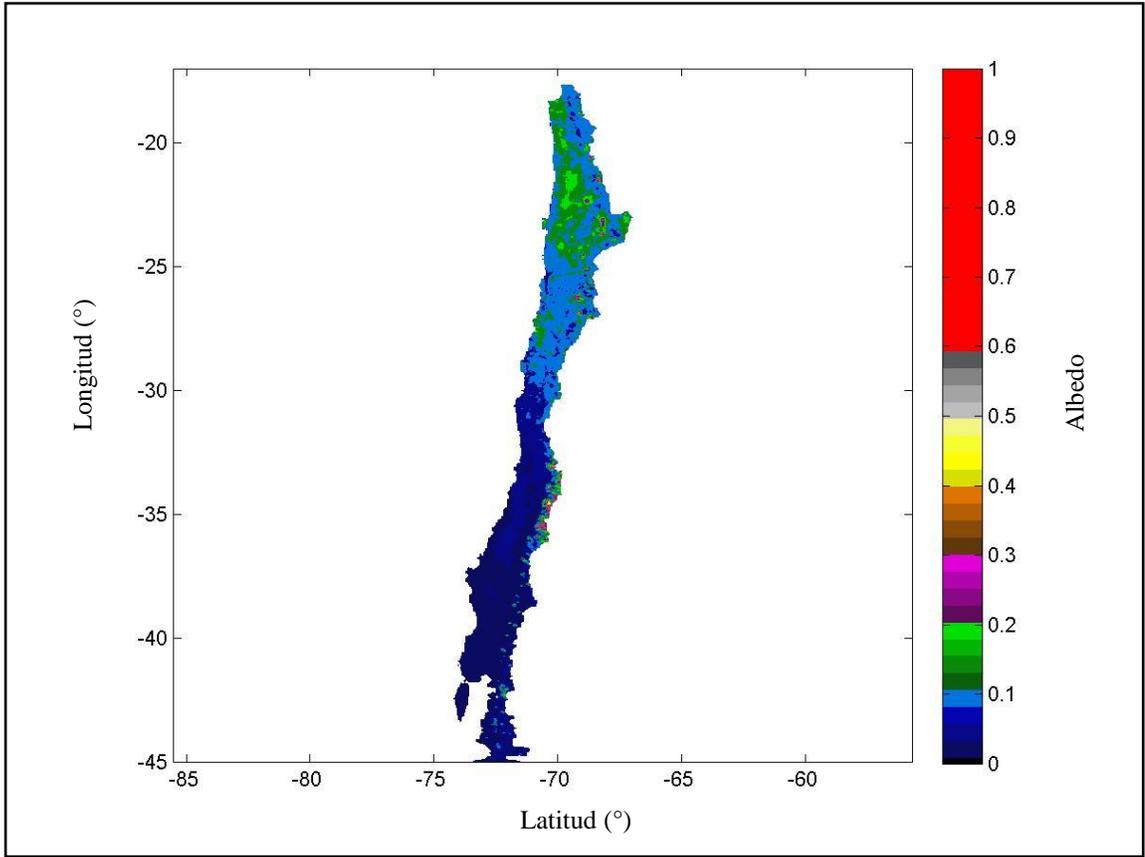


Figura 10.35: Albedo real superficial para el mes de diciembre para Chile  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la NASA

A continuación se entregan los mapas para los meses faltantes para los tipos de atmósfera que serán determinados por el modelo Chile-SR.

