



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COBERTURA EFECTIVA DE NUBES PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN CHILE

POR

CRISTÓBAL BOETTO HALCARTEGARAY

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

Profesor Supervisor:

RODRIGO ESCOBAR MORAGAS

Santiago de Chile, Julio, 2011

© 2011, Cristóbal Boetto Halcartegaray



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COBERTURA EFECTIVA DE NUBES PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN CHILE

CRISTÓBAL BOETTO HALCARTEGARAY

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

RODRIGO ESCOBAR MORAGAS

GONZALO PIZARRO PUCCIO

GINA CHARPENTIER HENRÍQUEZ

ANDRÉS GUESALAGA MEISSNER

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

Santiago de Chile, Julio, 2011

A mis padres y hermanos, por su
apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo del Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile y de todos sus miembros, en especial de los auxiliares y secretarias. Quiero agradecer a mis dos compañeros de trabajo Juan Francisco Zanolli y Juan Pablo Justiniano, por su buena disposición y compañerismo incondicional, también a mi Profesor Guía Rodrigo Escobar, por siempre confiar en nosotros y por darnos su apoyo y dirección. Quiero extender mi agradecimiento fuera del departamento a Gina Charpentier, miembro de la Dirección Meteorológica de Chile, por su paciencia inagotable y calidez humana.

Finalmente quiero agradecer en forma muy especial a mis padres y hermanos, quienes siempre me han apoyado y estado junto a mí.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	8
3. CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL.....	10
4. CONTEXTO ENERGÉTICO DE CHILE.....	18
4.1. Base de datos disponible de mediciones terrestres del recurso solar	20
4.1.1. Archivo Nacional Solarimétrico (ANS)	21
4.1.2. Dirección Meteorológica de Chile (DMC)	22
4.1.3. Estación terrestre CNE-GTZ	23
4.2. La importancia de una base de datos estadísticamente adecuada	24
4.3. Estimaciones satelitales de la radiación solar en superficie.....	25
5. MODELOS IMPLEMENTADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR	27
5.1. HELIOSAT	27
5.2. SUNNY/ALBANY	29
5.3. BRASIL-SR	29
5.3.1. Cálculo del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes (CC _{ieff})	34
5.3.2. Falencias del Cálculo del CC _{ieff} por el modelo BRASIL-SR.....	36
5.3.3. Validación de Datos del Modelo BRASIL-SR.....	42

6.	CHILE-SR	46
7.	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COBERTURA EFECTIVA DE NUBES (CCI _{eff})	49
7.1.	GOES-13	49
7.2.	Propuesta	51
7.2.1.	Incorporación Espectro Infrarrojo	55
7.2.2.	Incorporación de Variable <i>Scatter Phase</i>	56
7.2.3.	Definición de 4 Clases de Condiciones Atmosféricas	57
7.2.4.	Reconocimiento de Patrones y Procesamiento de Imágenes	58
7.3.	Nubes.....	59
7.3.1.	Clasificación	60
7.4.	Procedimiento	73
7.4.1.	Pre-Procesamiento de Imágenes	78
7.4.2.	Entrenamiento Asistido	82
7.4.3.	Clasificación de Imágenes	95
7.4.4.	<i>Performance</i> de la Clasificación.....	101
7.4.5.	Cálculo del CCI _{eff}	104
8.	RESULTADOS Y VALIDACIÓN	112
8.1.	Resultados Cualitativos	112
8.2.	Resultados Cuantitativos	129
9.	CONCLUSIONES	147
	GLOSARIO	153
	BIBLIOGRAFIA	156
	A N E X O S	161
	Anexo A: Análisis de <i>Scatter Phase</i>	162
	Anexo B: Resultados CHILE-SR.....	168
	Anexo C: Cálculo de Desviaciones CHILE-SR y BRASIL-SR	178

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4-1: Datos Disponibles en el Archivo Nacional Solarimétrico (Ortega et al, 2010)	22
Tabla 4-2: Ubicación y Períodos de Mediciones de Radiación por la DMC (Ortega et al, 2010)	23
Tabla 5-1: Desviación de Estimaciones de Radiación Global Obtenidas por el Modelo BRASIL-SR (Pereira E. B. et al, 2006)	43
Tabla 5-2: Desviación de Estimaciones de Radiación Directa Normal Obtenidas por el Modelo BRASIL-SR (Pereira E. B. et al, 2006)	45
Tabla 7-1: Tabla de Clasificación de Nubes	62
Tabla 7-2: Rangos de Altura Establecidos donde se Produce la Formación de Nubes....	63
Tabla 7-3: Análisis de Variación Diaria de <i>Scatter Phase</i> . 12:40 hrs. (UCT)	92
Tabla 7-4: Análisis de Variación Diaria de <i>Scatter Phase</i> . 16:40 hrs. (UTC)	92
Tabla 7-5: Análisis de Variación Diaria de <i>Scatter Phase</i> . 20:40 hrs. (UCT)	93
Tabla 7-6: Resumen Resultado de Análisis de <i>Scatter Phase</i>	94
Tabla 8-1: <i>Performance</i> de la Clasificación mediante <i>Cross Validation</i> Considerando Dos Clases para Diferentes Intervalos de <i>Scatter Phase</i>	130
Tabla 8-2: <i>Performance</i> de la Clasificación mediante <i>Cross Validation</i> Considerando Cuatro Clases para Diferentes Intervalos de <i>Scatter Phase</i>	132
Tabla 8-3: Desviaciones en Estimaciones de Radiación Realizadas por CHILE-SR y BRASIL-SR para Santiago	135
Tabla 8-4: Desviaciones de Estimaciones de Radiación Calculados para el día 4 de Enero	145
Tabla 8-5: Desviaciones de Estimaciones de Radiación Calculados para el día 7 de Enero	145

Tabla A- 1: <i>Scatter Phase</i> por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 12:40 UTC (Parte 1).....	162
Tabla A- 2: <i>Scatter Phase</i> por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 12:40 UTC (Parte 2).....	163
Tabla A- 3: <i>Scatter Phase</i> por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 16:40 UTC (Parte 1).....	164
Tabla A- 4: <i>Scatter Phase</i> por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 16:40 UTC (Parte 2).....	165
Tabla A- 5: <i>Scatter Phase</i> por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 20:40 UTC (Parte 1).....	166
Tabla A- 6: <i>Scatter Phase</i> por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 20:40 UTC (Parte 2).....	167
Tabla C- 1: Irradiación Diaria de las Mediciones de la Estación Terrestre en Santiago y de las Estimaciones Realizadas por CHILE-SR y BRASIL-SR (Parte 1)	178
Tabla C- 2: Irradiación Diaria de las Mediciones de la Estación Terrestre en Santiago y de las Estimaciones Realizadas por CHILE-SR y BRASIL-SR (Parte 2)	179
Tabla C- 3: Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación CHILE-SR en Base Horaria para Día: 4 Enero 2011	180
Tabla C- 4: Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación BRASIL-SR en Base Horaria para Día: 4 Enero 2011	180
Tabla C- 5: : Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación CHILE-SR en Base Horaria para Día: 7 Enero 2011	181
Tabla C- 6: Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación BRASIL-SR en Base Horaria para Día: 7 Enero 2011	181

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3-1: Proyección de Crecimiento de la Población Mundial (UNEP, 2009)	10
Figura 3-2: Proyección Consumo Mundial de Energía por Fuente (EIA, 2007)	11
Figura 3-3: Estimación de la Fecha en que se Alcanzará el Peak de Extracción de Petróleo en el Mundo (ASPO, 2004)	12
Figura 3-4: Evolución Aproximada del Porcentaje de Reservas de Petróleo y las Concentraciones de CO ₂ en la Atmósfera a lo largo del Siglo XX (Bullón Miró, 2006)	14
Figura 3-5: Comparación de las Reservas Energéticas Mundiales (Terawatt-año) (Perez & Perez, 2009)	16
Figura 4-1: Evolución del PIB y del Consumo Total de Energía en Chile (CNE, 2007 y Banco Central)	18
Figura 4-2: Producción e Importaciones Primarias (CNE, 2007)	19
Figura 4-3: Desviaciones Máximas y Mínimas de Radiación Anual en Plano Inclinado entre los Años 1997 y 2003. (Pitz-Paal et al., 2007).....	25
Figura 5-1: Diagrama de Flujo del Modelo de Transferencia Radiativa BRASIL-SR (Pereira, Martins, De Abreu, & Rüther, 2006).....	31
Figura 5-2: Comparación de Imágenes del Espectro Visible a las 17:45 hrs. (UTC) y 21:40 hrs. (UTC) del Día 11-01-2011	37
Figura 5-3: Imagen en Canal Visible (izq) e Infrarrojo (der). Día 11-01-2011 a las 16:10 hrs. (UTC)	38
Figura 5-4: Imagen de Máximos (Cielo Cubierto) Generado por el Modelo BRASIL-SR para el Mes de Enero de 2011	40
Figura 5-5: Imagen de Radiación Exportada por BRASIL-SR (izq) e Imagen del Espectro Visible (der) Correspondientes a la Fecha: 07/01/2011 17:40 hrs. (UTC)	42
Figura 5-6: Gráfico de Dispersión entre Estimación de Irradiación Global Diaria por Modelo BRASIL-SR y Mediciones Terrestres en la Zona Sur de Brasil (Pereira E. B. et al, 2006).....	43

Figura 5-7: Gráfico de Dispersión entre Estimación de Irradiación Directa Diaria por Modelo BRASIL-SR y Mediciones Terrestres en la Zona Sur de Brasil (Pereira E. B. et al, 2006).....	44
Figura 6-1: Diagrama de Flujo CHILE-SR.....	47
Figura 7-1: Imagen Canal 1 del Satélite GOES-13 en Formato <i>south_full</i>	51
Figura 7-2: Diagrama del Proceso de Transferencia Radiativa en la Atmósfera Terrestre (Pereira E. B. et al., 2006).....	54
Figura 7-3: Nube de Género <i>Cirrus</i> (Ci).....	64
Figura 7-4: Nube de Género <i>Cirrocumulus</i> (Cc)	65
Figura 7-5: Nube de Género <i>Cirrostratus</i> (Cs).....	65
Figura 7-6: Nube de Género <i>Alto cumulus</i> (Ac)	66
Figura 7-7: Nube de Género <i>Altostratus</i> (As).....	67
Figura 7-8: Nube de Género <i>Nimbostratus</i> (Ns).....	68
Figura 7-9: Nube de Género <i>Stratocumulus</i> (Sc).....	69
Figura 7-10: Nube de Género <i>Stratus</i> (St)	70
Figura 7-11: Nube de Género <i>Cumulus</i> (Cu)	71
Figura 7-12: Nube de Género <i>Cumulonimbus</i> (Cb)	72
Figura 7-13: Representación de los Tipos de Géneros en la Tropósfera	73
Figura 7-14: Diagrama de Flujo Propuesta para la Determinación del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes	75
Figura 7-15: Diagrama de Flujo Pre-Procesamiento de Imágenes.....	79
Figura 7-16: Ejemplo Información Almacenada en Estructura de Datos I.....	81
Figura 7-17: Ejemplo Imágenes del Canal 1 y 4 luego del Pre-Procesamiento.....	82
Figura 7-18: Diagrama de Flujo Entrenamiento Asistido	84
Figura 7-19: Perfil de Temperatura Atmosférica	86

Figura 7-20: Relación entre Clases y Características.....	87
Figura 7-21: Mapa de Características del Entrenamiento Correspondiente a Enero de 2011.....	88
Figura 7-22: Muestra Espacial de Características del Entrenamiento Correspondiente a Enero de 2011	89
Figura 7-23: Variación Diaria de <i>Scatter Phase</i> para Diferentes Localidades de Chile. 12:40 hrs. (UCT)	91
Figura 7-24: Variación Diaria de <i>Scatter Phase</i> para Diferentes Localidades de Chile. 16:40 hrs. (UCT)	91
Figura 7-25: Variación Diaria de <i>Scatter Phase</i> para Diferentes Localidades de Chile. 20:40 hrs. (UCT)	92
Figura 7-26: Variación Horaria de <i>Scatter Phase</i> para Diferentes Localidades de Chile. 15 Enero 2011	93
Figura 7-27: Diagrama de Flujo Clasificación de Imágenes.....	96
Figura 7-28: Mapa Selector de Clases para Rango de <i>Scatter Phase</i> : $[30^{\circ}, 35^{\circ}]$	99
Figura 7-29: Imágenes en Canal 1 y 4 Previas a ser Clasificadas. 2 Enero 2011, 12:40 hrs. (UCT)	100
Figura 7-30: Imagen Clasificada por Clasificador LDA. 2 Enero 2011, 12:40 hrs. (UCT)	101
Figura 7-31: Diagrama de Flujo <i>Performance</i> de la Clasificación	102
Figura 7-32: Diagrama de Flujo Cálculo del CCI_{eff} (Parte 1)	105
Figura 7-33: Diagrama de Flujo Cálculo del CCI_{eff} (Parte 2)	106
Figura 7-34: Diagrama de Flujo Cálculo del CCI_{eff} (Parte 3)	107
Figura 7-35: Ejemplo Resultado de Metodología Implementada para el Cálculo del CCI_{eff} . 30 de Enero de 2011, 16:40 hrs. (UCT)	111
Figura 8-1: Resultado Clasificación de Imagen. 7 Enero 2011, 20:45 hrs. (UCT).....	113
Figura 8-2: Resultados Generales de Clasificación (1).....	114
Figura 8-3: Resultados Generales de Clasificación (2).....	115

Figura 8-4: Resultado de Clasificación para Nubosidad Multicapas. 21 Enero 2011, 16:40 hrs. (UCT)	116
Figura 8-5: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 13:10 hrs. (UCT)	118
Figura 8-6: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 14:40 hrs. (UCT)	119
Figura 8-7: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 16:40 hrs. (UCT)	120
Figura 8-8: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 18:40 hrs. (UCT)	121
Figura 8-9: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 20:45 hrs. (UCT)	122
Figura 8-10: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 1 Enero 2011, 16:10 hrs. (UCT)	125
Figura 8-11: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 2 Enero 2011, 16:10 hrs. (UCT)	126
Figura 8-12: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 15 Enero 2011, 14:40 hrs. (UCT)	127
Figura 8-13: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 29 Enero 2011, 18:40 hrs. (UCT)	128
Figura 8-14: <i>Performance</i> de la Clasificación mediante <i>Cross Validation</i> Considerando Dos Clases para Diferentes Intervalos de <i>Scatter Phase</i>	131
Figura 8-15: <i>Performance</i> de la Clasificación mediante <i>Cross Validation</i> Considerando Cuatro Clases para Diferentes Intervalos de <i>Scatter Phase</i>	133
Figura 8-16: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Global Diaria de CHILE-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre	135
Figura 8-17: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Global Diaria de BRASIL-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre	136
Figura 8-18: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Directa Diaria de CHILE-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre	136
Figura 8-19: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Directa Diaria de BRASIL-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre	137
Figura 8-20: Curvas de Mediciones y Estimaciones de Radiación Global en Base Horaria para la Ciudad de Santiago (a)	140

Figura 8-21: Curvas de Mediciones y Estimaciones de Radiación Global en Base Horaria para la Ciudad de Santiago (b).....	141
Figura 8-22: de Curvas de Mediciones y Estimaciones de Radiación Global en Base Horaria para la Ciudad de Santiago (c).....	142
Figura 8-23: Resultados Intermedios y Finales Obtenidos para Santiago. 4 Enero 2011	143
Figura 8-24: Resultados Intermedios y Finales Obtenidos para Santiago. 7 Enero 2011	144
Figura B- 1: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 13:10 hrs. (UTC)	168
Figura B- 2: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 14:40 hrs. (UTC)	169
Figura B- 3: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 16:40 hrs. (UTC)	170
Figura B- 4: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 18:40 hrs. (UTC)	171
Figura B- 5: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 20:45 hrs. (UTC)	172
Figura B- 6: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 13:10 hrs. (UTC)	173
Figura B- 7: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 14:40 hrs. (UTC)	174
Figura B- 8: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 16:40 hrs. (UTC)	175
Figura B- 9: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 18:40 hrs. (UTC)	176
Figura B- 10: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 20:45 hrs. (UTC)	177

RESUMEN

En el marco del proyecto FONDEF D08i1097 cuyo objetivo es evaluar el recurso solar en Chile, se implementó un modelo físico de estimación de radiación solar para el territorio chileno llamado CHILE-SR, que nace de una adaptación del modelo BRASIL-SR.

El coeficiente de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}) es uno de los parámetros de mayor relevancia en los modelos de estimación de radiación al momento de definir las condiciones atmosféricas particulares de una determinada zona.

Dada la complejidad geográfica y variedad de microclimas de Chile, se identificaron ciertas falencias en la metodología de cálculo del CCI_{eff} implementada en BRASIL-SR.

Considerando esto, el objetivo de esta Tesis es crear una nueva formulación de cálculo para obtener valores del índice de cobertura con un mayor grado de precisión, por consiguiente, la propuesta de CHILE-SR es una metodología basada en una aplicación combinada de procesamiento de imágenes satelitales y reconocimiento de patrones, permitiendo la previa clasificación del tipo de cobertura antes de determinar el valor del CCI_{eff} . Para ello se ha incorporado la información del espectro infrarrojo y el ángulo producido entre el satélite y el sol para cada lugar, permitiendo realizar un análisis bi-espectral considerando las condiciones de luminosidad de las imágenes.

Los resultados de irradiación global diaria incidente para el territorio chileno obtenidos por CHILE-SR para 58 días de análisis mostraron un rRMSE de 7,9% al compararlas con mediciones de una estación terrestre ubicada en Santiago. Los resultados fueron levemente mejores que el obtenido por BRASIL-SR, con un rRMSE de 8,5% producto que cerca del 79% de los días presentaron condiciones de cielo despejado en que ambos modelos tienen un buen desempeño. Sin embargo, al hacer la comparación sólo para un día con presencia de cobertura, se observó que CHILE-SR presenta una mayor estabilidad respecto de la estimación para cielos despejados, mientras que BRASIL-SR subestima los niveles de radiación incidente para las zonas nubosas.