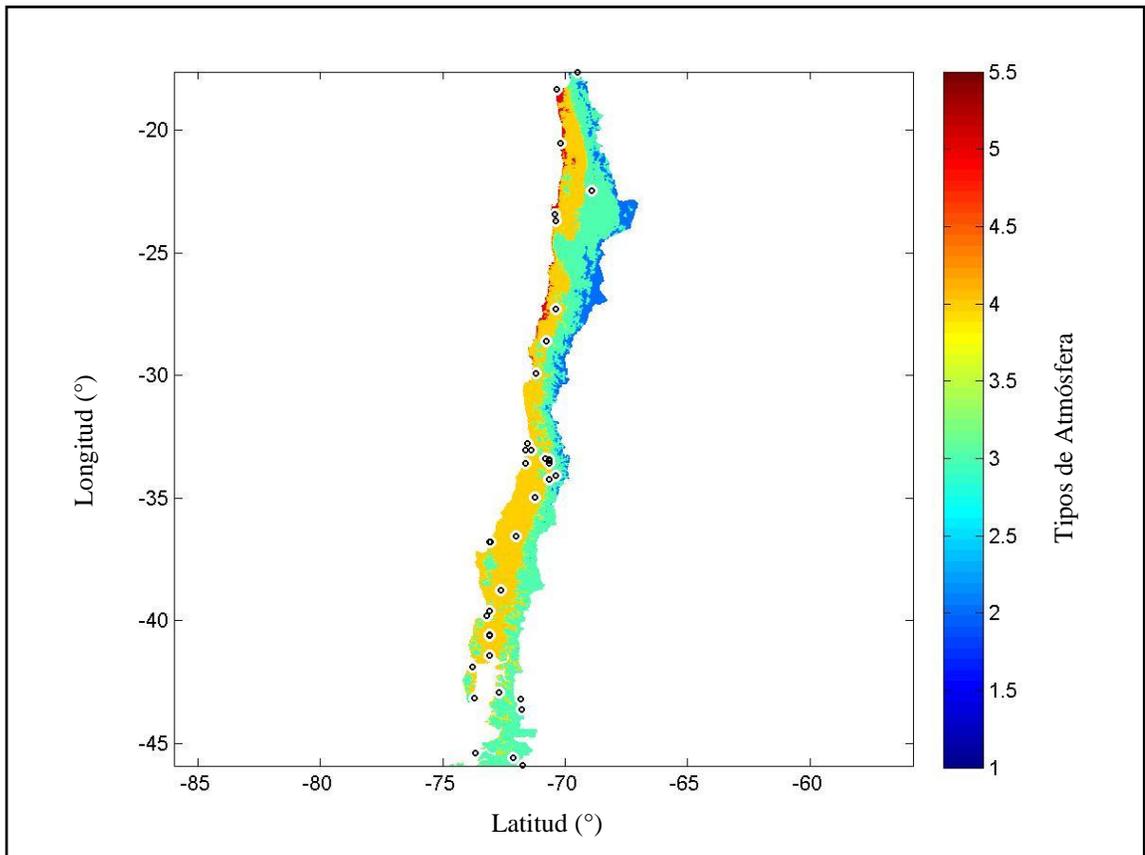


Figura 10.36: Mapa de tipos de atmósferas para el mes febrero  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

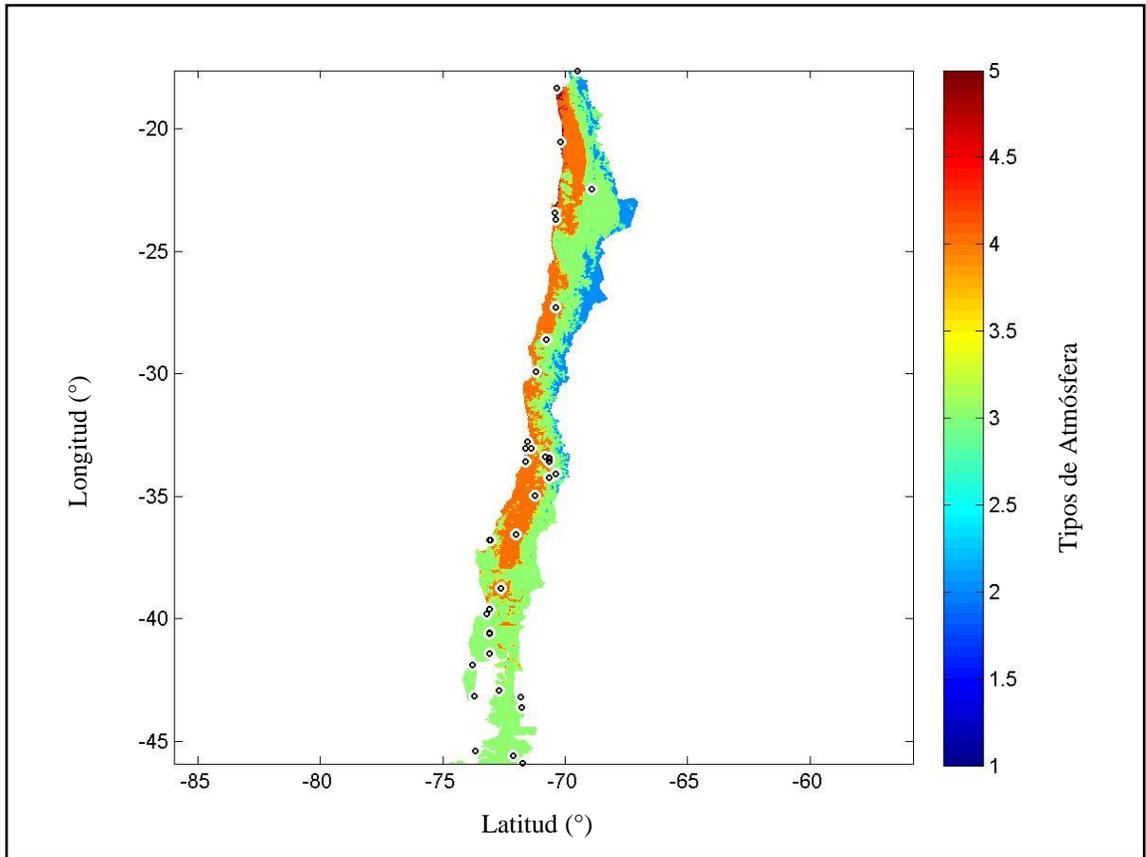


Figura 10.37: Mapa de tipos de atmósferas para el mes marzo  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