Palabras Claves: (CHILE-SR, Radiación Solar, Nubes, Índice de Cobertura, Imágenes Satelitales, Clasificación)

ABSTRACT

This thesis is part of the FONDEF D08i1097 Project, aimed at assessing the solar resources in Chile. In order to do so, an adaptation of the BRASIL-SR physical model called CHILE-SR was implemented to estimate the amount of solar radiation in the Chilean territory.

The purpose of this thesis was to create a more accurate method to estimate the effective cloud cover index (CCI_{eff}) than the used by the BRASIL-SR model.

The CCI_{eff} is one of the most significant parameters in estimating radiation, because it defines the particular atmospheric conditions in a specific zone.

Given the geographical complexities and the variety of microclimates in Chile, it was possible to identify certain shortcomings in the process used by the BRASIL-SR model to calculate the CCI_{eff} . The method proposed by this thesis solved these inadequacies through an application used by the CHILE-SR model that combined satellite image processing and pattern recognition, allowing the classification of the cloud type before determining the corresponding CCI_{eff} value. To accomplish that objective, the model included the infrared spectrum and the angle between the satellite and the sun for each analyzed location. These new added variables made possible a bispectral analysis integrating the information corresponding to the brightness of the image.

The results of the daily global radiation in Chilean territory obtained by the CHILE-SR model after a 58 day analysis showed an rRMSE of 7.9% when compared to the measurements of a ground station in Santiago. The results were slightly better than the obtained by BRASIL-SR, which had an rRMSE of 8.5% for the same period of time. However, no conclusions can be drawn given the uncertainty deviations due to the lack of days of experiment and the vague representation of measurements of just one station.

Keywords (CHILE-SR, Solar Radiation, Clouds, Cloud Cover Index, Satellite Images, Classification)

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos cien años el planeta se ha estado acercando a pasos agigantados a una severa crisis energética mundial, que cada vez ha tomado mayor relevancia y ha sido el motor de varios organismos internacionales que han puesto sobre la mesa el difícil escenario que se aproxima. Uno de los grandes problemas sobre los que se ha discutido ha sido el crecimiento sostenido que ha tenido el consumo energético mundial, que amenaza con superar la capacidad de producción de energía del planeta, la cual se basa en su mayor proporción, en la quema de combustibles fósiles, definidos como recursos no renovables, limitados y contaminantes.

El aumento de la demanda energética ha estado acompañado muy de cerca por un crecimiento de la población y un importante desarrollo de la economía mundial, en especial a partir del año 1900 con el comienzo de la revolución industrial. Estudios realizados han mostrado una estrecha y directa relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico (Asafu-Adjaye, 2000), el problema de esto es que el desarrollo económico será siempre uno de los objetivos primordiales de todas las naciones. Como consecuencia de ello todas las proyecciones que se han realizado a un plazo de cuarenta o cincuenta años apuntan a que el mundo cada vez necesitará una mayor cantidad de energía para poder cubrir las necesidades de una población más numerosa y más desarrollada.

Actualmente, cerca del 80% de la energía que es consumida se obtiene de la quema de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural. El problema que tienen estos recursos es que son limitados y las reservas con que se cuentan ya están cerca de alcanzar el peak de producción, de hecho, se estima que la humanidad ya ha consumido más de la mitad de las reservas de petróleo que existían hace sólo 100 años (Asafu-Adjaye, 2000), las que se demoraron millones de años en formarse. Por esta razón, los pronósticos indican que en el corto y mediano plazo debiera comenzar un constante decaimiento de la curva de producción energética, adoptando así una tendencia completamente contraria al aumento del consumo energético mundial.

A pesar que se han tomado medidas para el desarrollo de nuevas tecnologías, las tendencias no han cambiado mucho (Dorian, Franssen, & Simbeck, 2006) debido a la fuerte dependencia que existe sobre los combustibles fósiles producto de su alta eficiencia y facilidad de extracción, transporte y utilización. Un ejemplo concreto es el caso del petróleo, que se posiciona como la principal fuente energética en la matriz actual y que abastece alrededor del 95% del sistema de transportes del mundo (Bullón Miró, 2006).

De la mano de la preocupación respecto del agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, ha tomando gran relevancia el cuidado por el medio ambiente y el cambio climático, de hecho se han formado organismos internacionales como el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) que han llevado adelante proyectos de gran envergadura, como por ejemplo el protocolo de Kyoto, que tuvo sus comienzos en el año 1997.

Muchos científicos y organismos como el mencionado recientemente, aseguran que el sostenido incremento en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera se debe al uso excesivo que ha tenido la humanidad con los combustibles fósiles, ya que al quemarlos se libera dicho gas en la atmósfera, siendo uno de responsables del fenómeno conocido como efecto invernadero, siendo calificado como uno de los principales causantes del calentamiento global que ha venido desarrollando el planeta a lo largo de los últimos años.

El difícil escenario que depara el futuro en términos de la capacidad de abastecimiento, sumado a la creciente conciencia global por el cuidado del medio ambiente, ha logrado alinear a la mayoría de los países convirtiendo en una exigencia global el desarrollo de nuevas fuentes de energía que sean sustentables y limpias, con las miras puestas en diversificar cada vez más la matriz energética mundial, con el objetivo de quitarle protagonismo a los combustibles fósiles hasta el punto de lograr prescindir de ellos.

La situación energética de Chile no es diferente de la que vive el resto del mundo, ya que también se ha visto afectado por un aumento en la población y un sostenido crecimiento económico, produciendo así un significativo incremento del consumo

energético de las últimas décadas (Tokman & Huepe M, 2008). Sumado a esta situación, Chile posee además una compleja posición en términos de dependencia energética, ya que más de la mitad de la energía que se consume es importada. El problema de esto es que Chile está afecto a cualquier tipo de problema o fluctuación en términos de abastecimiento energético por parte de los países proveedores, tal como ocurrió hace algunos años con el gas natural traído desde Argentina. Como se mencionó recientemente, depender en términos energéticos de otros países, es depender también en términos económicos dada la directa relación que existe entre ambos, lo cual genera una incertidumbre constante en términos de la estabilidad del desarrollo del país.

Además del complejo escenario en que se encuentra Chile, durante los últimos años ha existido una creciente preocupación por el cuidado del medio ambiente, aprobando en los años 2004 y 2005 dos proyectos de ley conocidos como Ley Corta I y Ley Corta II, cuyo objetivo es potenciar un mercado más competitivo afectando las interacciones entre la generación, transmisión y distribución de energía favoreciendo a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Además, durante el año 2008 se aprobó otra ley que indica que para el año 2024 el 10% de la generación eléctrica deberá ser producida por medio de fuentes renovables no convencionales. Con estas medidas el gobierno ha mostrado la clara intención de fomentar el uso de energías sustentables y limpias con el objetivo de disminuir la dependencia energética del país, además de inducir a tener una matriz energética con menor presencia de combustibles fósiles.

A pesar de estos avances en materia de política energética, no se han visto reacciones importantes, en especial en lo que respecta a la energía solar (Ortega, Escobar, Colle, & de Abreu, 2010). El recurso solar en Chile pareciera ser una buena alternativa debido a la cantidad de radiación disponible y a las condiciones climáticas que presenta especialmente en el norte. De hecho, producto de su ubicación geográfica donde posee el desierto más seco del mundo, se estima que pueda ser una de las mejores regiones para el desarrollo de esta energía dada la densidad del flujo solar calculado por algunos autores (Goswami, Kreith, & Kreider, 2004).

Sin embargo hasta ahora no se han tomado medidas relevantes, ni se han realizado los esfuerzos necesarios para el desarrollo de la energía solar en Chile. Prueba de esto es que en la actualidad no se cuenta con datos de mediciones de radiación solar incidente que sean estadísticamente válidos (Ortega, et al, 2010) que permitan evaluar un proyecto solar de escala mayor. Lo que más preocupa de esta situación es la lejanía en términos de tiempo que se encuentra Chile hasta el momento en que se pueda evaluar un proyecto solar de envergadura, ya que se necesitan al menos siete años de mediciones válidas en base horaria para permitir realizar un estudio de factibilidad económica con índices estadísticos adecuados (Pitz-Paal, Geuder, Hoyer-Klick, & Schillings, 2007).

Considerando la necesidad imperante de conocer en forma precisa la cantidad de recurso solar disponible (Tiba, Fraidenraich, Grossi Gallegos, & Lyra, 2002), existe una alternativa para evaluar su potencial sin necesidad de crear una red de estaciones terrestres de medición por todo el país. Esta consiste en el desarrollo de modelos de estimación de radiación solar incidente mediante el procesamiento de imágenes satelitales. Alternativas de este tipo han sido desarrolladas en algunos países obteniendo resultados bastante buenos. Incluso algunos autores han señalado que este tipo de metodologías presentan importantes ventajas respecto de una red de estaciones terrestres para el mismo fin considerando la densidad de estaciones de medición con las que se debe contar para determinar la radiación en lugares donde no hay puntos de medición (Ceballos, Bottino, & Souza, 2004; Perez, Seals, & Zelenka, 1997).

Algunos ejemplos de los modelos de estimación desarrollados son HELIOSAT (Dagestad & Olseth, 2007), actualmente utilizado en varios países del continente europeo, SUNNY/ALBANY (Perez, Seals, Ineichen, & Menicucci, 1987), desarrollado por la Universidad Estatal de Nueva York y BRASIL-SR (Pereira E. B., Martins, De Abreu, & Rüther, 2006), desarrollado el 2006 para estudiar la radiación solar incidente en el territorio brasileiro.

Teniendo en consideración el crítico escenario chileno en términos de la dependencia energética a la que está expuesto, los desafíos futuros en relación al crecimiento del consumo energético nacional y las opciones factibles para Chile considerando los

recursos disponibles y el tiempo perdido durante los últimos años, el Profesor Rodrigo Escobar Moragas de la Pontificia Universidad Católica de Chile presenta el proyecto FONDEF D08i1097 con objetivo es evaluar el recurso solar en Chile.

El proyecto dirigido por Escobar, que se encuentra actualmente en desarrollo, considera dos etapas. La primera consiste en el desarrollo de un modelo físico de estimación de radiación solar incidente sobre el territorio chileno que será llamado CHILE-SR. El modelo a implementar nace de una adaptación del modelo creado en Brasil (BRASIL-SR) considerando las condiciones particulares de la atmósfera de Chile. La segunda etapa contempla la instalación de algunas estaciones de medición en varios puntos del país que cumplan con las normas internacionales establecidas para la medición de este recurso.

El objetivo final del proyecto consiste en validar las estimaciones de radiación con las mediciones tomadas en todas las estaciones del país para generar mapas de radiación que indiquen la disponibilidad del recurso solar en Chile con un nivel de confianza conocido y acotado, que en conjunto formarán parte del primer Atlas Solar de Chile.

La investigación que se desarrollará en esta Tesis está inmerso en el proyecto FONDEF comentado recientemente. Específicamente consiste en la preparación de uno de los datos de entrada de mayor relevancia en el modelo de transmitancia de CHILE-SR: el índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}), ya que influye en forma directa al balance radiativo en la superficie (Galli, Nardino, Levizzani, Rizzi, & Georgiadis, 2004).

El caso base con que se cuenta es la metodología implementada en BRASIL-SR para el cálculo de este índice, la cual presenta algunas falencias y errores de cálculo que se potencian por causa de las condiciones particulares del clima y geografía de Chile, provocando una desviación en los valores de radiación estimados por el programa.

El objetivo particular al que se orienta esta investigación, es en generar una nueva formulación de cálculo del CCI_{eff} que logre solucionar los principales problemas identificados en BRASIL-SR y así obtener un valor más preciso del índice de cobertura efectiva de nubes que permita generar estimaciones de radiación con un mayor grado de exactitud.

Para medir los alcances y mejoras de la metodología implementada, se utilizarán las mediciones de radiación obtenidas por la estación de medición ubicada en el Campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile, con ellas se realizará una comparación con las estimaciones realizadas por CHILE-SR y se calcularán las desviaciones y errores para el período de análisis correspondiente a los meses de Enero, Febrero y Marzo del 2011.

La formulación propuesta en CHILE-SR para el cálculo del CCI_{eff} se basa en una aplicación combinada del procesamiento de imágenes satelitales y reconocimiento de patrones. Con estas herramientas se realiza una etapa previa de clasificación del tipo de cobertura para cada pixel de la imagen, lo que permitirá reconocer aquellos que presenten condiciones de nubosidad separándolos de los que tengan una condición de cielo descubierto. De esta manera, se podrán identificar los valores de aquellos pixeles que presenten condiciones extremas de cobertura y cielo despejado en función de la luminosidad característica de la imagen a la que pertenezca el pixel, definida por la configuración geométrica entre el sol y el satélite. Luego de obtener dichos valores entre todas las imágenes disponibles para el período de análisis, se procede a calcular el valor del CCI_{eff} .

Para el desarrollo adecuado del método planteado, se incorporará la información proveniente del satélite correspondiente al espectro infrarrojo de radiación y la del ángulo producido entre el satélite y el sol (*scatter phase*). Estas nuevas variables permitirán realizar un análisis estadístico de tipo bi-espectral que considere las condiciones de luminosidad de las imágenes determinada por el *scatter phase*.

Una vez obtenidos los resultados de las estimaciones y el posterior cálculo de las desviaciones y errores correspondientes, se realizará el análisis de los resultados, permitiendo sacar las principales conclusiones a partir del desempeño de la propuesta realizada, y así poder validar o refutar la hipótesis planteada, la cual señala que mediante la formulación propuesta en CHILE-SR se logrará determinar el valor del índice de cobertura efectiva de nubes con un mayor grado de precisión que el calculado por el modelo

BRASIL-SR, permitiendo así obtener estimaciones de radiación solar con un menor grado de error.

El desarrollo de la investigación se encuentra estructurada de la siguiente manera: en primer lugar se revisa el contexto energético mundial y las principales tendencias y lineamientos que han ido marcando el camino de los países para el futuro. Luego de esto se revisará el estado del arte en Chile, identificando la situación energética general y luego en forma particular en lo que respecta a energía solar. Para ello se realizará un levantamiento de datos disponibles de mediciones de radiación, y en base a la situación observada, se verán los posibles caminos a seguir para el desarrollo de energía solar en el país en función de las opciones disponibles que han sido desarrolladas. A continuación se realizará una revisión del estado del arte de algunos modelos de estimación de radiación solar incidente desarrollados por la comunidad científica, haciendo especial énfasis en el modelo BRASIL-SR, que dictará los patrones generales de la metodología que se implementará para Chile. Después de esto, se explicarán las principales propuestas y mejoras que se intentarán desarrollar en la formulación del cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes, para luego detallar paso por paso cada una de las etapas que conforma el método. Finalmente se mostrará el análisis de los resultados intermedios y finales obtenidos, donde se calcularán los errores en las estimaciones realizadas para verificar el cumplimiento de la hipótesis planteada.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

El presente trabajo se enmarca en el proyecto FONDEF D08i1097 dirigido por el Profesor Rodrigo Escobar Moragas, cuyo objetivo es evaluar el recurso solar en Chile.

El proyecto consiste en dos grandes etapas que se desarrollan en forma paralela, la primera es adaptar un modelo de estimación de radiación solar incidente en la superficie terrestre desarrollado por Brasil, que recibe el nombre de BRASIL-SR. De esta manera se pretende crear un modelo particular para Chile llamado CHILE-SR, que utilizará los conceptos básicos desarrollados por Brasil, pero adaptándolo a la realidad del territorio chileno. CHILE-SR es un modelo físico que calcula la transmitancia atmosférica según las condiciones climáticas y el índice de cobertura efectiva de nubes, para luego estimar los valores de radiación solar incidente que alcanzarán la superficie terrestre.

La segunda parte del proyecto consiste en la instalación de estaciones terrestres de medición de radiación solar que estén bajo las normas internacionales para obtener mediciones estadísticamente válidas.

Una vez desarrolladas ambas partes, se procederá a validar las estimaciones satelitales con las mediciones terrestres, de modo de evaluar el recurso solar con un nivel de certeza conocido, y así poder crear mapas de radiación global, directa y difusa para todo el territorio chileno. El objetivo último que persigue el proyecto es crear el primer Atlas de Energía Solar para Chile.

El objetivo particular que persigue la investigación que se presenta en este trabajo de Tesis consiste en la determinación de uno de los datos de entrada de mayor importancia del modelo de transmitancia de CHILE-SR: el índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}). La idea es obtener este valor de la manera más certera posible, para ello se propone una nueva metodología de cálculo que integra el procesamiento de imágenes satelitales y una aplicación básica de reconocimiento de patrones.

Considerando los objetivos planteados para esta investigación, la hipótesis a validar en este trabajo es calcular el índice de cobertura efectiva de nubes mediante una aplicación combinada de procesamiento de imágenes satelitales y reconocimiento de patrones, lo que permitirá obtener un valor más exacto del índice de cobertura efectiva de nubes que

el calculado por el modelo BRASIL-SR, permitiendo obtener valores de estimación de radiación solar con un menor grado de error.

3. CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL

Durante los últimos años ha tomando fuerza una preocupación mundial por el abastecimiento de energía para las futuras generaciones, por esta razón muchos organismos han estado estudiando nuevas fuentes de energía que permitan diversificar en alguna medida la matriz energética mundial. Existen varias aristas que convergen y dan más importancia a esta inquietud global, una de ellas es el sostenido crecimiento de la población, pues en el año 1900 la población mundial era de 1.650 millones de habitantes y actualmente es de casi 7.000 millones. Si bien la tasa de crecimiento de la población ha disminuido, en especial en los países desarrollados, sigue siendo positiva tal como se ve en la Figura 3-1, donde se muestra la proyección del crecimiento de la población hasta el año 2050.