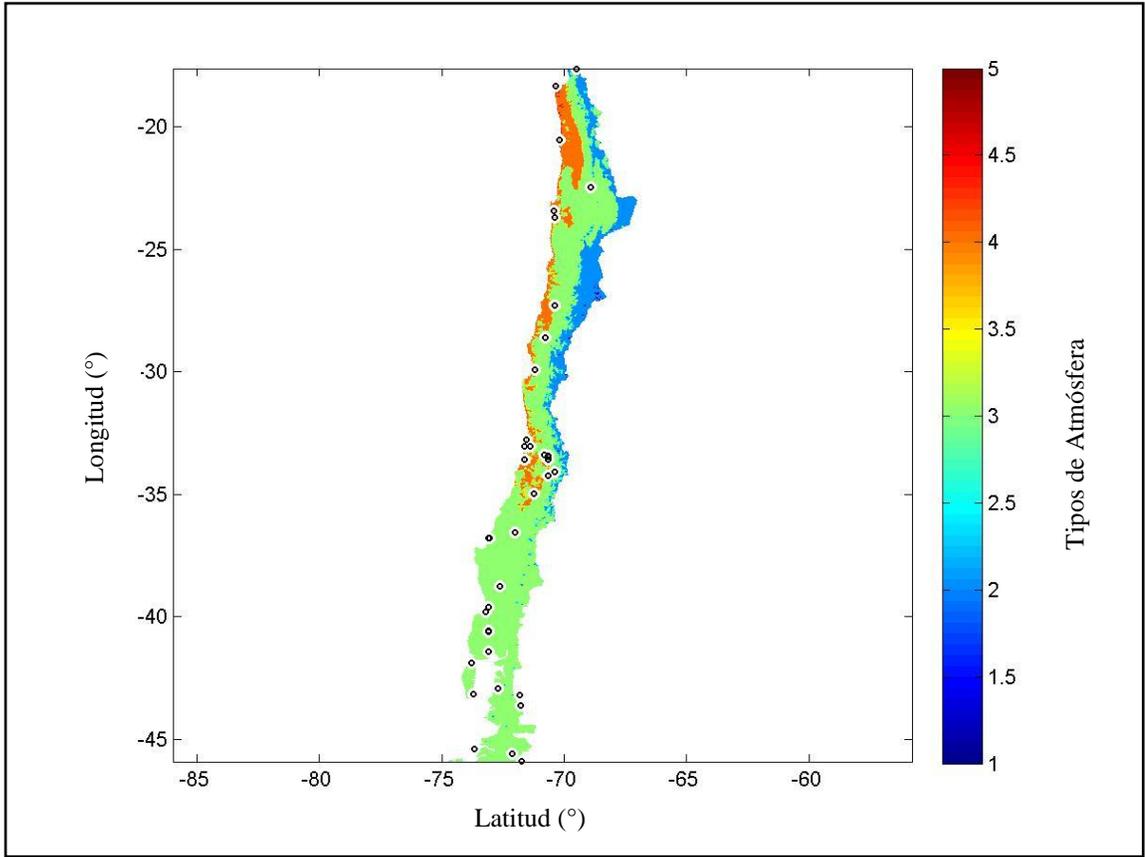


Figura 10.38: Mapa de tipos de atmósferas para el mes abril  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

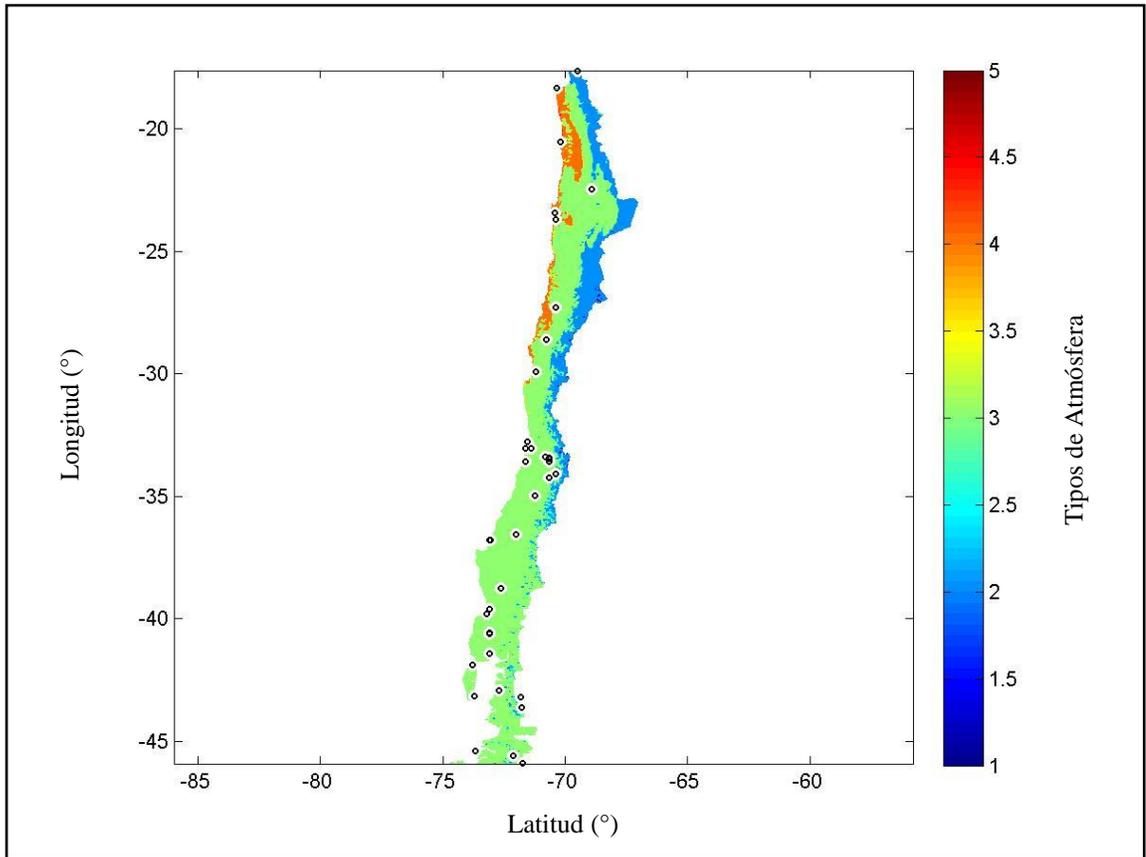


Figura 10.39: Mapa de tipos de atmósferas para el mes mayo  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

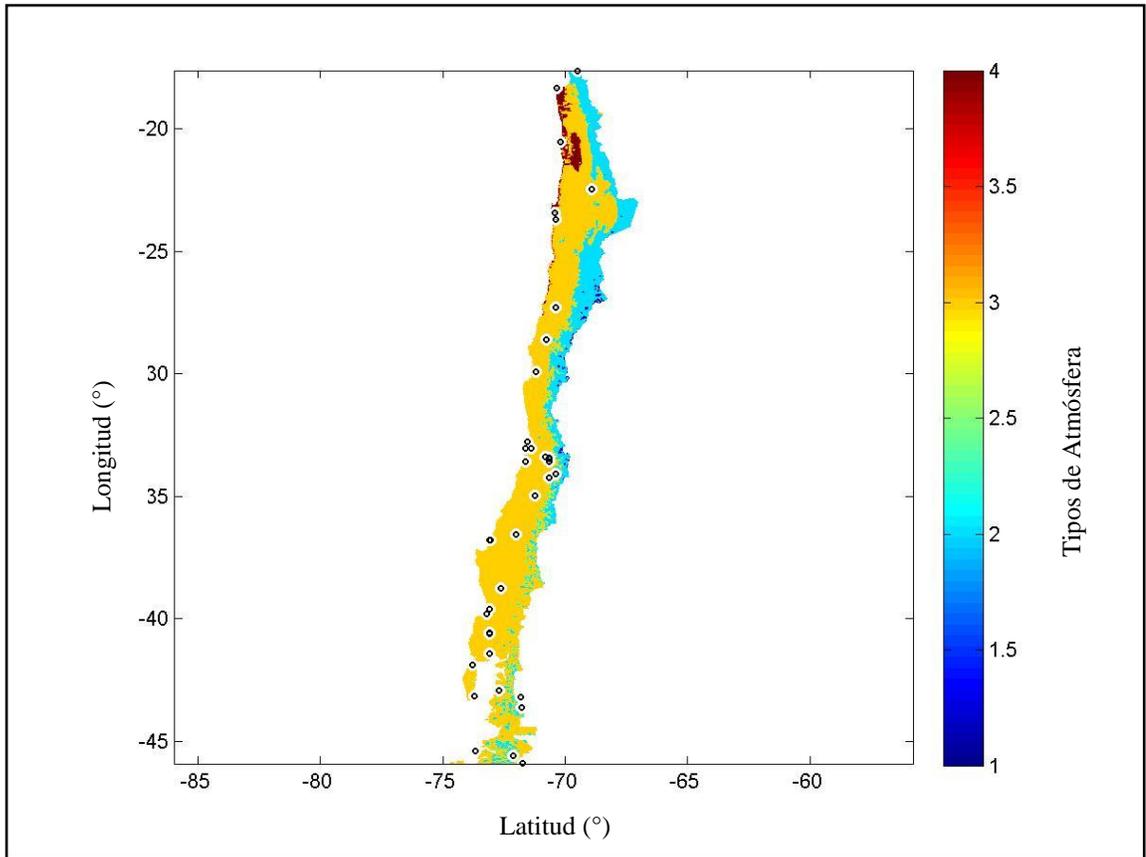


Figura 10.40: Mapa de tipos de atmósferas para el mes junio  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