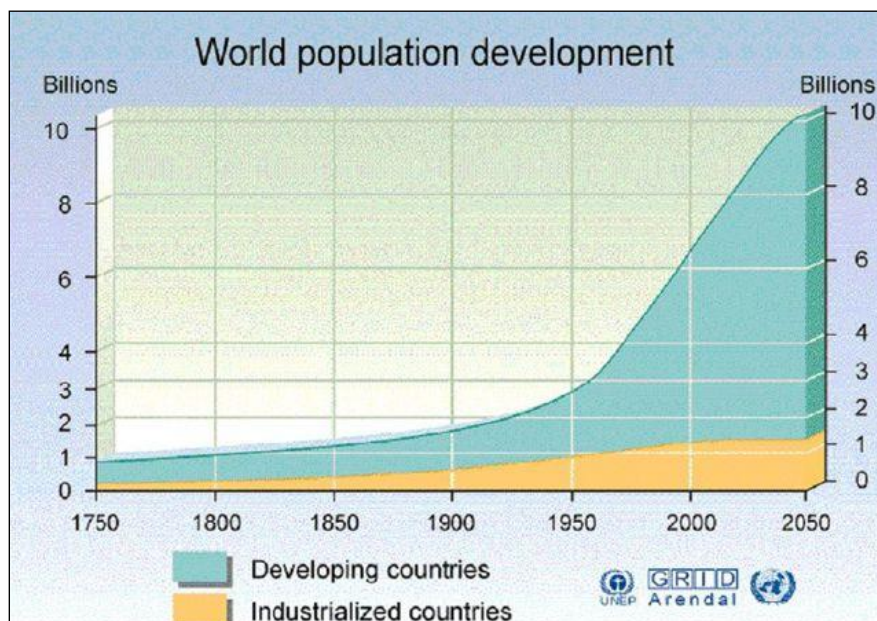


Figura 3-1: Proyección de Crecimiento de la Población Mundial (UNEP, 2009)

El problema de este gran crecimiento de la población, en especial a partir del año 1900, es que también aumentó en forma importante el consumo de energía.

Acompañado del crecimiento de la población mundial y ayudado con los avances tecnológico desde la revolución industrial a principios del siglo XX, empieza el desarrollo de la economía mundial, cuyo crecimiento es uno de los objetivos primordiales de todas las naciones y tiene una estrecha y directa relación con el consumo de energía (Asafu-Adjaye, 2000).

El sostenido aumento del consumo energético durante los últimos cien años ha estado completamente dominado por el uso de los combustibles fósiles: petróleo, carbón y gas natural. En la Figura 3-2 se puede observar el aumento del consumo energético del último tiempo y también las proyecciones realizadas para los próximos veinte años, donde se aprecia que actualmente más del 80% del consumo mundial de energía es en base a estos combustibles, situación que no será muy diferente en el futuro si no se toman medidas importantes a nivel mundial (Dorian, Franssen, & Simbeck, 2006).

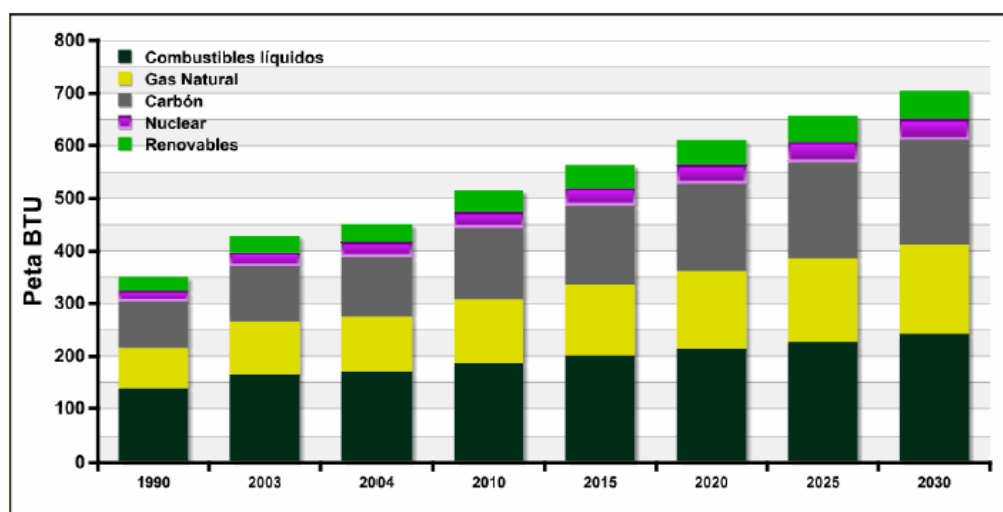


Figura 3-2: Proyección Consumo Mundial de Energía por Fuente (EIA, 2007)

Los combustibles fósiles son un recurso único y se consideran muy eficientes, ya que son fáciles de extraer, transportar y utilizar. A pesar de su abundante disponibilidad en un comienzo, estos recursos son limitados y no renovables, ya que necesitan millones de años para formarse. El problema de esta situación, es que la humanidad se ha hecho completamente dependiente de ellos, de hecho el petróleo es la fuente de energía que

mueve el 95% del transporte mundial (Bullón Miró, 2006). Tal ha sido el consumo de este recurso, que la humanidad en tan sólo cien años, ha usado cerca de la mitad del petróleo existente, el cual necesitó de millones de años para formarse.

Se han realizado numerosos estudios que señalan que una vez consumida la mitad de las reservas de petróleo del planeta, el ritmo de extracción comenzaría a descender. A pesar que no se puede conocer con exactitud la fecha del peak de la producción de petróleo, la mayoría de las estimaciones más confiables lo sitúan en algún momento entre los años 2004 y 2010, tal como se puede apreciar en la Figura 3-3. Considerando esto, el mundo se debiera enfrentar a esta difícil situación durante el presente siglo.

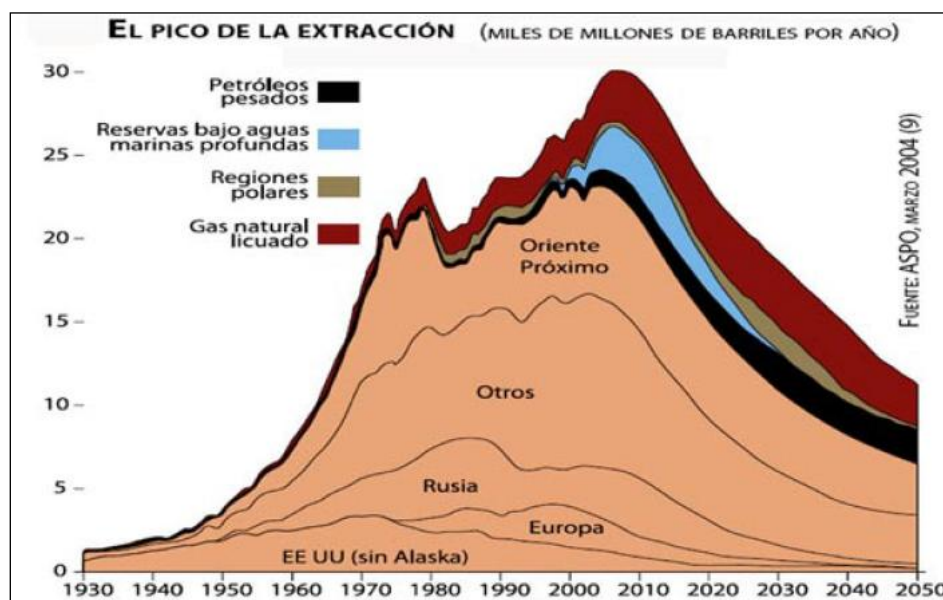


Figura 3-3: Estimación de la Fecha en que se Alcanzará el Peak de Extracción de Petróleo en el Mundo (ASPO, 2004)

Los combustibles fósiles, que son los recursos que siempre se han utilizado para el mantenimiento del sistema económico y del modo de vida de la población, podrían ser insuficientes para suplir la demanda energética en los próximos años. Esta situación podría afectar en forma considerable a los mercados y a las relaciones internacionales, ya que la energía es el motor de todos los países, por lo que al haber escasez podrían generarse importantes conflictos entre las diferentes potencias. La situación expuesta

anteriormente, considerando todos sus factores asociados, es la que se conoce actualmente con el nombre de Crisis Energética Mundial.

Los primeros síntomas a esta crisis se han hecho notar, ya que en los últimos años se ha manifestado una progresiva disminución en la producción de petróleo que no ha podido equipararse con el ritmo ascendente de la demanda por dicho recurso, lo cual se ha traducido en un notable ascenso del precio del crudo junto con una elevada volatilidad, situación que se irá acentuando cada vez más cuando comience a bajar el nivel de producción. Algunos geólogos, considerando el crecimiento de la población y del consumo energético, han concluido que el suministro de los combustibles fósiles va a empezar a decaer en el corto y mediano plazo, empezando por el petróleo y el gas natural.

Finalmente existe una idea que ha tomado mucha importancia a nivel mundial, que refuerza la búsqueda de nuevas formas de abastecimiento energético que puedan sustituir el uso de combustibles fósiles, la cual habla del cuidado del medio ambiente y del impacto negativo que causa la quema de combustibles fósiles.

La energía de los combustibles fósiles se extrae mediante una simple combustión, pero como resultado de ella, se generan gases ricos en materiales orgánicos que terminan siendo depositados en la atmósfera. La presencia de carbono en dichos gases genera una reacción con la atmósfera formando CO_2 (dióxido de carbono) que es un gas que produce el fenómeno de efecto invernadero.

Muchos científicos y organismos internacionales, tales como el IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático), aseguran que el incremento detectado en las concentraciones de los gases producto de su combustión no tiene precedentes y son uno de los principales responsables del calentamiento global que está afectando el mundo hace algunos años alterando en forma progresiva la capacidad de la atmósfera para regular el clima y la subsistencia de las especies. En la Figura 3-4 se intenta mostrar las tendencias que han seguido el consumo de combustibles fósiles mediante el decaimiento de las reservas de petróleo, y el aumento de las concentraciones de CO_2 en la atmósfera durante el siglo XX. Las tendencias que se observan son opuestas y apoyan la opinión

que el excesivo uso de los combustibles fósiles son el principal responsable del aumento de las concentraciones de este gas de efecto invernadero en las capas bajas de la atmósfera.

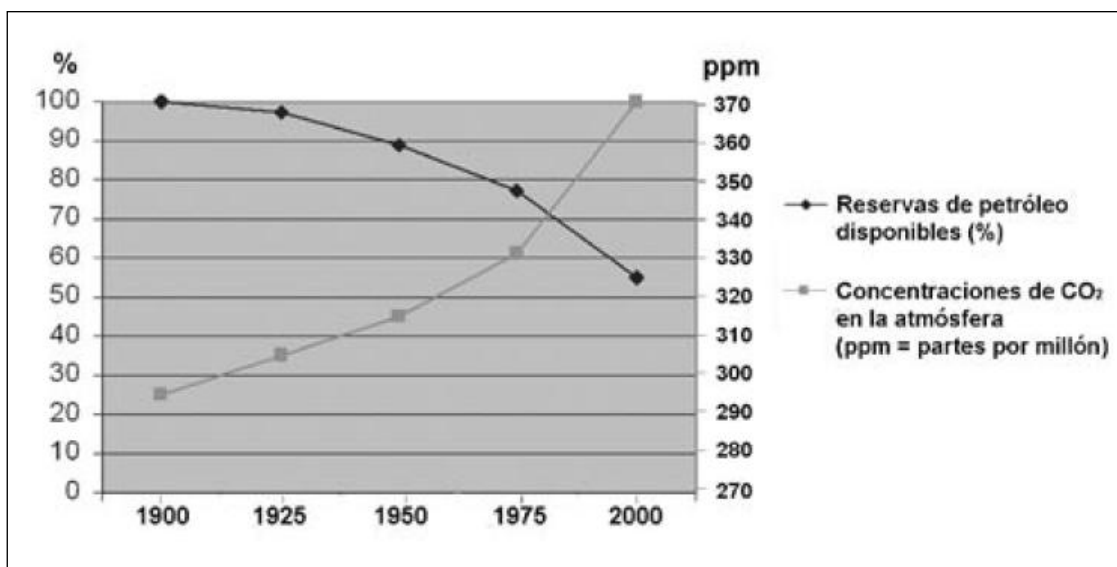


Figura 3-4: Evolución Aproximada del Porcentaje de Reservas de Petróleo y las Concentraciones de CO₂ en la Atmósfera a lo largo del Siglo XX (Bullón Miró, 2006)

Todos los antecedentes expuestos convergen a una conciencia global, que ha tomado bastante fuerza en los últimos años, para reducir el uso de combustibles fósiles buscando sustitutos en otras fuentes de energía. Un ejemplo concreto es el Protocolo de Kyoto adoptado por primera vez el año 1997 en Kyoto, Japón, que consiste en un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global.

Una de las primeras energías que destaca al buscar alternativas a la quema de combustibles fósiles es la que se extrae de la fisión nuclear, definida como “energía limpia”, pero tiene numerosas dificultades asociadas. El hecho de no tener soluciones al tratamiento y almacenamiento de los residuos que emiten radioactividad durante miles de años, aumenta las probabilidades de tener accidentes nucleares ya sea por errores de gestión o por ser un blanco de posibles atentados terroristas. A pesar que pudiera

manejarse con exigentes medidas de seguridad, el uranio, recurso utilizado para el desarrollo de esta energía, también es limitado y tiene un horizonte de vida acotado (Bullón Miró, 2006), por lo que esta solución podría ser adecuada para el mediano plazo. De la mano del desarrollo de esta energía se encuentra la fusión nuclear, que es la fuente de energía que podría resolver todos los problemas energéticos del futuro, pero las complejidades tecnológicas que se deben superar para hacer factible esta opción son tan complejos que hasta el momento no los han podido superar, sin embargo, hace algunos años se está trabajando para desarrollar este tipo de energía que podría abastecer las necesidades energéticas mundiales por muchos años.

Otras fuentes de energía que han sido el foco de atención durante el último período son las energías renovables, como son la solar, eólica, mareomotriz, geotérmica y biocombustibles entre otras. Todas estas energías denominadas como renovables, sin considerar las centrales hidroeléctricas, representan cerca del 1% de la producción energética mundial. Por lo tanto, su participación en la matriz energética mundial es prácticamente despreciable, sin embargo, algunos investigadores ven en estas energías un gran potencial pensando en una combinación de todas ellas bajo el supuesto que en el mediano plazo debieran ser económicamente competitivas dada la crítica situación de los combustibles fósiles que se avecina.

La Figura 3-5 muestra una comparación del consumo energético mundial del año 2009, con las reservas conocidas de los recursos fósiles y nucleares, y con el potencial anual de las alternativas renovables, representado en la magnitud del área de las circunferencias de cada uno.

En la figura se aprecia que las fuentes de energías renovables no son equivalentes en potencial, siendo muy superior el recurso solar disponible. La imagen muestra que si se pudiera explotar sólo una parte de este podría ser una gran contribución a la matriz energética mundial. Paralelamente la energía eólica podría suplir gran parte de los requerimientos energéticos mundiales si se pudiera aprovechar la mayor parte de su potencial, mientras que las otras alternativas difícilmente podrían lograr equipararse con la demanda energética.

Al fijar la atención sobre los recursos no renovables, el carbón se ubica en la primera posición en términos de reservas, sin embargo no son infinitas, ya que alcanzaría sólo para algunas generaciones si continúa siendo la fuente energética predominante. La energía nuclear representa una situación semejante, tal como se dijo algunos párrafos atrás, ya que las reservas de uranio son importantes pero no podrá reemplazar en su totalidad a los combustibles fósiles por muchos años.

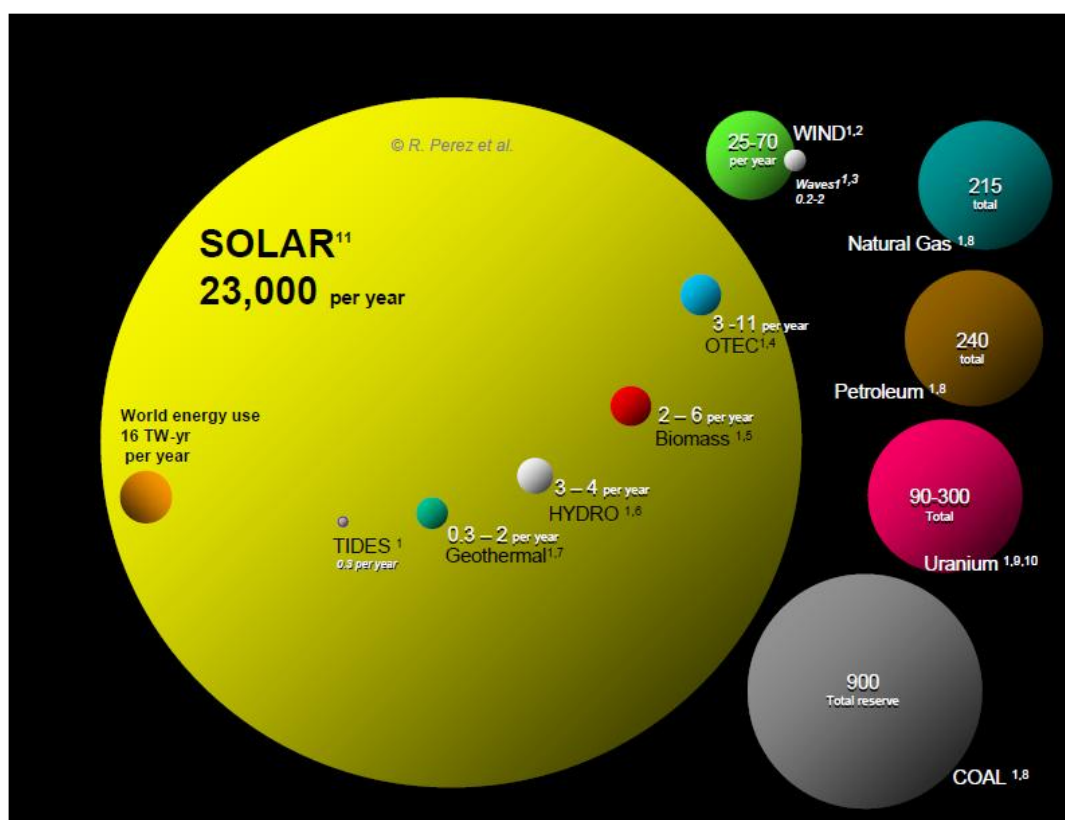


Figura 3-5: Comparación de las Reservas Energéticas Mundiales (Terawatt-año) (Perez & Perez, 2009)

Perez y Perez (2009) concluyen en su trabajo, que el futuro energético del planeta podría basarse en gran medida en la energía solar, por supuesto considerando el desarrollo de las tecnologías necesarias que permitan conocer, administrar y gestionar en forma adecuada el recurso. Por ejemplo, si en un futuro cercano se lograran desarrollar proyectos de gran escala, considerando una eficiencia en la conversión energética de un

30%, se necesitarían menos de un 1% del área de los continentes emergentes para abastecer la demanda energética mundial proyectada para los próximos treinta o cuarenta años (Perez, 2008)

El rol potencial que puede jugar la energía solar es muy importante no sólo a gran escala, sino que también como herramienta de calefacción, refrigeración, iluminación y producción de electricidad a menor escala, incluso en forma particular y descentralizada (Perez, 2006). La razón por la que no se desarrollaron tecnologías para aprovechar este recurso en el pasado, es porque no eran económicamente viables, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado nuevas y emergentes tecnologías que podrían ser competitivas con las soluciones actuales. Una de ellas son pequeñas antenas que realizan una conversión directa a electricidad con eficiencias de conversión de 80%-90%. También se han optimizado los ciclos termodinámicos permitiendo reducir en forma importante los costos y, como ejemplo de nuevas aplicaciones desarrolladas, destaca un sistema de oxidación solar fotovoltaico para la limpieza de aguas residuales, de agua potable, del suelo y del aire (Goswami, Vijayaraghavan, & Tamm, 2004).

4. CONTEXTO ENERGÉTICO DE CHILE

La energía juega un papel esencial en la vida social y económica de todos los países y en especial en aquellos en vías de desarrollo como Chile, cuyo objetivo es mejorar el nivel de vida de la población. Para que esto sea posible el país debe mantener un crecimiento económico sostenido que no es posible sin tener acceso a una energía segura y con costos adecuados. El funcionamiento de la sociedad depende por completo de la disponibilidad y acceso a diversos tipos de energía para permitir el desarrollo normal de actividades cotidianas y productivas.

Chile ha tenido resultados macroeconómicos muy exitosos en los últimos años, manteniendo tasas de crecimiento positivas y una inflación baja y controlada, que se ha traducido en un aumento del ingreso per cápita y en una disminución de los índices de pobreza. Estos buenos resultados del país han provocado un crecimiento significativo del consumo energético en las últimas décadas, aumentando en un 2,8% promedio anual en los últimos 10 años¹ (Tokman & Huepe M, 2008), siguiendo de cerca la evolución del PIB tal como se ve en la Figura 4-1.

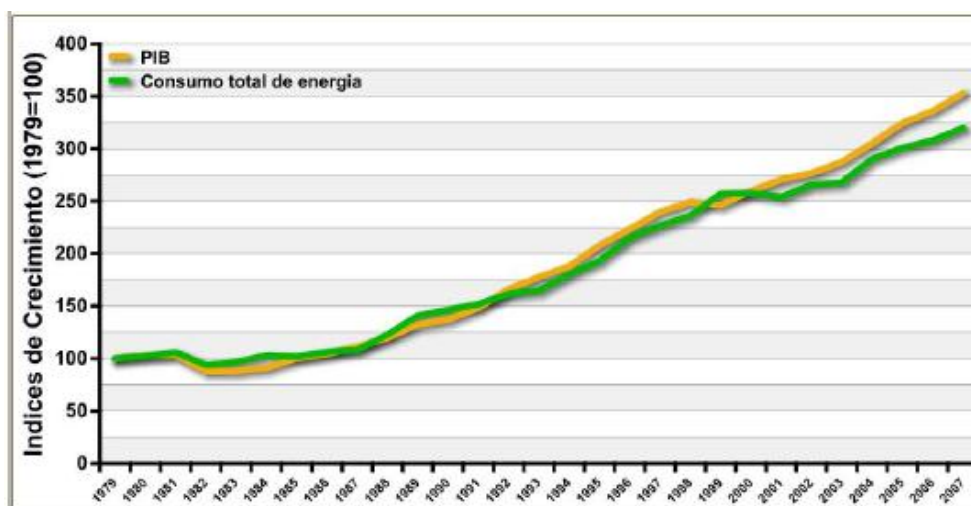


Figura 4-1: Evolución del PIB y del Consumo Total de Energía en Chile (CNE, 2007 y Banco Central)

¹ Se refiere a los últimos 10 años considerando como referencia el año 2007.

Las proyecciones que se han realizado indican que el consumo final de energía seguirá manteniendo una tendencia al alza producto del desarrollo económico del país, con un promedio anual de 5,4% hasta el año 2030, en que los energéticos de mayor relevancia en el consumo son el diesel, los combustibles derivados del petróleo, la electricidad y la leña (Tokman & Huepe M, 2008).

El crecimiento económico y el consumo energético proyectado para Chile, lo sitúa en una posición más compleja de la que vive actualmente en términos energéticos, ya que existe una presencia importante de fuentes energéticas importadas que someten al país a una exposición considerable no sólo a riesgos de suministro, sino también al alza y volatilidad de los precios internacionales, que no dependen de las políticas, decisiones y situaciones internas del país.

La Figura 4-2 muestra cómo a partir del año 1994 ocurre un difluencia, donde la proporción entre el creciente consumo explicada por las importaciones aumentó el nivel de dependencia del país, llegando a producir sólo un tercio de la energía consumida en el país. Dicha dependencia frente a fuentes externas se agrava por la presencia de casi un único proveedor, como el caso del gas natural que proviene en su totalidad de Argentina, por otra parte el crudo que se importó el año 2007 provino desde Sudamérica, Angola y Turquía y el carbón fue traído desde cuatro grandes fuentes: Colombia, Indonesia, Australia y Canadá (Tokman & Huepe M, 2008).

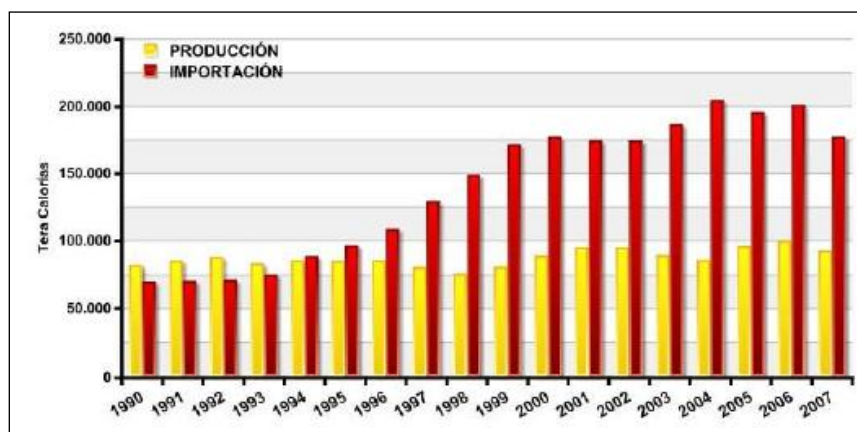


Figura 4-2: Producción e Importaciones Primarias (CNE, 2007)

En los últimos años Chile se ha visto expuesto a diferentes problemas en términos de suministro y estabilidad de las fuentes energéticas al ser en su mayor medida recursos importados. Por esta razón el país ha avanzado en términos de adoptar una conciencia de desarrollo sustentable en términos de energía para así permitir mantener el progreso económico y la competitividad internacional.

Sumado a lo anterior, se ha visto en las últimas décadas un aumento en la preocupación por temas ambientales y por uso del territorio, alineándose con los esfuerzos internacionales en el marco del cuidado del medio ambiente y del calentamiento global. Bajo este contexto en los años 2004 y 2005 se aprobaron la Ley Corta I y la Ley Corta II², cuyos objetivos fueron potenciar un mercado competitivo en la generación de electricidad, realizando pequeñas modificaciones que regulan la interacción entre la generación, transmisión y distribución a usuarios finales favoreciendo a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Tres años más tarde, se aprueba una ley de fomento a las ERNC en Chile³, la cual señala que se deberá generar un 10% de la energía con medios de generación renovables no convencionales. Esta ley comienza a regir desde el 1 de enero de 2010 con un 5% hasta el año 2014, y a contar del año 2015, se aumenta un 0,5% anual, hasta llegar al 10% el año 2024.

4.1. Base de datos disponible de mediciones terrestres del recurso solar

Los incentivos que han sido ofrecidos para el desarrollo de ERNC por parte del gobierno chileno han despertado el interés de algunos grupos llevándolos a desarrollar algunos sistemas para el aprovechamiento de la energía eólica, geotérmica, hidroeléctrica y de biocombustibles, sin embargo, no se han visto reacciones en lo que compete a la energía solar. Hasta el momento se han considerado aplicaciones a pequeña escala y para el uso de casas particulares aprovechando la energía que proviene del sol para el calentamiento de agua para fines domésticos, o bien, a través de paneles fotovoltaicos en algunas sistemas eléctricos rurales de difícil acceso. Considerando todas las aplicaciones de

² Ley 19.949 (marzo de 2004) y ley 20.018 (mayo de 2005)

³ Ley 20.257 (abril de 2008)

energía solar a lo largo de Chile, hasta el año 2009 sólo había una superficie de colección de menos de 10.000 m² (Ortega, Escobar, Colle, & de Abreu, 2010), por lo que la contribución de energía solar a la matriz se considera despreciable hasta dicho año.

La energía solar pareciera ser una muy buena alternativa para Chile debido a la cantidad de radiación solar disponible en el país asociado con las condiciones climáticas. Ambos factores son mejor percibidos que en otros lugares donde actualmente funcionan sistemas de transformación de energía solar. Particularmente el Desierto de Atacama, ubicado en la zona norte del país, es catalogado como el desierto más árido del planeta presentándose como una de las mejores regiones para el desarrollo de la energía solar. Esta condición está respaldada por varios datos de densidad de radiación solar a partir de varias fuentes (Goswami, Kreith, & Kreider, 2004; Duffie & Beckman, 2006). A pesar de ello no se han visto iniciativas serias para el desarrollo de este recurso renovable en el país.

4.1.1. Archivo Nacional Solarimétrico (ANS)

Los primeros estudios para la evaluación del recurso solar en Chile se realizaron en los años sesenta impulsados por la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso. Para las primeras mediciones se utilizaron 90 piranómetros y dispositivos de Campbell-Stokes abarcando un período de alrededor de veinte años. El problema de los datos de radiación obtenidos es que la mayoría tiene un nivel de incertidumbre desconocido en la exactitud de las mediciones y de la metodología empleada para construir los promedios mensuales, por lo que no se ajustan a las normas internacionales para mediciones de radiación, haciéndolas insuficientes para poder realizar la evaluación de un proyecto solar de escala mayor (Ortega et al, 2010).

Actualmente toda la base de datos de radiación solar se encuentra bajo la custodia del Archivo Nacional Solarimétrico (ANS) ubicado en Valparaíso en la Universidad Técnica Federico Santa María. En la Tabla 4-1 se muestra el resumen de los datos disponibles en el ANS, donde se puede ver que la mayoría de las estaciones no fueron

operadas en forma continua, habiendo algunas que presentan años incompletos de medición.

Con los datos disponibles de las 89 estaciones se realizaron mapas de radiación para promedios mensuales utilizando el método de Kriging (Davis, 1986) para interpolar los datos entre las estaciones. A partir del año 2009 se comenzaron a procesar mediciones de nuevas estaciones en colaboración con el ANS.

4.1.2. Dirección Meteorológica de Chile (DMC)

La Dirección Meteorológica de Chile dispone de una serie de piranómetros ubicados en algunas de sus estaciones a lo largo de todo el país que son calibrados y correctamente mantenidos en forma periódica. Las mediciones de estas estaciones pueden ser descargadas directamente desde la página web de la institución⁴. En la Tabla 4-2 se muestra el nombre de las estaciones, ubicación y fechas en que los datos fueron registrados por los piranómetros.

Tabla 4-1: Datos Disponibles en el Archivo Nacional Solarimétrico (Ortega et al, 2010)

Years for which data is available from the National Solarimetric Archive, for selected ground stations.																										
Table of some Solarimetric Station Location and the state of Data Series between 1961 and 1984.																										
Locations	Lat	Long	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
1 Arica	-18.50	-70.17			•	•	•	•	•	•	✓	✓	✓	✓	✓	✓	•									
2 Iquique	-20.22	-70.15					✓	✓	•		✓		•	✓	✓	✓	•									
3 Chuquicamata	-22.32	-68.93	•	✓	•	•																				
4 Calama	-22.47	-68.92												•	✓	✓	✓	•								
5 San Pedro de Atacama	-22.92	-68.18						•	✓	✓	✓	✓	•	•	✓	✓	✓									
6 Antofagasta	-23.47	-70.43										•	✓	✓	✓	✓	✓	•								
7 Copiapó	-27.35	-70.33			•	✓	✓	✓	✓	•	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	•								
8 Vallenar	-28.58	-70.77												•	✓	✓	✓	•								
9 La Serena	-29.90	-71.25												•	✓	✓	✓	•								
10 Ovalle	-30.57	-71.18			•	✓	•	•	•	•	✓	•	•	✓	•											
11 Quillota	-32.17	-71.27																	•	•	•	✓	•	•	•	•
12 Valparaíso	-33.03	-71.60	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13 Santiago	-33.57	-70.68													•	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14 San Fernando	-34.60	-71.00						✓	•	✓	✓	✓	•	•	•	•	•									
15 Talcahuano	-36.62	-73.10					•	•	✓	•	•															
16 Concepción	-36.83	-73.03			•	•	•	•	•	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	•									
17 Pucón	-39.27	-71.97						•	•	•	•	•	✓	✓	✓	✓	•									
18 Alto Palena	-43.62	-71.78							•	✓	•	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ – Complete year of measures; • – Uncomplete year of measures.

✓ — Complete year of measures; • — Uncomplete year of measures.

⁴ <http://www.meteochile.cl>

Tabla 4-2: Ubicación y Períodos de Mediciones de Radiación por la DMC (Ortega et al, 2010)

Station	Latitude (S)	Registry period
Arica	18° 21	Dec 95 to May 2002/Nov 2006 to date
Calama	22° 29	Jan 96 to Dec 99/Oct 2004 to date
Antofagasta	23° 26	Jan 88 to date
Copiapó	27° 18	Jan 88 to Oct 2003
Atacama	27° 15	Jul 2006 to date
Vallenar	28° 35	Jan 88 to Oct 2003
Pudahuel	33° 23	Jan 88 to Dec 2005
Quinta Normal	33° 26	Jan 2006 to date
Hidango	34° 06	Jun 89 to Mar 2004
Curicó	34° 58	Sept 95 to 2007
Cauquenes	35° 58	Jan 90 to Jan 2001
Concepción	36° 46	Jan 92 to date
Los Angeles	37° 24	Jan 96 to Dec 2001
Temuco	38° 45	Jan 96 to Dec 2001
Puerto Montt	41° 25	Jan 95 to date
Chaiten	42° 55	Jan 96 to May 2001
Coyhaique	45° 35	Mar 89 to date
Punta Arenas	53° 00	Jan 98 to date

4.1.3. Estación terrestre CNE-GTZ

La Comisión Nacional de Energía (CNE) solicitó ayuda a la agencia de cooperación técnica alemana GTZ⁵ para evaluar una serie de recursos renovables en Chile. Como respuesta a esta iniciativa en el año 2008 se instalaron tres estaciones de medición del recurso solar en Pozo Almonte, San Pedro de Atacama y Crucero, todas ellas ubicadas en el Desierto de Atacama. Estas estaciones cuentan con equipos de buena calidad y son operados por una empresa consultora independiente. Los datos de estas estaciones se publican en un informe mensual y están disponibles en el sitio web de la CNE⁶. Los reportes mensuales incluyen promedios horarios, diarios y mensuales.

A pesar de tener todo el apoyo para tener una estación que cumpla con todos los requisitos necesarios para obtener mediciones confiables y precisas, se cometieron errores importantes en el diseño, ubicación y operación en la estación ubicada en Pozo Almonte, lo cual hace dudar sobre la validez de las mediciones que se realizan (Ortega, et al, 2010).

⁵ Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)

⁶ <http://www.cne.cl>

4.2.La importancia de una base de datos estadísticamente adecuada

Como se expuso en el punto anterior, en Chile se cuenta con una variedad de lugares donde hay datos de radiación, el problema es que la mayoría de las mediciones con que se dispone son de variada e incierta calidad además de no tener una continuidad en el tiempo. Adicionalmente existe una amplia región en el Desierto de Atacama, considerado como uno de los lugares con mayor potencial en el país, donde no hay estaciones de medición de radiación solar.

Tener un programa de medición de radiación solar para el país no es tarea fácil, ya que involucra muchos costos y requiere de un largo período de adquisición de datos por numerosas estaciones terrestres funcionando en forma conjunta, las que se encuentran sujetas a problemas cotidianos y particulares como fallas en los sensores, o el simple hecho que existe la necesidad de realizar limpiezas periódicas a los instrumentos para garantizar una medición precisa.

La situación de Chile en lo que respecta al conocimiento del recurso solar para llevar a cabo acciones concretas para su desarrollo no se alinea en absoluto con las políticas energéticas que se expusieron en el capítulo 4, ya que cuenta con datos de radiación que no sirven para la evaluación de proyectos de mediana y gran escala. Esto producto de la incerteza en los procedimientos y mediciones, las que no se podrán recuperar.

El problema raíz que genera esta situación es que el estudio de un proyecto de gran escala necesita ser evaluado económicamente con un nivel de certeza adecuado para estudiar su viabilidad, lo cual exige tener un conocimiento certero de la cantidad de recurso solar disponible. Por esta razón, conocer en forma precisa el potencial solar no es sólo una necesidad, sino que es un imperativo para dar paso al uso y difusión de la energía solar (Tiba, Fraidenraich, Grossi Gallegos, & Lyra, 2002).