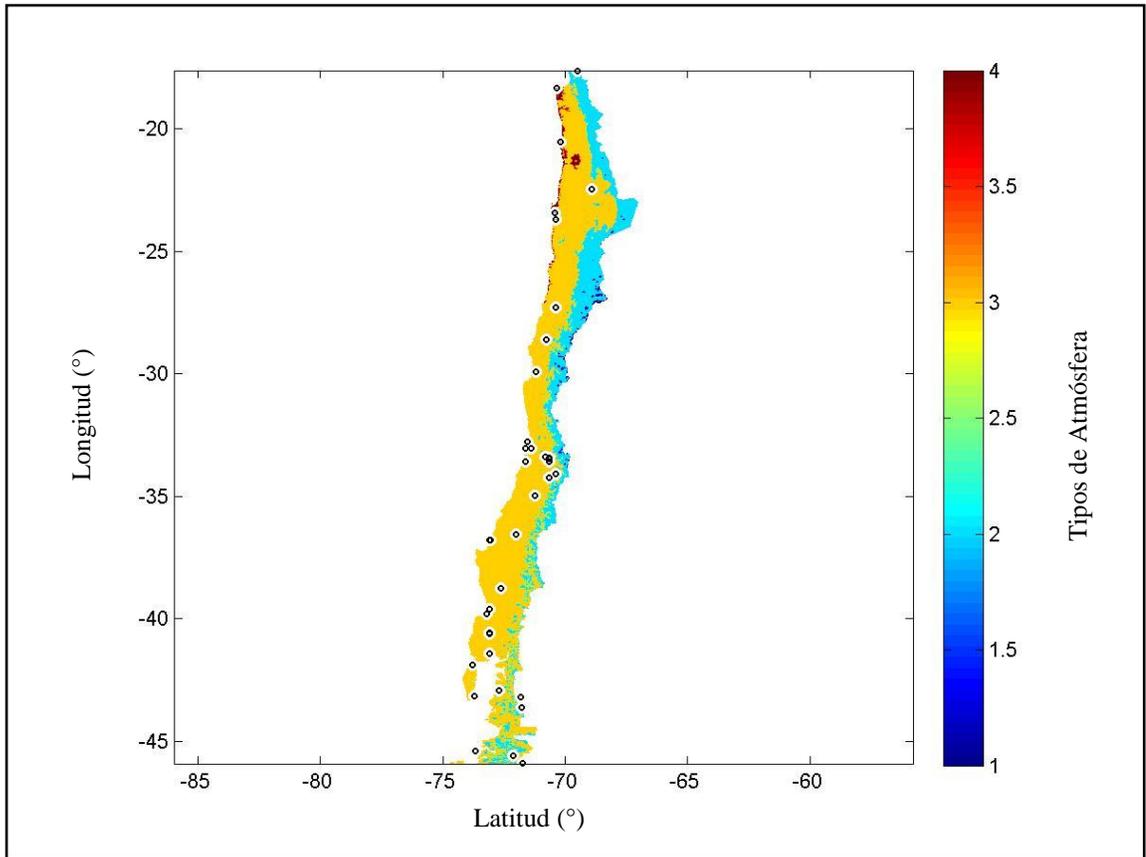


Figura 10.41: Mapa de tipos de atmósferas para el mes julio  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

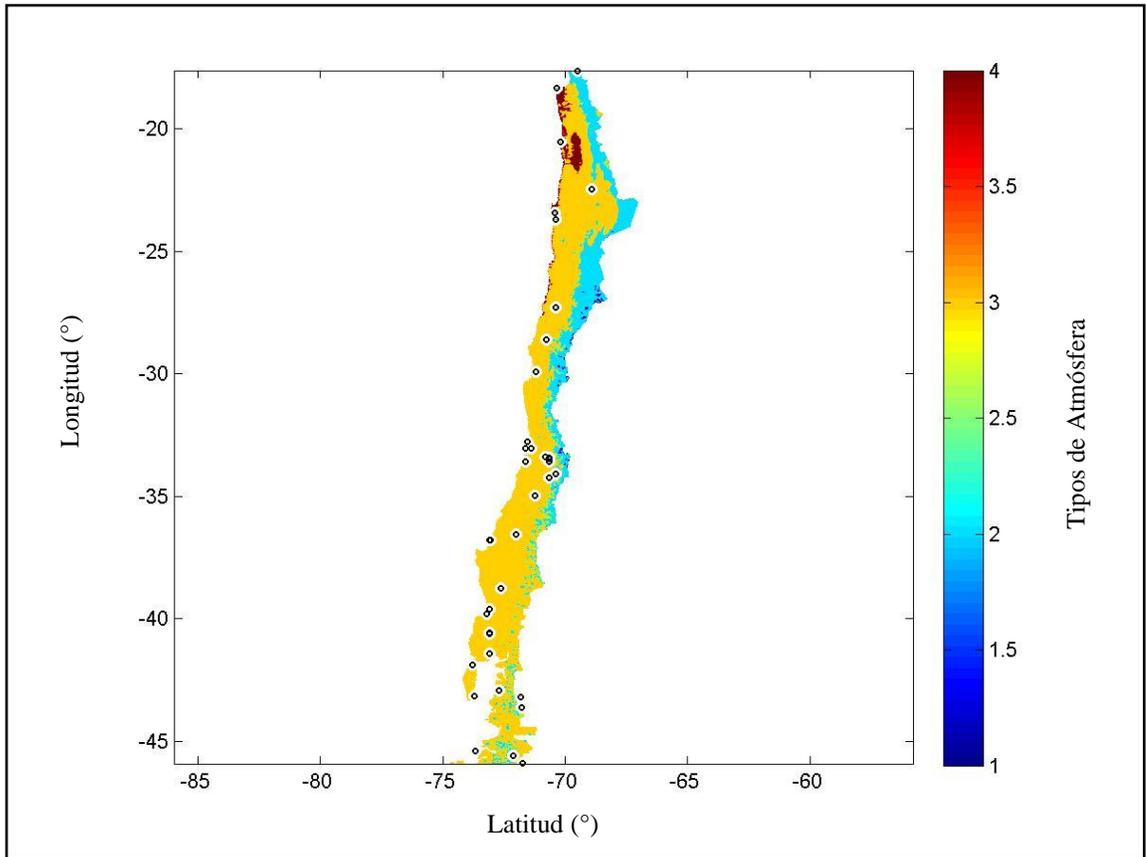


Figura 10.42: Mapa de tipos de atmósferas para el mes agosto  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

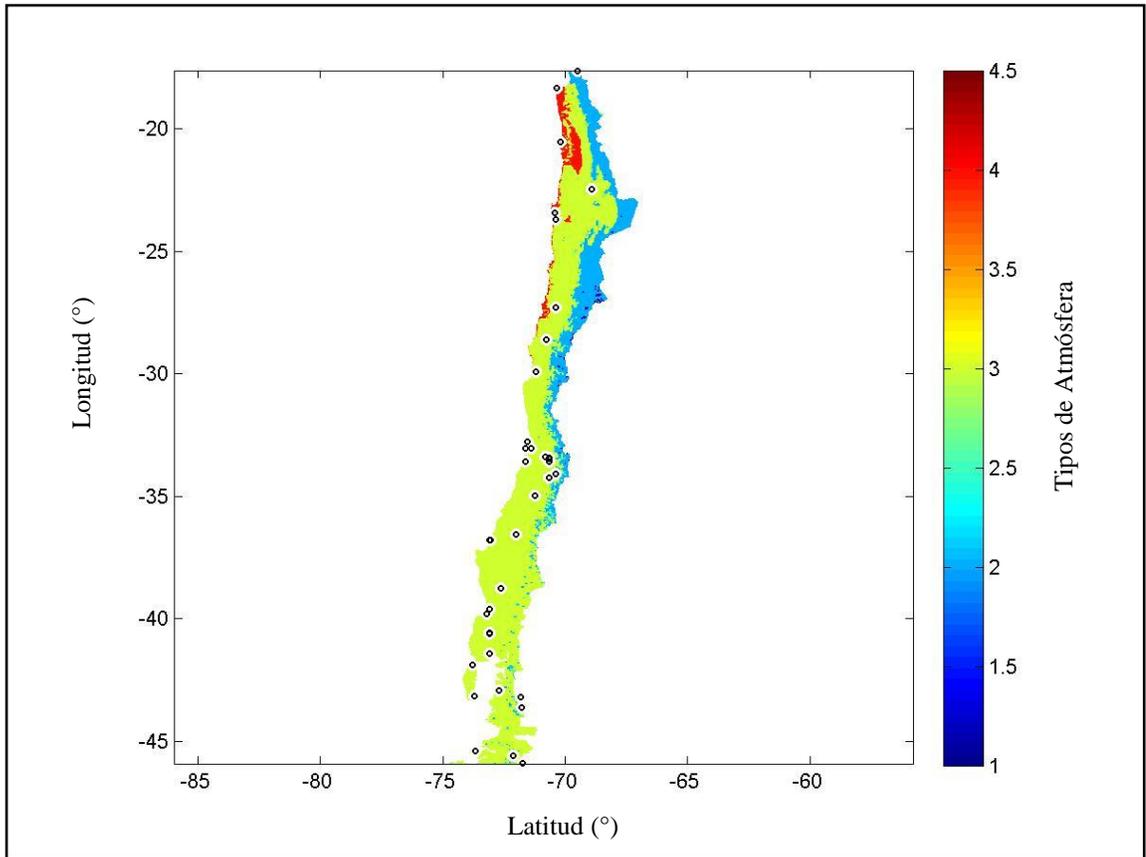


Figura 10.43: Mapa de tipos de atmósferas para el mes septiembre  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