La importancia de tener una base de datos del recurso solar en el largo plazo se debe a que puede existir una variabilidad importante de radiación entre los diferentes años, por lo que es imprescindible determinar un año típico solar que permita conocer la cantidad de radiación en el largo plazo con un nivel de confianza adecuado. Para lograr esto, se necesitan entre siete y diez años de mediciones en base horaria para poder determinar la

disponibilidad de este recurso con un nivel de confianza del 5% (Pitz-Paal, Geuder, Hoyer-Klick, & Schillings, 2007). Esta exigencia estadística se aprecia en forma gráfica en la Figura 4-3, donde se representa el promedio de radiación anual en plano horizontal para los períodos comprendidos entre los años 1997 y 2003.

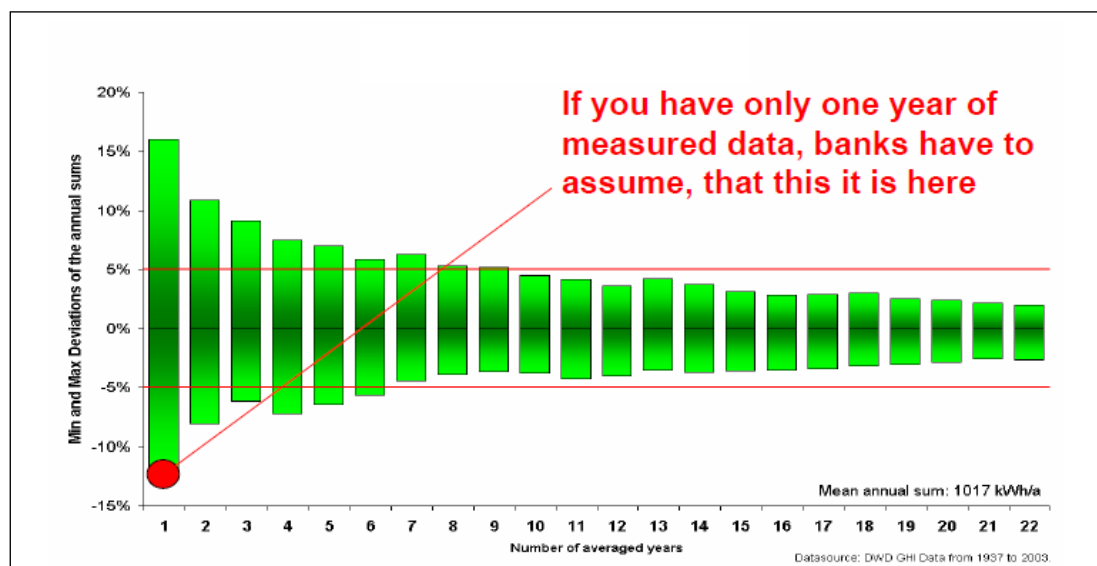


Figura 4-3: Desviaciones Máximas y Mínimas de Radiación Anual en Plano Inclinado entre los Años 1997 y 2003. (Pitz-Paal et al., 2007)

4.3. Estimaciones satelitales de la radiación solar en superficie

Al considerar la precaria situación de Chile en cuanto a la base de datos existentes de mediciones terrestres de radiación solar, una buena alternativa a evaluar es la que se ha desarrollado en algunos países, que consiste en la estimación de la radiación solar incidente en la superficie terrestre a partir del análisis de imágenes satelitales. Una de las principales ventajas de las estimaciones satelitales es su alta resolución espacial, ya que permiten cubrir un área mucho mayor en comparación con una red de estaciones terrestres. Incluso se ha demostrado que las estimaciones de radiación que utilizan imágenes satelitales presentan una mejor precisión para un radio de 34 km (Ceballos, Bottino, & Souza, 2004; Beyer et al., 2004; Perez et al., 2002), respecto a la

interpolación y extrapolación de mediciones terrestres cuando las estaciones se encuentran en un radio superior a los 50 km (Perez, Seals, & Zelenka, 1997; Vignola, Harlan, Perez, & Kmiecik, 2007).

Sumado a lo anterior, existe una base de datos de imágenes satelitales que tiene archivos de más de veinte años de antigüedad (Pitz-Paal et al., 2007), por lo que sería posible estimar el recurso solar de años pasados, permitiendo en cierta manera recuperar información que no se capturó cuando se debió haber hecho. Adicionalmente, el estudio de imágenes satelitales se presenta como una alternativa de mucho menor costo que las mediciones terrestre, ya que no depende de una mantención constante de los sensores.

5. MODELOS IMPLEMENTADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR

Para estimar la radiación solar en la superficie, se han desarrollado algunos modelos que pueden ser clasificados como estocásticos o físicos. Los primeros usan información de tipo estadística para determinar relaciones empíricas entre las mediciones de radiación solar incidente, y las condiciones atmosféricas y climatológicas locales. El problema de este tipo de metodología es que en general son formulaciones válidas sólo para regiones próximas de la zona donde se realizó el estudio, en cambio, los modelos físicos buscan resolver la ecuación de transferencia radiativa que describe matemáticamente los procesos físicos que ocurren en la atmósfera, teniendo la ventaja que son válidos para aplicarse en cualquier región. Sin embargo, presentan la dificultad de necesitar datos de ciertas variables necesarias para la parametrización de las interacciones que se producen entre la radiación solar y los componentes atmosféricos. Ejemplo de estas variables son la cobertura de nubes y ciertos perfiles atmosféricos, como aerosoles, vapor de agua y ozono entre otros.

La variable que hace referencia a la cobertura de nubes es calculada por la mayoría de los modelos mediante el procesamiento de imágenes satelitales. Como ejemplos de ello se pueden mencionar los modelos HELOISAT, SUNNY/ALBANY y BRASIL-SR.

En los capítulos siguientes se comentarán las principales características y el contexto en que se desarrollan estos modelos, poniendo especial énfasis en BRASIL-SR, ya que será el que dictará los principios físicos de la metodología a implementar en Chile.

5.1. HELIOSAT

El modelo utilizado en Europa para la creación de mapas de radiación solar a partir de estimaciones que recibe el nombre de HELIOSAT, utiliza las imágenes del espectro visible de alta resolución con una resolución temporal horaria, que son capturadas por el satélite geoestacionario METEOSAT.

En la actualidad se encuentra en funcionamiento una edición mejorada de la versión original del HELIOSAT, que integra el conocimiento adquirido de las contrastaciones

realizadas entre las estimaciones y mediciones terrestres, que luego de un proceso de calibración, se utilizan como variables de entrada para nuevas simulaciones. A pesar de mantener los mismos principios físicos que en el modelo original, su metodología es conocida como una de tipo semi-empírica, ya que necesita actualizar continuamente las constantes utilizadas a partir de la retroalimentación de sus mismos resultados (Dagestad & Olseth, 2007).

La idea básica que rige el modelo HELIOSAT consiste en la modelación separada de ciertas variables atmosféricas y la nubosidad. En primer lugar es calculada la radiación incidente para cielo despejado y cubierto, para luego, en forma separada, calcular el índice de cobertura a partir de la reflectancia relativa de las imágenes del espectro visible del METEOSAT.

Para calcular el índice de cobertura realiza una normalización de los valores tomando en consideración la posición relativa del satélite y el sol, obteniendo así los valores de reflectancia normalizados (ρ^*), a partir de los cuales calcula directamente el valor del índice de cobertura C_{eff} de la siguiente manera:

$$C_{eff} = \frac{\rho^* - \rho^{*clear}}{\rho^{*cloud} - \rho^{*clear}} \quad (\text{Ecuación 5-1})$$

Donde ρ^{*clear} y ρ^{*cloud} son los valores de reflectancia mínimo y máximo para el pixel de interés que se obtiene a partir de una serie de imágenes del canal visible (Beyer, Constanzo, & Heinemann, 1996).

El índice de cobertura es una de las componentes más importantes del algoritmo, ya que cuantifica las propiedades reflectivas de la atmósfera a partir de las cuales se realizan los cálculos de radiación global.

El error cuadrático medio obtenido por este modelo, para un período de seis meses en que fueron abarcadas las estaciones de primavera-verano en el hemisferio norte, fue de un 15,5% (Rigollier, Lefreve, & Wal, 2004).

5.2. SUNNY/ALBANY

La Universidad Estatal de Nueva York ubicada en Albany desarrolló un modelo de estimación de la radiación solar que bautizó con el nombre de SUNNY/ALBANY. Este modelo es definido como uno de tipo estocástico, ya que se basó en el modelo de Kasten para la radiación en condiciones de cielo despejado (Perez, Seals, Ineichen, & Menicucci, 1987).

SUNNY/ALBANY realiza los cálculos de radiación global utilizando fórmulas desarrolladas a partir de variables de tipo estadísticas, que reciben como parámetros de entrada el índice de cobertura de nubes, calculado a partir de imágenes satelitales del espectro visible capturadas por el satélite geoestacionario GOES-12; la radiación global extraterrestre, modificada por el modelo de Kasten; el ángulo solar del zenit; el índice de turbidez, obtenido desde la radiación directa para condiciones de cielo despejado; la presencia de aerosoles en la atmósfera; la tasa de absorción de gases atmosféricos y la presencia de vapor de agua y ozono en la atmósfera.

Los resultados obtenidos para el modelo estadístico SUNNY/ALBANY, luego de ser contrastados con mediciones terrestres, presentaron una desviación semejante a la obtenida con la metodología implementada en HELIOSAT (Beyer, Constanzo, & Heinemann, 1996), resultando valores del error cuadrático medio relativo (rRMSE) entre un 20% y 30%.

5.3. BRASIL-SR

Durante los últimos años se ha estado estudiando el recurso solar disponible en el extenso territorio brasileiro, no sólo a raíz de la crisis energética mundial y del acelerado calentamiento global que ha estado afectando al planeta durante los últimos siglos, sino porque la comunidad científica de Brasil considera que conocer el flujo de radiación solar incidente es trascendental en muchas áreas de las actividades que se desarrollan a diario. Ejemplos de esto son la climatología, meteorología, arquitectura, ingeniería y algunas áreas del sector agrícola entre varios otros.

Al considerar las potenciales ventajas que podría tener conocer el recurso solar, el año 2006 se publicó el primer Atlas de Energía Solar Brasileiro, desarrollado por un grupo de investigadores del CPTEC (*Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*) y del INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*) en el marco del Proyecto SWERA (*Solar and Wind Energy Resources Assessment*). En dicha publicación se mostraron los resultados obtenidos de la disponibilidad de recurso solar sobre todo el territorio brasileiro, utilizando un modelo de transferencia radiativa desarrollado por ellos al que llamaron BRASIL-SR. El modelo recibe como variables de entrada algunos datos climatológicos y diez años de información extraídos desde imágenes provenientes de satélites geoestacionarios, para luego ser validados y corregidos con datos recolectados por varias estaciones de mediciones terrestres distribuidas dentro del país.

BRASIL-SR es un modelo físico que permite estimar la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre integrando dos enfoques para resolver la ecuación de transferencia radiativa, utilizando para ello tanto datos climatológicos como imágenes satelitales (Martins, 2001).

En la Figura 5-1 se muestra un diagrama de flujo de las etapas que constituyen el modelo BRASIL-SR, las permiten estimar la radiación solar en la superficie terrestre. El procedimiento se puede dividir en tres fases, la primera, señalada por el recuadro de color rojo, consiste en la preparación de los datos de entrada provenientes de las imágenes satelitales, que tiene por objetivo determinar la cobertura efectiva de nubes para cada una de las imágenes disponible en el banco de imágenes satelitales que se disponga. En forma paralela se desarrolla la segunda fase, identificada en la Figura 5-1 con el recuadro azul, que consiste en la preparación de los datos de entrada climatológicos correspondientes a la zona de interés determinada por el alcance y resolución de las imágenes satelitales. Su objetivo es producir los datos climatológicos de albedo de superficie, altura, temperatura, humedad relativa y visibilidad.

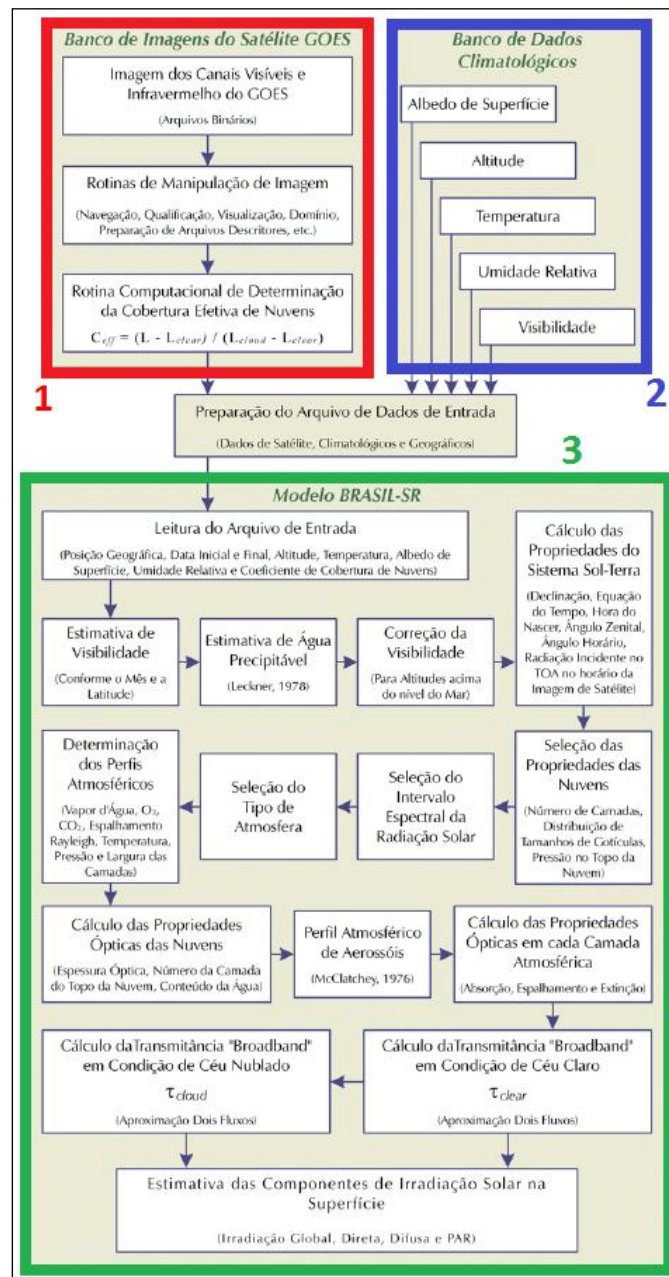


Figura 5-1: Diagrama de Flujo del Modelo de Transferencia Radiativa BRASIL-SR (Pereira, Martins, De Abreu, & Rüther, 2006)

Finalmente, luego de haber preparado los datos de entrada necesarios, se procede a la última etapa del programa, señalado con el rectángulo verde en la Figura 5-1, que consiste en la el cálculo de la radiación solar en superficie para las componentes global,

directa y difusa, mediante la solución de la ecuación de transferencia radiativa utilizando una técnica bifocal propuesta por Pereira et al. (2000) que es mucho menos exigente en términos computacionales y de tiempo de procesamiento por ser una solución aproximada. Este procedimiento surge como respuesta a otras metodologías que se han desarrollado, que logran determinar la solución exacta a la ecuación, pero utilizando formulaciones complejas como armónicos esféricos, ordenadas discretas, la técnica de Monte Carlo y diferencias finitas (Lenoble, 1985), pero tienen el problema que exigen una gran demanda de procesador en los computadores y un gran tiempo de cálculo, factores que no se alinean con los objetivos del proyecto, ya que los cálculos se deben realizar en forma iterativa para poder obtener estimaciones de radiación a lo largo de un período extenso de tiempo.

La primera y tercera etapa del modelo BRASIL-SR se desarrolla bajo tres importantes supuestos:

- La cobertura de nubes es el principal factor que afecta la transmitancia, por dicha razón el modelo utiliza valores climatológicos promedios de las variables atmosféricas para estimar las propiedades ópticas de la atmósfera.
- La radiación solar incidente en la parte superior de la atmósfera distribuye en forma lineal entre dos condiciones atmosféricas extremas: cielo completamente cubierto y completamente despejado.
- Se asume una relación lineal entre la radiación global en la superficie y la radiación que llega a la parte superior de la atmósfera luego de ser reflejada.
- Se asume que toda la nubosidad identificada sobre el territorio brasilero corresponde a la de tipo *Altostratus*⁷.

El segundo supuesto mencionado fue concluido por Gambi, (1998) al intentar describir y avalar un modelo físico que permitiera describir el comportamiento de la radiación solar al atravesar la atmósfera.

Considerando los supuestos mencionados, la radiación global en superficie Φ_g se ha definido de la siguiente manera:

⁷ Género asignado a un cierto tipo de nubosidad que será descrito en el capítulo 7.3.1.1.

$$\Phi_g = \Phi_0 \{ (\tau_{\text{clear}} - \tau_{\text{cloud}})(1 - \text{CCI}_{\text{eff}}) + \tau_{\text{cloud}} \} \quad (\text{Ecuación 5-2})$$

Donde Φ_0 es la radiación solar extraterrestre, CCI_{eff} es el índice de cobertura efectiva de nubes y τ_{clear} y τ_{cloud} son los valores de la transmitancia atmosférica para condiciones de cielo despejado y cubierto respectivamente.

De esta forma la radiación global incidente sobre la superficie se estima a partir de dos componentes independientes, τ_{clear} y τ_{cloud} . El primero se determina en función del albedo de superficie, del ángulo solar del zenith⁸ y del espesor óptico de la atmósfera, mientras que el segundo se calcula a partir de del ángulo solar del zenith, del espesor óptico de la atmósfera y de las propiedades ópticas de las nubes. Estos valores pueden ser estimados a partir de las parametrizaciones de los modelos físicos utilizando los datos climatológicos.

El modelo BRASIL-SR utiliza 135 intervalos en el espectro de longitud de onda corta (0-4 μm), definiendo 30 capas atmosféricas para resolver la ecuación de transferencia radiativa y así obtener los valores de τ_{clear} y τ_{cloud} .

El cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes se explicará con detalles en el próximo capítulo, ya que es el punto central de la investigación de la presente tesis, y es en la etapa donde se propondrán nuevas metodologías para lograr un cálculo más preciso de dicho parámetro.