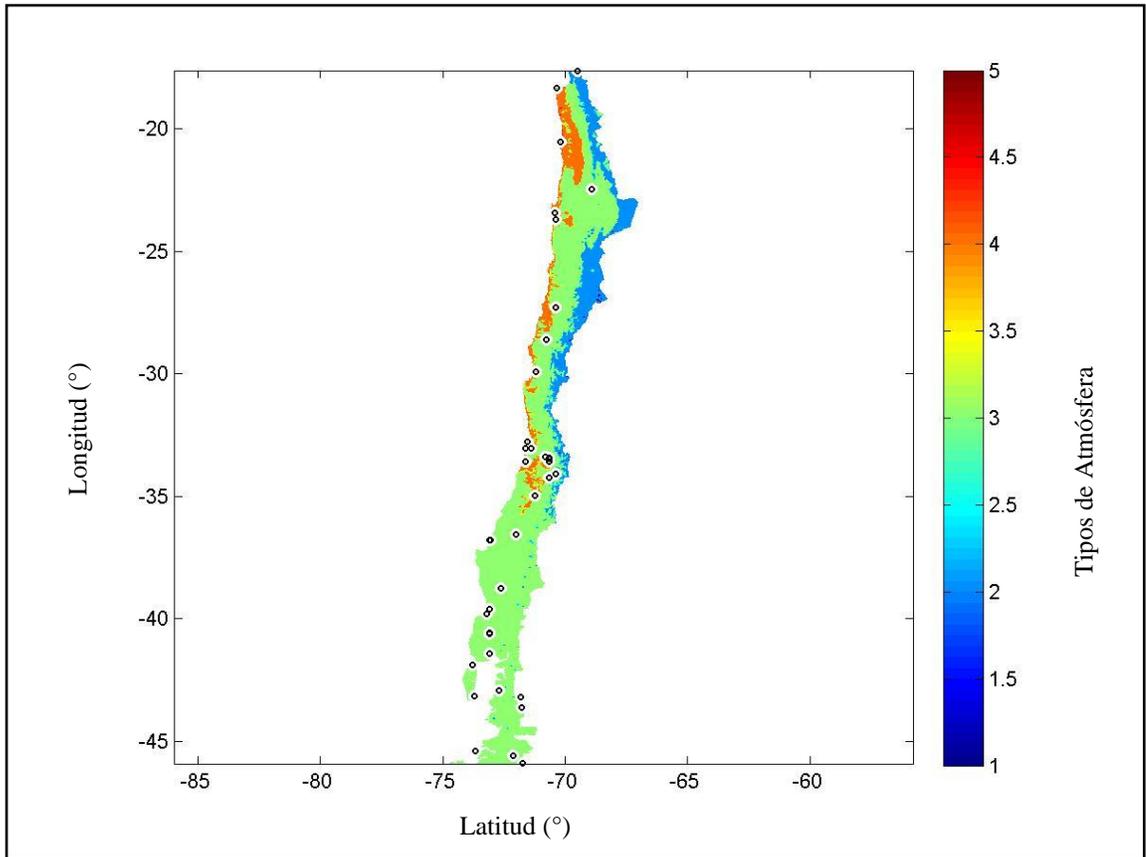


Figura 10.44: Mapa de tipos de atmósferas para el mes octubre  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