El valor de la radiación difusa se obtiene de la resta entre la radiación global en superficie con la radiación directa en plano horizontal (DNI). Esta última se calcula bajo el supuesto que la absorción de radiación por parte de las nubes es insignificante y que el efecto de la dispersión de la radiación producida por las nubes puede ser sumado a la transmitancia para condiciones de día despejado. De esta manera, la componente directa de la radiación en plano inclinado es calculada de la siguiente manera:

$$\text{DNI} = \Phi_0 \cdot \tau_{\text{atm-dir}} \cdot \tau_{\text{cloud-dir}} \quad (\text{Ecuación 5-3})$$

⁸ Ángulo formado entre la posición del sol y una línea imaginaria con dirección normal a la superficie terrestre de referencia.

Donde $\tau_{\text{atm-dir}}$ representa la transmitancia de la componente directa de radiación solar para condiciones de cielo despejado, que hace referencia al proceso de radiación en relación a la presencia de gases atmosféricos y aerosoles, cuyo valor es estimado mediante la solución de la ecuación de transferencia radiativa. Y $\tau_{\text{cloud-dir}}$ es la transmitancia con presencia de nubosidad, estimada a partir del índice de cobertura efectiva de nubes utilizando la aproximación propuesta por Stuhlmann, Rieland y Raschke (1990):

$$\tau_{\text{cloud-dir}} = \frac{1-\tau_c}{\beta-\tau_c} \quad (\text{Ecuación 5-4})$$

Donde β representa el espesor de cada capa atmosférica, que al igual que los perfiles de temperatura y concentraciones de gases, se determina en función de la temperatura en superficie considerando una atmósfera estandar; y el valor de τ_c se define de la siguiente manera:

$$\tau_c = \begin{cases} (CCI_{eff} + 0,05) & \text{si } CCI_{eff} < 0,95 \\ 1 & \text{si } CCI_{eff} \geq 0,95 \end{cases} \quad (\text{Ecuación 5-5})$$

En el capítulo siguiente se describirá la metodología empleada por el modelo BRASIL-SR para el cálculo del coeficiente de cobertura efectiva de nubes con el objetivo de comprender los principios básicos sobre los que se desarrollada e identificar sus principales falencias cuando se aplica para las condiciones particulares Chile. Las debilidades a identificar de esta etapa del procedimiento son el motor del presente trabajo de investigación, que busca desarrollar una metodología que permita obtener resultados más precisos adaptados a las características específicas del país.

5.3.1. Cálculo del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes (CCI_{eff})

El índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}) es uno de los principales factores atmosféricos en el modelo desarrollado por Brasil para la estimación de las propiedades ópticas de la atmósfera. Para determinar su valor, se utilizan imágenes satelitales provenientes de la base de datos generadas por el satélite GOES-EAST. Los satélites

GOES, de la sigla en inglés: *Geostationary Operational Environmental Satellite*, son las herramientas claves que permiten el trabajo del organismo americano llamado *National Weather Service* (NWS) que está bajo la administración de la agencia científica llamada *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), la cual se enfoca en el estudio de las condiciones de los océanos y de la atmósfera, preocupada de alertar sobre posibles peligros climáticos entre otras funciones.

Los satélites GOES, como bien lo señala su sigla en inglés, son geoestacionarios y generan información relativamente continua que permite realizar el seguimiento de tormentas y el pronóstico del tiempo, además de aportar a muchos ámbitos en la investigación meteorológica.

En relación con la modelación de la nubosidad implementada por el modelo BRASIL-SR, se realizan los siguientes supuestos para obtener el índice de cobertura efectiva de nubes:

- La configuración micro-física de las nubes es representada por el tamaño y distribución de las gotas de agua del tipo de nube.
- Las nubes atenúan en forma directa la radiación directa proveniente del sol.
- Las nubes se consideran homogéneas en su configuración, tanto en dirección vertical como horizontal.
- La totalidad de la cobertura de nubes está formada por un solo tipo de nubosidad: *Altostratus*⁹, esto debido a que es el tipo de formación nubosa más característica de toda la zona que abarca el territorio brasileiro (Warren, Hahn, London, Chervin, & Jenn, 1986).

Para determinar el CCI_{eff} , el modelo BRASIL-SR ocupa sólo la información extraída del canal 1 del satélite correspondiente al espectro visible, que se encuentra entre las longitudes de onda 0,5 y 0,7 μm , que es expresada en porcentaje de albedo con valores entre 0% y 100%. Las imágenes que utilizan, poseen una resolución espacial de 10 x 10 km^2 aproximada por pixel, y las procesan con una resolución temporal de media hora. Dada esta resolución temporal, para cada mes se procesan alrededor de 450 imágenes.

⁹ En el capítulo 7.3 se definirán con detalles los tipos de nubosidad existentes.

El objetivo de esta etapa es realizar un estudio por mes que permita determinar la cobertura efectiva de nubes por pixel para cada una de las imágenes, otorgándoles un valor entre cero y uno, valor que no sólo muestra la fracción de cielo que presenta nubosidad, sino que además da información acerca de las propiedades ópticas de la atmósfera. En palabras simples y considerando los casos extremos, un valor de cobertura efectiva de nubes igual a cero representa una condición atmosférica para dicho pixel sin presencia de nubosidad, y un valor igual a 1 se interpreta como la condición para un cielo completamente cubierto.

Considerando que todas las imágenes de un mes son del mismo tamaño y que cada pixel corresponde al mismo lugar geográfico dada la geoestacionalidad del satélite, el procedimiento que se realiza para determinar el CCI_{eff} se describe a continuación:

Para cada pixel se estudian todas las imágenes del mes y se guarda el valor mínimo para cada uno de ellos, que corresponde a un valor que representa un pixel con condiciones atmosféricas sin presencia de nubosidad. Posteriormente se realiza lo mismo, pero registrando el valor máximo correspondiente al momento en que se registró un cielo totalmente cubierto para dicho pixel. Por consiguiente, el resultado de esta etapa previa son dos imágenes del mismo tamaño que la original, en que guarda los valores mínimos “ L_{clear} ” y máximos “ L_{cloud} ” registrados para cada pixel durante el período de estudio. A continuación, para cada una de las imágenes se determina la cobertura efectiva de nubes para cada pixel:

$$CCI_{eff(i,j)} = \frac{L_{(i,j)} - L_{clear(i,j)}}{L_{cloud(i,j)} - L_{clear(i,j)}} \quad (\text{Ecuación 5-6})$$

Donde $L_{(i,j)}$ corresponde al valor del pixel (i,j) para una de las imágenes y $L_{clear(i,j)}$ y $L_{cloud(i,j)}$ son los valores mínimos y máximos que se obtuvo para el pixel (i,j) entre todas las imágenes del mes.

5.3.2. Falencias del Cálculo del CCI_{eff} por el modelo BRASIL-SR

Una de las falencias más importantes que se han determinado del procedimiento que lleva a cabo el modelo BRASIL_SR, es que no considera la inclinación del sol respecto

de la posición del satélite, ya que para el cálculo de los valores máximos y mínimos compara imágenes del amanecer, medio día y atardecer sin tomar en consideración este aspecto. El problema de esta situación, es que la iluminación de las imágenes varía mucho dependiendo la hora del día a la que correspondan. En la Figura 5-2 se muestra un ejemplo concreto de este problema en que se compara una imagen del canal visible del día 11 de Enero de 2011 a las 17:45 hrs. (UTC) con una del mismo día a las 21:40 hrs. (UTC).

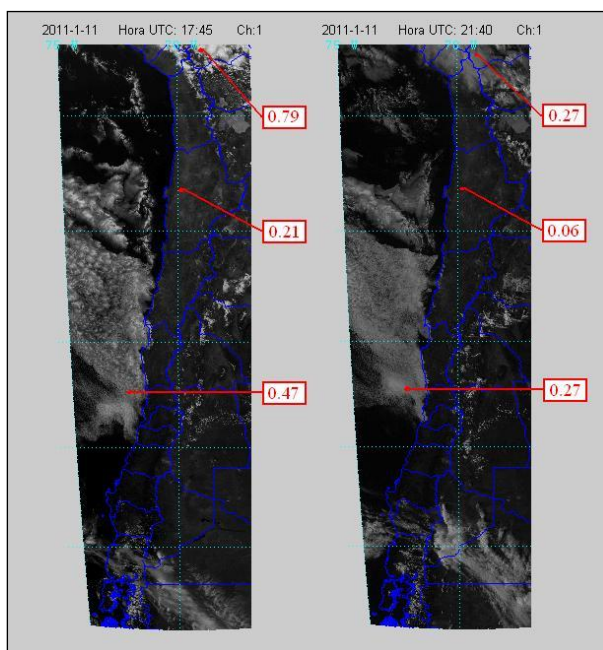


Figura 5-2: Comparación de Imágenes del Espectro Visible a las 17:45 hrs. (UTC) y 21:40 hrs. (UTC) del Día 11-01-2011

En la Figura 5-2 se identifican tres puntos de la imagen, mostrando el valor correspondiente al mismo pixel, pero en una situación donde el sol se encuentra con un ángulo distinto respecto del satélite, ya que en la imagen de la izquierda, correspondiente a las 14:45 hrs. hora local, posee un ángulo menor produciendo así una imagen más iluminada que la de la derecha, que corresponde a las 18:40 hrs. hora local, cuando ya ha comenzado el atardecer. Se aprecia que en los tres puntos de control, el valor del albedo es bastante menor, siendo siempre menos de la mitad para un mismo tipo de nubosidad.

Hay que considerar que han pasado cuatro horas y las nubes se han movido, sin embargo el tipo de nubosidad sigue siendo el mismo y por más que haya variado, la cobertura real no es la mitad, sino que debiera ser semejante. Un claro ejemplo es el punto del centro, en que el pixel está absolutamente despejado en las dos imágenes, pero en la de la izquierda aparece con un valor de 0,21 y en la de la derecha con uno de 0,06. Esto producirá que en la imagen de la izquierda, al momento de procesarse, aparezca como un pixel con algo de nubosidad, cuando en realidad no hay nubes presentes.

Otra falla que se ha identificado ocurre cuando hay nubosidad en multi-capas, por ejemplo cuando se presentan como se muestra en la Figura 5-3, donde se observa la imagen correspondiente al 11 de Enero de 2011 a las 16:10 hrs. (UTC) en los canales visible (imagen de la izquierda) e infrarrojo (imagen de la derecha). El canal infrarrojo, correspondiente al canal 4 del satélite, muestra la radiación para longitudes de onda entre los 10,2 y 11,2 μm , y da información termal del tope de las nubes, o de la superficie en caso de estar despejado.

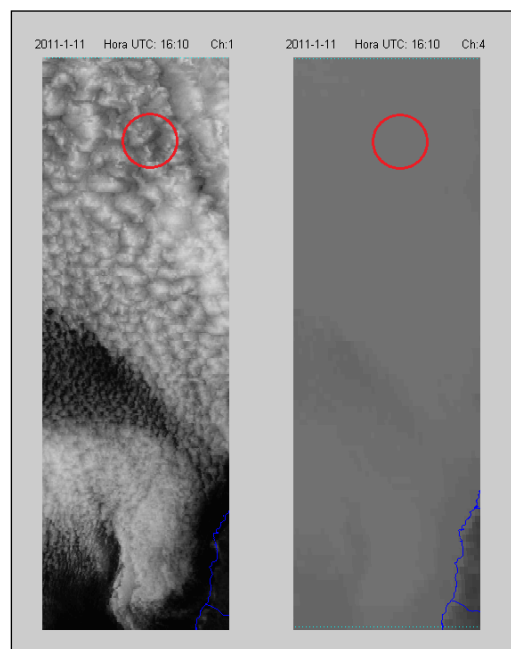


Figura 5-3: Imagen en Canal Visible (izq) e Infrarrojo (der). Día 11-01-2011 a las 16:10 hrs. (UTC)

Al observar la región destacada por el círculo, se aprecia en la imagen del canal visible partes más oscuras entre las nubes, lo que da a intuir, si sólo se utilizara este canal, que existe nubosidad parcial y que hay pixeles donde alcanza a pasar la radiación entre las nubes. Sin embargo al utilizar la información del canal infrarrojo se puede apreciar que no existen dichas zonas despejadas, ya que este canal está dando información que ese sector es uniforme en términos de presencia de nubosidad, y que el tope superior de las nubes se encuentra dispuesto en forma homogénea. La explicación a esta situación es que en la imagen de la izquierda (canal 1) las partes oscuras que se ven corresponden a sombras que proyectan nubes de capas superiores sobre las que se encuentran debajo de ellas, por lo que esos lugares deben ser definidos como cubiertos a pesar que la imagen del canal visible proponga algo diferente.

Otra falencia que se ha descubierto en el procedimiento utilizado por el modelo BRASIL-SR para la determinación de la cobertura efectiva de nubes es que le asigna el valor máximo de cobertura (L_{Cloud}) a algún pixel correspondiente a una condición de cielo completamente despejado. Esta situación se da con bastante frecuencia en la zona norte de Chile, especialmente en la temporada de verano, donde ocurre que ciertos pixeles no presentan nubosidad durante todo un mes.

El problema descrito anteriormente ocurre cuando se realiza la búsqueda del valor máximo de nubosidad para un determinado pixel entre todas las imágenes del mes que no presenta en ningún momento presencia de nubosidad, entonces se escogerá como pixel completamente cubierto a aquel que tenga el mayor valor sin percatarse que no presenta nubosidad. De esta manera, el valor de máxima nubosidad que asignará el programa a esa posición corresponderá a un pixel completamente despejado.

En la Figura 5-4 se aprecia en forma gráfica la situación anteriormente descrita, donde se muestran los valores máximos obtenidos para el territorio chileno durante el mes de Enero. La zona destacada muestra las regiones del norte de Chile que no presentaron nubosidad durante todo el mes, por esta razón los valores que debieron haber registrado los momentos en que se registró la máxima cobertura han almacenado en forma errónea valores con ausencia de cobertura de nubes.

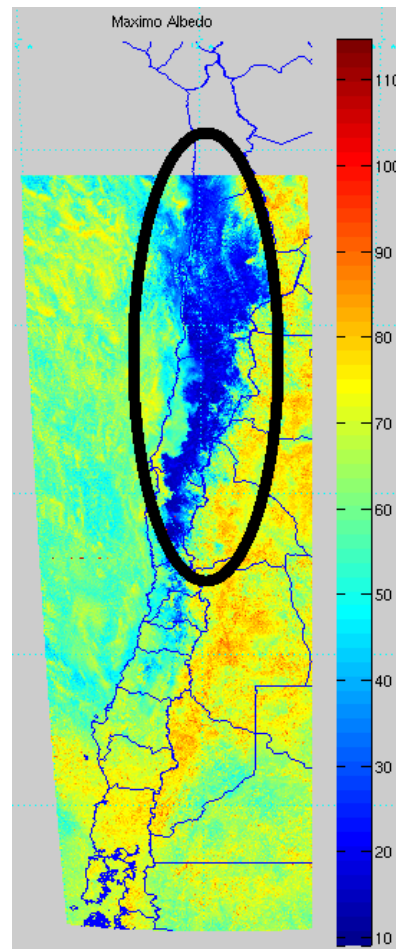


Figura 5-4: Imagen de Máximos (Cielo Cubierto) Generado por el Modelo BRASIL-SR para el Mes de Enero de 2011

El error recientemente descrito producirá que se normalicen todos los valores encontrados en el mes entre el valor erróneo y el mínimo causando una subestimación de la radiación, ya que el pixel correspondiente de todas las imágenes del mes será calificado siempre con un nivel de nubosidad mayor al que realmente presenta. Esta situación no sólo se presenta cuando no ha habido cobertura durante todo el mes, ya que el modelo está pensado bajo el supuesto que durante un mes todos los pixeles, al menos una vez, presentarán una condición de cobertura absoluta, sin embargo esto no ocurre en muchos casos, ya que existen zonas en las que el nivel de cobertura que se presenta no

es de gran magnitud, por lo que en estos casos también se le asignará un valor de cobertura máxima a una condición que en la realidad no representa esa realidad, por lo que, al igual que en el caso anterior, se producirá una subestimación de la radiación calculada por el modelo para dicho pixel durante todo el mes.

Basándose en la misma problemática, el efecto contrario también puede ocurrir cuando haya un pixel que durante todo el mes no presente una condición atmosférica sin cobertura de nubes. Esta situación también se da en Chile, en especial en la zona sur en los meses de invierno, donde un pixel puede que nunca se presente totalmente despejado. Este escenario provocará que para todas las imágenes del mes ese pixel sea catalogado con menos nubosidad de lo que realmente presenta, traducándose en una sobrestimación de la radiación calculada por el modelo para dicha zona.

En la Figura 5-5 se muestra un claro ejemplo de la situación expuesta anteriormente, donde se observa una imagen del mapa de radiación exportada por BRASIL-SR y una del espectro visible del día 7 de Enero de 2011 a las 17:40 hrs. (UTC). Se puede apreciar que en la zona norte, destacada en ambas imágenes, se producen unos saltos extraños en la radiación mostrando pixeles con baja radiación al lado de otros con elevados valores. Esta situación corresponde al caso en que el modelo asigna erróneamente el valor de máxima cobertura a un pixel despejado, confundiendo el albedo terrestre con presencia de nubosidad, lo cual provoca inevitablemente una subestimación de la radiación en dichos pixeles tal como se observa en la imagen de la izquierda, ya que sobrestima en todo momento el índice de cobertura de nubes por la forma de cálculo de dicho valor. Se puede concluir inmediatamente que estos pixeles muestran valores erróneos al observar la imagen de la derecha, donde se ve claramente que en toda la zona norte del país existe una condición de cielo descubierto, por lo tanto la radiación debiera ser homogénea para pixeles cercanos y no presentar saltos como los que se muestran.

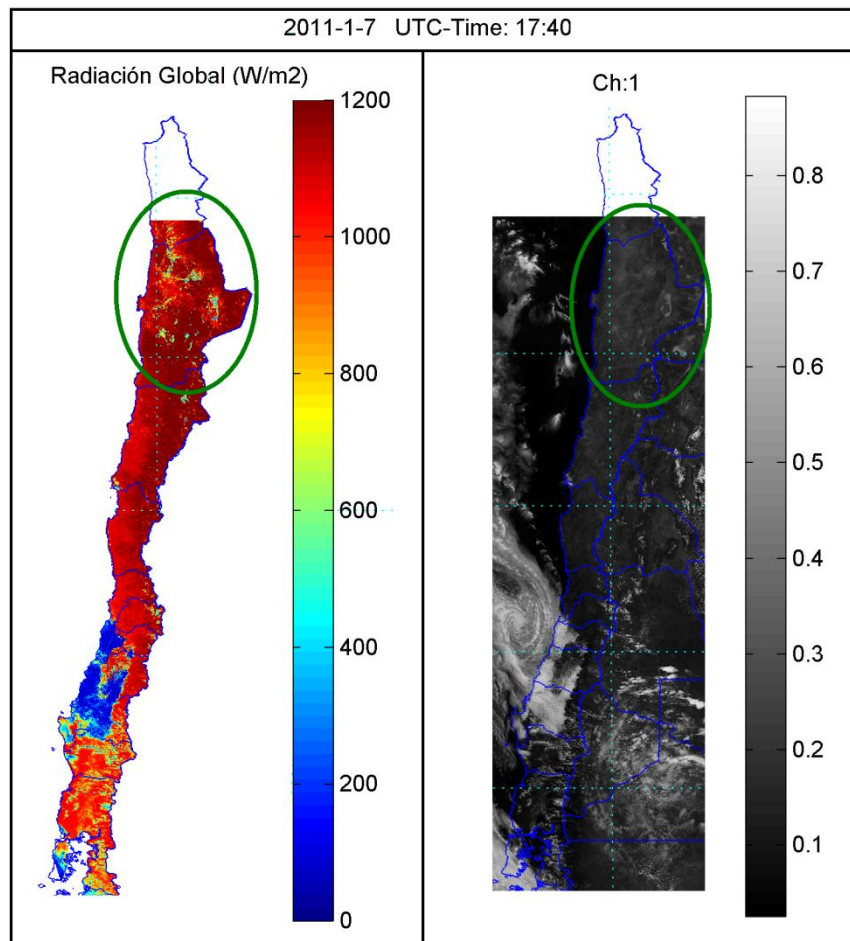


Figura 5-5: Imagen de Radiación Exportada por BRASIL-SR (izq) e Imagen del Espectro Visible (der) Correspondientes a la Fecha: 07/01/2011 17:40 hrs. (UTC)

5.3.3. Validación de Datos del Modelo BRASIL-SR

Con el objetivo de calcular el nivel de confianza de los resultados obtenidos y así validar el modelo desarrollado, se realizó una evaluación de las desviaciones de la radiación estimada en la superficie terrestre respecto de las mediciones de radiación solar de 106 estaciones terrestres ubicadas en cinco zonas representativas del territorio brasileiro: norte, noreste, centro-oeste, sudeste y sur.

En la Figura 5-6 se muestra el gráfico de la dispersión de datos al comparar las estimaciones realizadas por el modelo BRASIL-SR y los datos de radiación global

medidos por las estaciones terrestres pertenecientes a la zona sur de Brasil. Este procedimiento se realizó para cada una de las zonas mencionadas para comparar y calcular las desviaciones entre las estimaciones y las mediciones, cuyos resultados se muestran resumidos en la Tabla 5-1.

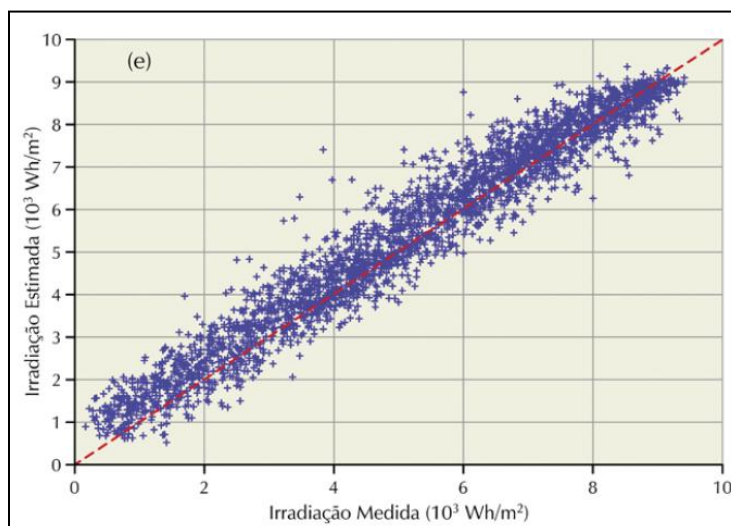


Figura 5-6: Gráfico de Dispersión entre Estimación de Irradiación Global Diaria por Modelo BRASIL-SR y Mediciones Terrestres en la Zona Sur de Brasil (Pereira E. B. et al, 2006)

Tabla 5-1: Desviación de Estimaciones de Radiación Global Obtenidas por el Modelo BRASIL-SR (Pereira E. B. et al, 2006)

<i>Região Brasileira</i>	<i>Desvio Médio em Wh/m² (MBE)</i>	<i>Desvio-padrão do MBE em Wh/m²</i>	<i>Desvio Médio Relativo (rMBE)</i>	<i>Desvio Quadrático Médio Relativo (rRMSE)</i>	<i>Fator de Correlação</i>
Norte	353,48	640,29	0,07	0,15	0,85
Nordeste	306,75	631,10	0,06	0,13	0,97
Centro-Oeste	272,11	669,80	0,05	0,13	0,89
Sudeste	249,10	662,74	0,05	0,14	0,93
Sul	259,49	546,71	0,05	0,12	0,97

En la Tabla 5-1 se puede observar que el modelo BRASIL-SR presentó un comportamiento similar para todas las zonas en que se dividió al país, con una leve sobreestimación de la radiación solar, en especial para las zonas con mayor presencia de

nubosidad como es la zona norte, que presenta el mayor desvío relativo medio (rMBE). Sin embargo la diferencia de los errores calculados para distintas zonas no es significativa como para plantear alguna conclusión certera en términos del comportamiento del modelo frente a distintos escenarios de nubosidad.

El error cuadrático medio relativo mostrado en la Tabla 5-2 representa la magnitud de dispersión de puntos respecto de la línea diagonal de color roja que se muestra en la Figura 5-6.

Para la validación de las estimaciones de radiación directa normal (DNI) se utilizaron los datos de medición terrestre de las estaciones ubicadas en Sao Martinho da Serra, Florianópolis y Petrolina Petroque, ya que eran las únicas estaciones que contaban con pirheliómetros, instrumento que se utiliza para la medición de la radiación solar directa. La metodología empleada fue similar a lo que se realizó para la validación de las estimaciones de radiación global. En la Figura 5-7 se muestra el gráfico de dispersión entre las mediciones terrestres de las tres estaciones y las estimaciones de radiación, y en la Tabla 5-2 se presentan los errores y desvíos calculados.

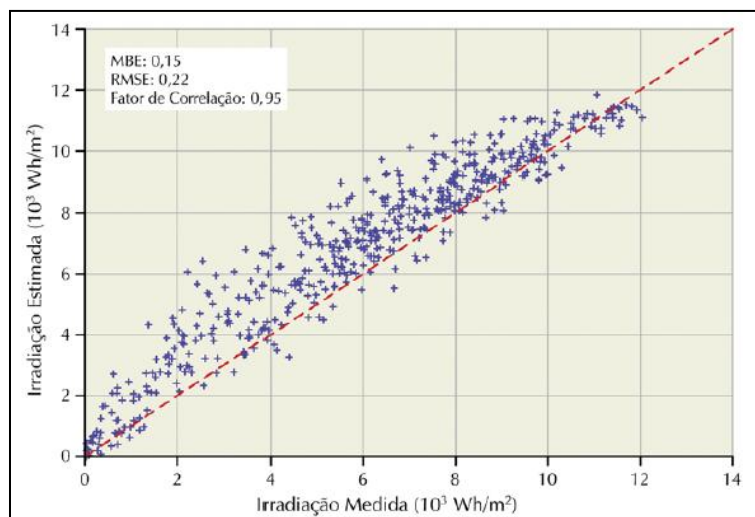


Figura 5-7: Gráfico de Dispersión entre Estimación de Irradiación Directa Diaria por Modelo BRASIL-SR y Mediciones Terrestres en la Zona Sur de Brasil (Pereira E. B. et al, 2006)

Tabla 5-2: Desviación de Estimaciones de Radiación Directa Normal Obtenidas por el Modelo BRASIL-SR (Pereira E. B. et al, 2006)

<i>Estação</i>	<i>Desvio Médio em Wh/m2 (MBE)</i>	<i>Desvio-padrão do MBE em Wh/m²</i>	<i>Desvio Médio Relativo (rMBE)</i>	<i>Desvio Quadrático Médio Relativo (rRMSE)</i>	<i>Fator de Correlação</i>
São Martinho da Serra (RS)	353,48	640,29	0,07	0,15	0,85
Florianópolis (SC)	306,75	631,10	0,06	0,13	0,97
Petrolina (PE)	272,11	669,80	0,05	0,13	0,89

A partir de los resultados mostrados, se aprecia que las desviaciones relativas medias (rMBE) y los errores cuadráticos relativos medios (rRMSE) para las estimaciones de radiación global y directa normal son similares entre ellas y presentan magnitudes semejante a otros modelos utilizados por la comunidad científica para el mismo fin (Perez et al., 2002).

6. CHILE-SR

CHILE-SR es un modelo físico que permite estimar la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre integrando dos enfoques para resolver la ecuación de transferencia radiativa mediante la utilización de datos climatológicos e imágenes satelitales.

El modelo implementado resulta de una adaptación de BRASIL-SR a las condiciones atmosféricas, climáticas y geográficas particulares de Chile, que difieren bastante de las que se presentan en el territorio brasilero producto de la gran diversidad de microclimas causados por sus marcadas zonas geográficas. De esta manera, se presentan regiones donde la presencia de nubosidad es muy escasa y otras donde las nubes son un fenómeno recurrente.

El modelo implementado consta de cuatro grandes etapas que se pueden observar en el diagrama de flujo del modelo CHILE-SR presentado en la Figura 6-1.

La primera etapa consiste en la recepción de imágenes satelitales provenientes del satélite GOES-13, que son enviadas en forma periódica por la Dirección Meteorológica de Chile, institución que participa del proyecto.

Una vez recibidos los datos satelitales, se procede a la segunda fase consistente en el pre-procesamiento de las imágenes, para luego dar paso a la tercera fase del modelo, donde se concentra el modelo de transmitancia atmosférica y la preparación de sus variables de entrada geográficas, climatológicas y de cobertura de nubes. Las variables geográficas y climatológicas consisten en promedios mensuales de albedo de superficie, altitud, temperatura, humedad relativa y visibilidad para todo el territorio chileno, y la variable de cobertura de nubes, consiste en el cálculo del índice de cobertura efectiva de nube para todo el territorio chileno, obtenido a partir del procesamiento de las imágenes satelitales.

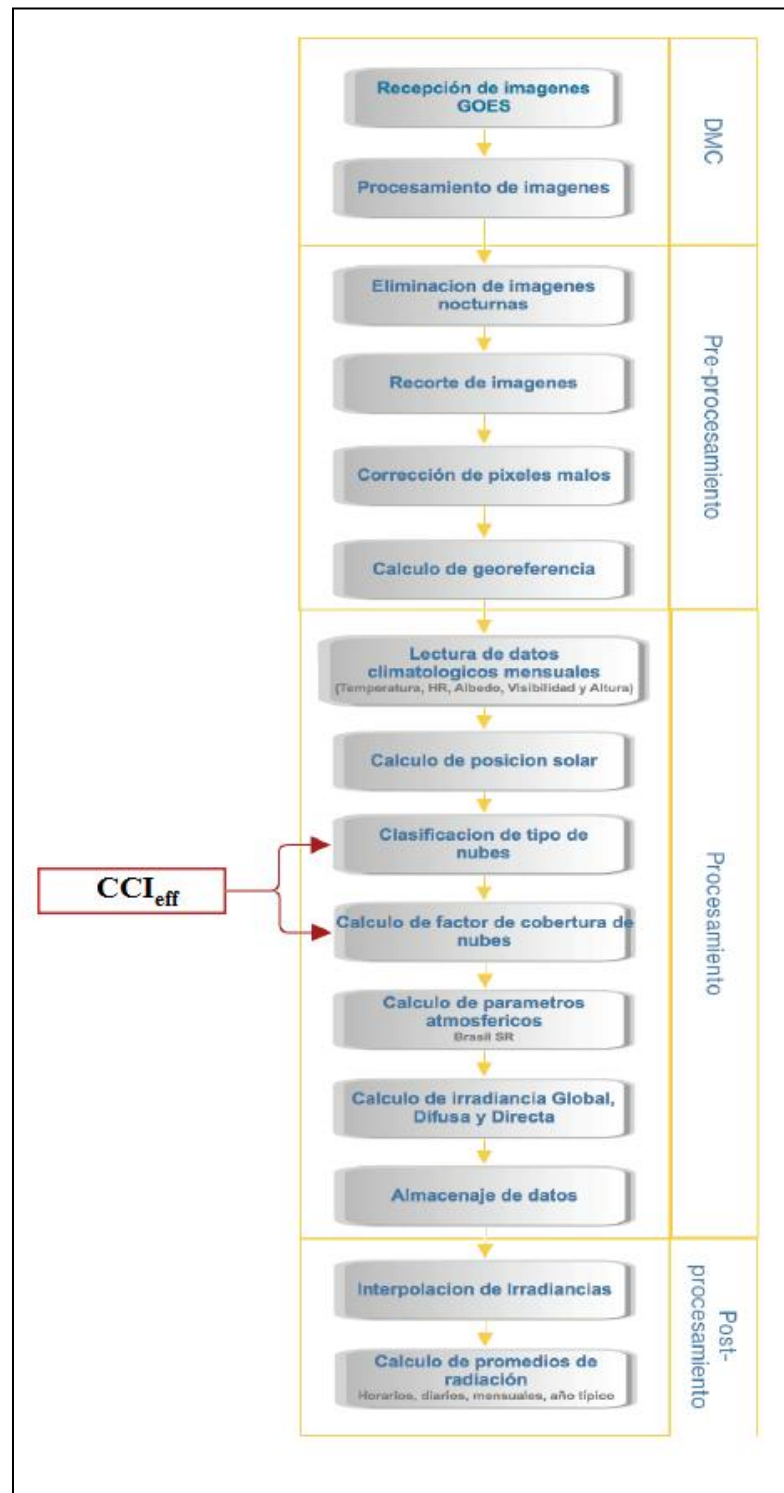


Figura 6-1: Diagrama de Flujo CHILE-SR

El resultado de la fase de procesamiento consiste en mapas de radiación solar incidente sobre el territorio chileno para cada imagen satelital que se haya procesado.

Por último se realiza la etapa de post-procesamiento donde se calculan los promedios horarios de los mapas de radiación, obteniéndose como resultado final mapas de radiación global, directa y difusa.

Como se mencionó en el capítulo 2, la investigación presentada en esta Tesis consiste en desarrollar la metodología para calcular el índice de cobertura efectiva de nubes como variable de entrada al modelo de transmitancia CHILE-SR, tal como se destaca en el diagrama de flujo de la Figura 6-1. El siguiente capítulo presenta el desarrollo de toda la metodología implementada para calcular el valor de este índice.

7. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE COBERTURA EFECTIVA DE NUBES (CCI_{EFF})

La determinación del índice de cobertura efectiva de nubes que será utilizado como parámetro de entrada del modelo CHILE-SR es el objetivo central a alcanzar del trabajo de investigación presentado en esta Tesis.

La cobertura de nubes es uno de los factores más influyentes en el balance radiativo en la superficie (Galli, Nardino, Levizzani, Rizzi, & Georgiadis, 2004) y por lo tanto en el cálculo de la transmitancia atmosférica para la estimación de la radiación incidente en superficie.

El modelo CHILE-SR supone que la radiación solar incidente en la parte superior de la atmósfera se distribuye en forma lineal entre dos condiciones atmosféricas extremas: cielo completamente cubierto y completamente despejado.

En el capítulo 7.1 se hablará de las características de las imágenes satelitales enviadas por la Dirección Meteorológica de Chile, provenientes del satélite geoestacionario GOES-13, en el capítulo 7.2 se comenta el estado del arte en el ámbito de la determinación de la cobertura de nubes y se explicarán las propuestas de mejora en la formulación de la metodología para el cálculo de este factor respecto de la utilizada por el modelo BRASIL-SR. A continuación, en el punto 7.3 se mostrarán los principales tipos de nubes y sus características físicas para finalmente, en el capítulo 7.4 explicar en forma detallada cada una de las etapas a llevar a cabo para el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes.

7.1.GOES-13

Las imágenes satelitales con que trabaja CHILE-SR provienen del satélite geoestacionario GOES-13 que se encuentra bajo la administración de la agencia científica americana *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) que dirige el *National Weather Service* (NWS). Este satélite fue puesto en órbita en Mayo del año 2009 y el 22 de Junio del mismo año comenzó a enviar los primeros datos. El 14 de Abril del 2010 se posicionó en el meridiano 75° W reemplazando las labores del

GOES-12, presentando varias mejoras en términos de la calidad y tipo de información enviada.

La información utilizada por CHILE-SR es transferida diariamente por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), cuyos archivos contienen imágenes en dos canales de información, el canal 1 que corresponde a la radiación del espectro visible de la ventana espectral entre los 0,5 y 0,7 μm y el canal 4, que contiene datos de radiación infrarroja para longitudes de onda entre los 10,2 y 11,2 μm . Esta última entrega información térmica del tope superior de la nubosidad presente, o bien, de la superficie en el caso no haber presencia de nubes. Los archivos también contienen la geo-referencia de las imágenes, así como el ángulo producido entre el satélite y el sol para cada pixel, que será llamado en adelante como *scatter phase* (SP).