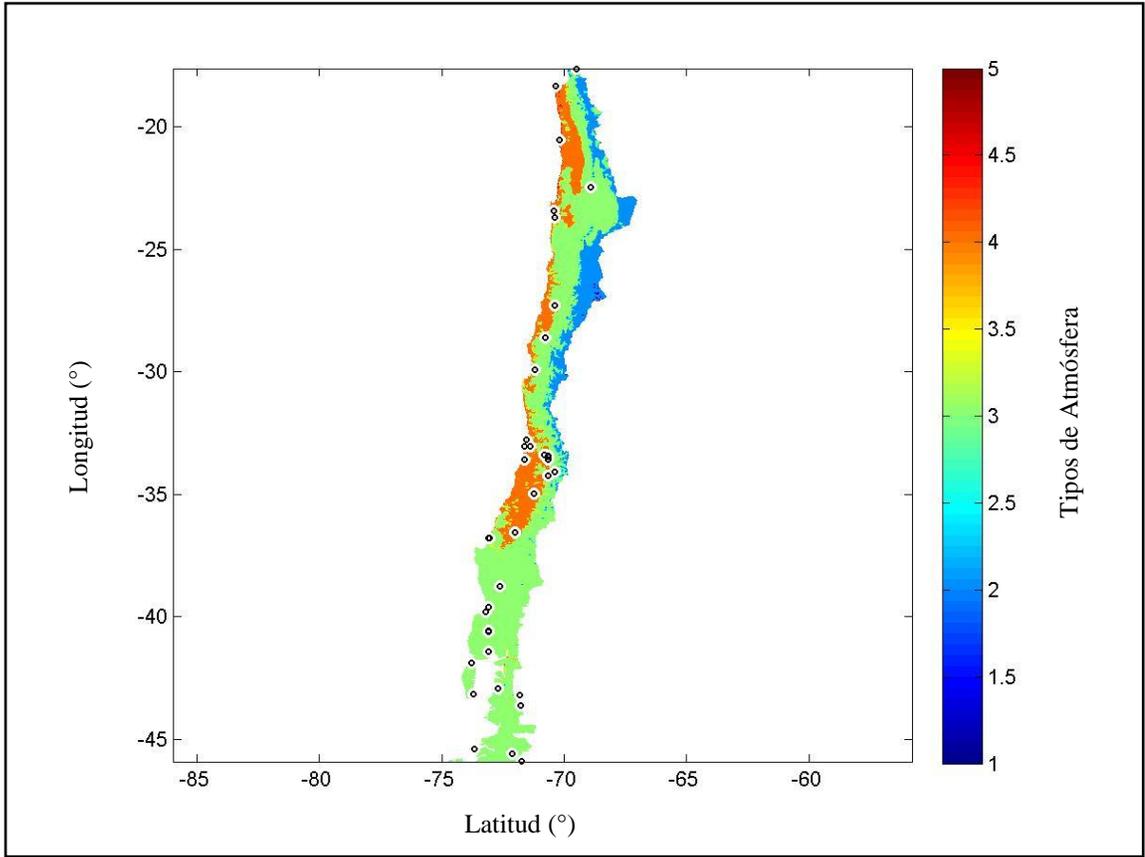


Figura 10.45: Mapa de tipos de atmósferas para el mes noviembre  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC

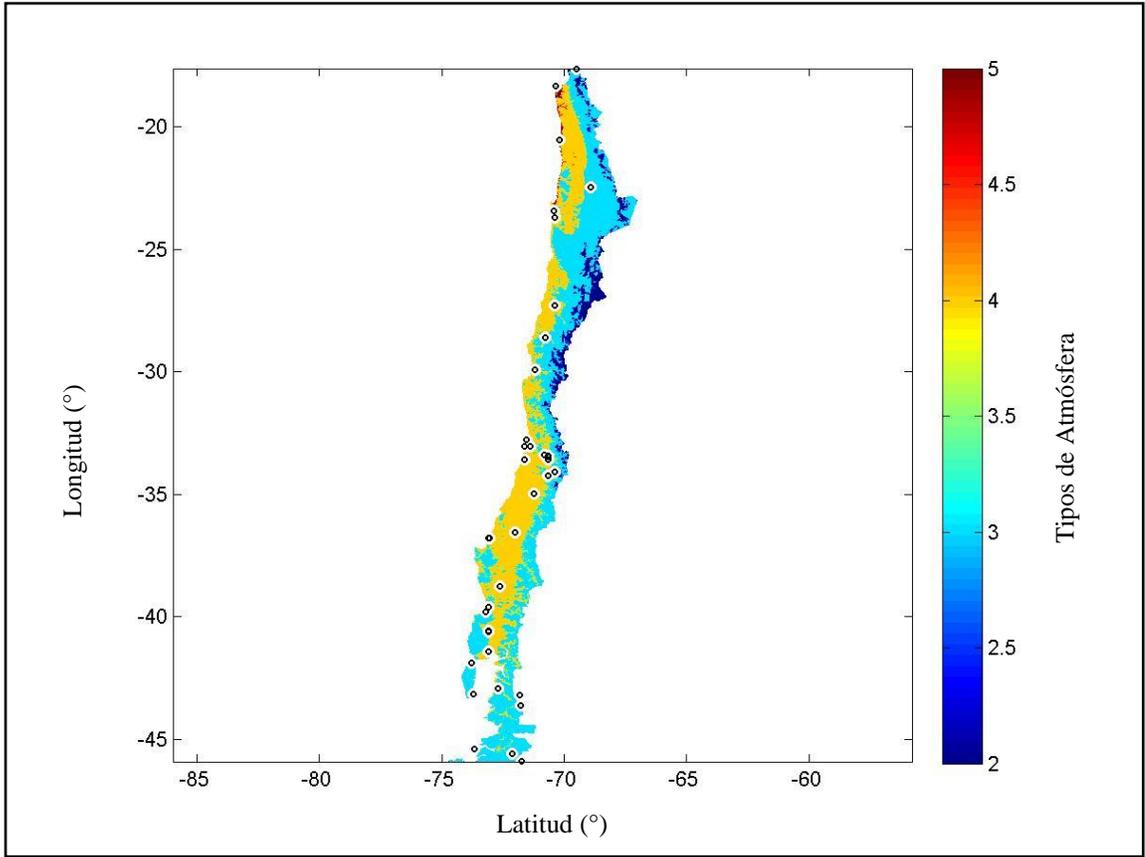


Figura 10.46: Mapa de tipos de atmósferas para el mes diciembre  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la DMC