Las imágenes llegan en dos resoluciones espaciales, las del canal 1 poseen una resolución fina de alrededor de 1 x 1 km^2 por pixel y las del canal 4 tienen una de 4 x 4 km^2 aproximadamente. Dichas imágenes llegan en archivos cuyos nombres finalizan de dos formas. Los primeros con extensión “media_hora”, poseen una resolución temporal de aproximadamente 30 minutos, lo que se traduce en 26 imágenes diarias que abarcan una franja horizontal entre las latitudes 20° S y 45° S aproximadamente, y el otro con extensión “south_full” que no posee una resolución temporal fija. Estas últimas son alrededor de 13 imágenes diarias que abarcan todo Sudamérica, específicamente entre las latitudes 10° N y 50° S. Considerando ambos formatos, por cada mes de información se cuenta con alrededor de 1.170 imágenes en cada uno de los canales de información.

En la Figura 7-1 se muestra el ejemplo de una imagen del espectro visible en formato *south_full* antes de ser procesada por CHILE-SR, proveniente del satélite GOES-13. Lo único que se le realizó a la foto satelital es el proceso de geo-referenciación para facilitar la identificación la zona continental sudamericana.

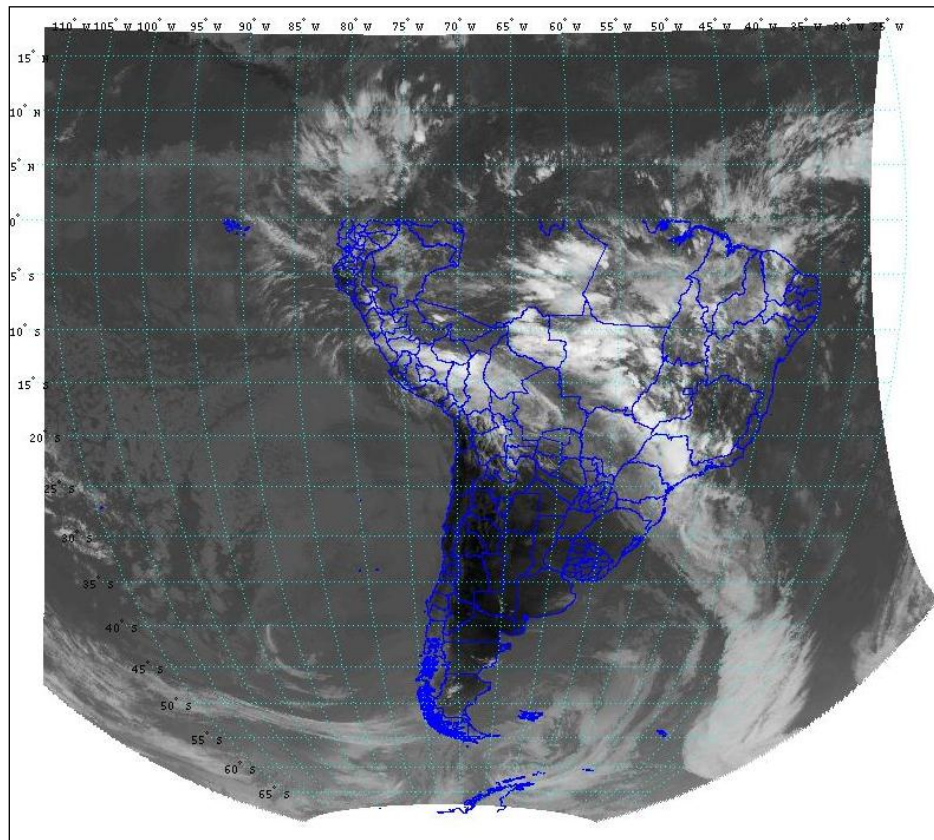


Figura 7-1: Imagen Canal 1 del Satélite GOES-13 en Formato *south_full*

7.2. Propuesta

En cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes es uno de los parámetros de mayor relevancia en el modelo CHILE-SR, ya que es una de las variables de entrada al modelo de transmitancia que afecta en forma directa al cálculo de la radiación incidente en superficie. Esto ocurre por causa de uno de los supuestos en que se basa, que considera que la radiación solar extraterrestre que alcanza la atmósfera se distribuye en forma lineal respecto de condiciones de máxima y mínima cobertura.

Como se ha mencionado en el capítulo 6, el modelo CHILE-SR surge de una adaptación de BRASIL-SR a las condiciones particulares de Chile, por lo tanto se considera como caso base toda la metodología implementada por el modelo brasilero.

Hablando particularmente del cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}), en el capítulo 5.3.2 se vieron algunas falencias identificadas en la forma de determinar el valor de este parámetro en el modelo BRASIL-SR, por lo tanto el objetivo de desarrollar una nueva metodología de cálculo es tomar todos los aspectos positivos que entrega el procedimiento de BRASIL-SR e intentar fortalecer los puntos más débiles para lograr obtener un índice de cobertura más certero considerando las particularidades de la de la atmósfera chilena.

Los puntos más importantes que se intentan resolver de la metodología implementada por Brasil se mencionan a continuación.

Considerando la forma de cálculo del CCI_{eff} y que el modelo BRASIL-SR trabaja con archivos mensuales, para obtener un valor correcto de este parámetro es necesario que por lo menos en alguna de las imágenes del mes, todos los píxeles presenten condiciones extremas de cobertura, tanto para cielo completamente despejado (L_{clear}) como para cielo completamente cubierto (L_{cloud}). El problema de la metodología es que no puede asegurar que el valor que se le asigne a las dos condiciones extremas corresponda efectivamente a tales escenarios. Por ejemplo, si en un mes e archivos ocurre que para algún píxel no se produjo un nivel de cobertura máximo, sino que uno intermedio, se le asignará a la variable L_{cloud} este valor, lo que producirá una sobrestimación del índice de cobertura al tener como referencia de cobertura máxima un valor que no corresponde a esa condición. Al ocurrir esta situación, traerá como consecuencia final una subestimación de la radiación incidente en dicho píxel para todo el mes de procesamiento. Considerando el caso contrario, en que durante todo el mes nunca se presenta una condición de cielo descubierto en un 100%, las consecuencias serán justamente al revés, subestimando el nivel de cobertura máxima terminando con una sobrestimación de la radiación incidente en superficie. Conociendo las condiciones climáticas de Chile esta debilidad toma mayor relevancia, ya que en la depresión intermedia de la zona norte del país (regiones XV, I, II y III) la presencia de nubosidad es prácticamente nula, en especial en la época de verano, por lo que es altamente probable que en la mayoría de los píxeles nunca se presente nubosidad. Caso

completamente opuesto en el sur, donde en los meses de invierno es recurrente que por gran cantidad de días se presentan días completamente nublados.

La asignación incorrecta de estos valores cuando no existe presencia de nubosidad durante todo el mes puede tener otras consecuencias adversas, como la que se observa en la Figura 5-5, que confunde valores característicos del albedo terrestre de la zona con presencia de nubosidad. En la figura a la que se hace referencia, esta situación se ve muy claramente en la zona norte donde se producen saltos importantes de radiación entre pixeles vecinos donde se presenta una condición de cielo despejado.

Otro aspecto a abordar en la propuesta de CHILE-SR es el problema de la luminosidad de la imagen, ya que en BRASIL-SR se comparan valores correspondientes al mismo pixel pero sin considerar este aspecto. Como se mencionó en el capítulo 5.3.2 y se muestra con detalles en la Figura 5-2, los valores del canal del espectro visible de información varían mucho cuando se comparan pixeles entre imágenes del amanecer o atardecer con las del medio día. Incluso no son comparables pixeles de un mismo mes que correspondan a una misma hora local, cuando son de días que tienen más de 15 días de desfase. Este análisis se mostrará en el capítulo 7.4.2.

Otra de las falencias identificadas ocurre en el reconocimiento de nubosidad en multicapas, ya que al observarla en imágenes del canal visible, se ven espacios negros entre las nubes que se pueden interpretar como pixeles despejados cuando en realidad corresponden a sombras que proyectan nubes de capas superiores sobre las que se encuentran más bajas, tal como se muestra en la Figura 5-3.

El procedimiento desarrollado en CHILE-SR propone para el cálculo del CCI_{eff} una aplicación combinada entre el procesamiento de imágenes satelitales y una implementación de reconocimiento de patrones para la identificación del tipo de nubosidad presente en cada pixel (Delgado et al., 2007), incorporado al modelo físico desarrollado en BRASIL-SR.

La metodología propuesta en CHILE-SR comparte los siguientes supuestos asumidos por BRASIL-SR respecto del cálculo del CCI_{eff} :

- La configuración micro-física de las nubes es representada por el tamaño y distribución de las gotas de agua del tipo de nube.
- Las nubes atenúan en forma directa la radiación proveniente del sol.
- Las nubes se consideran homogéneas, tanto en dirección vertical como horizontal.

Además de los supuestos anteriores, asume en términos generales el proceso de transferencia radiativa de la atmósfera terrestre presentado en el diagrama de la Figura 7-2, donde los valores representan la fracción de energía en cada proceso atmosférico.

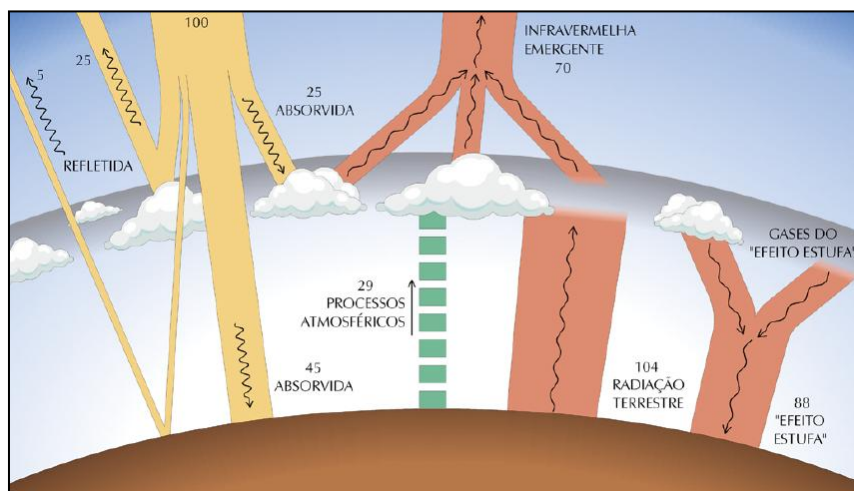


Figura 7-2: Diagrama del Proceso de Transferencia Radiativa en la Atmósfera Terrestre (Pereira E. B. et al., 2006)

La metodología implementada por CHILE-SR asume en particular el proceso que ocurre con la radiación del espectro visible cuando atraviesa la capa nubosa, representado en color amarillo. Como se observa en el esquema presentado, alrededor de un 5% de la radiación incidente que atraviesa la nube es reflejada por la superficie terrestre¹⁰, otro 45% logra atravesar esta nubosidad siendo absorbida por la tierra y un 25% rebota sin alcanzar la superficie terrestre. Al analizar esta situación desde el punto de vista del

¹⁰ Valor representativo de una configuración “X” de nubosidad. No significa que todos los tipos de nubes y cualquier espesor óptico permita el paso de ese porcentaje de radiación. El diagrama tiene por objetivo mostrar en forma general el proceso de transferencia radiativa de atmósfera.

satélite, la radiación en el espectro visible que recibe del reflejo directo de las nubes es de un 25% de la original y el aporte que llega al satélite luego de rebotar en la superficie terrestre y atravesar nuevamente la capa nubosa es de un 2,5%. Considerando esta situación, al momento de calcular el CCI_{eff} en que se compara los valores del espectro visible para casos en los que existe y no existe presencia de nubosidad, el aporte absoluto de la radiación que atraviesa dos veces una nube antes de llegar al satélite respecto al caso sin presencia de nubosidad es de un 4,55%. Considerando este análisis, el modelo CHILE-SR desprecia el aporte entregado por la radiación del espectro visible que llega al lente del satélite cuando atraviesa dos veces la capa nubosa al momento de calcular el índice de cobertura efectiva de nubes.

Considerando las falencias identificadas en BRASIL-SR y los supuestos realizados por CHILE-SR, las propuestas de la nueva metodología implementada con sus alcances respectivos se detallan a continuación.

7.2.1. Incorporación Espectro Infrarrojo

Se integra para el estudio el espectro de radiación infrarroja aportado por el canal 4 de información proveniente del satélite GOES-13. De esta manera la formulación de la metodología queda soportada por la información aportada por ambos canales.

La radiación infrarroja que llega al satélite entrega información termal del tope superior de nubosidad, con lo que se puede inferir la altura a la que se encuentra la parte superior de la nube respecto de la superficie terrestre (Tselioudis, Rossow, & Rind, 1992). En caso de no haber presencia de nubosidad, el canal entrega el valor de temperatura calculado para la superficie correspondiente a cada pixel.

La incorporación del espectro de radiación infrarroja permite obtener mayor información del tipo de nubosidad, o ausencia de ella, que se presenta en cada pixel de la imagen, permitiendo la clasificación de las diferentes configuraciones nubosas y la identificación de los pixeles que presentan condición de cielo despejado (Goodman & Henderson-Sellers, 1987).

Al detectar las zonas donde existe ausencia de nubosidad se hace posible el almacenamiento de los valores de albedo terrestre para cada lugar del territorio chileno. El estudio estadístico de imágenes satelitales para la clasificación del tipo de cobertura de nubes mediante un análisis bi-espectral utilizando los canales visible e infrarrojo ha sido ampliamente desarrollado por la comunidad científica obteniendo resultados satisfactorios, tal como lo avalan los estudios de Ruprecht, 2002; Massons, Domingo, Codina, & Lorente, 1997 y Ricciardelli, Romano, & Cuomo, 2008. En los dos últimos artículos se trabajó con imágenes del satélite METEOSAT.

La importancia de realizar un análisis bi-espectral al incorporar el canal del espectro infrarrojo es consecuencia de la influencia que tiene el tipo de nubosidad de la cobertura de nubes para el balance radiativo que resulta en la superficie terrestre (Nardino & Georgiadis, 2003; Hartmann, Ockert-Bell, & Michelsen, 1992). Incluso los estudios realizados por Martins, Silva, Pereira, & Abreu, 2007, tres de los creadores del modelo BRASIL-SR, muestran la mejora de los resultados al integrar el análisis bi-espectral del tipo de cobertura para la obtención del CCI_{eff} .

7.2.2. Incorporación de Variable *Scatter Phase*

CHILE-SR incorpora en su procedimiento la información correspondiente al ángulo que se produce entre el satélite y el sol para cada punto geográfico de la imagen capturada por el satélite. El nombre con que se registra esta variable es *scatter phase*, a la que se la hará referencia como SP.

El SP entrega información de la luminosidad de las imágenes correspondientes al canal 1, siendo más claras cuando el SP es menor, y por el contrario, haciéndose más oscuras a medida que aumenta su valor. Para el procedimiento implementado se utilizará un valor máximo de SP de 100° , ya que las imágenes con valores cercanos a ese son prácticamente negras.

La importancia de conocer la luminosidad de los píxeles de las imágenes es porque varía mucho respecto de la hora y fecha a la que pertenezca su captura, por lo tanto conocer este valor permite una estandarización de los píxeles que pueden ser comparables entre

sí en términos del nivel de luminosidad. De esta manera es posible registrar los valores de cobertura y albedo terrestre correspondientes al canal visible para cada nivel de luminosidad característico.

7.2.3. Definición de 4 Clases de Condiciones Atmosféricas

La metodología desarrollada para calcular el índice de cobertura efectiva de nubes considera la definición de 4 clases del tipo de cobertura:

- Clase 1: Clear Sky
- Clase 2: St, Sc, As, Ac¹¹
- Clase 3: Ns, Cu, Cb¹²
- Clase 4: Ci, Cc, Cs¹³

Todas las clases se explicarán detalladamente en el capítulo 7.4.2.

Para la identificación de cada una de las clases de cobertura se considerarán cuatro características representativas de ellas:

- Característica 1: Magnitud de radiación en el espectro visible (Canal 1), medido en porcentaje de albedo.
- Característica 2: Magnitud de radiación en el espectro infrarrojo (Canal 4), medido en grados Celsius.
- Característica 3: Ángulo comprendido entre el sol y el satélite en función del día, hora y posición geográfica (*scatter phase*).
- Característica 4: Mes correspondiente al día del pixel de la imagen capturada.

El caso base correspondiente al procedimiento implementado por el modelo BRASIL-SR considera sólo la información proveniente de la información del espectro visible, por lo que CHILE-SR incorpora tres variables para el cálculo del CCI_{eff} .

¹¹ Abreviaciones del nombre correspondiente a géneros del tipo de nubosidad que serán estudiados en el capítulo 7.3.1.1.

¹² Ídem.

¹³ Ídem.

La incorporación de la cuarta característica permite controlar el cambio en el valor de albedo terrestre característico de cada pixel en función de las fluctuaciones que sufre según las diferentes estaciones del año para las distintas zonas del país.

7.2.4. Reconocimiento de Patrones y Procesamiento de Imágenes

La propuesta más importante y que justifica los puntos señalados anteriormente es la implementación de una metodología de cálculo del CCI_{eff} basado en el modelo físico planteado en BRASIL-SR combinado con una aplicación de procesamiento de imágenes satelitales y de reconocimiento de patrones, que permite la clasificación del tipo de cobertura para cada pixel antes de realizar los cálculos necesarios para determinar del índice de cobertura efectiva de nubes.

La aplicación del reconocimiento de patrones tiene por objetivo definir la distribución de características representativas de cada una de las clases definidas, para ello utiliza como filtro la información que proveen la tercera y cuarta característica, con lo que se asegura de determinar la distribución de características de pixeles comparables en términos de luminosidad y tipo de albedo superficial para aquellos pixeles que se clasifiquen como cielo descubierto (*clear sky*).

Al conocer la distribución de características se realiza un proceso de clasificación utilizando el clasificador *Linear Discriminant Analysis*, en el que se le asigna a cada pixel la clase de nubosidad a la que pertenece (Amato, et al., 2008), de esta manera, además de contar con la información de los canales 1 y 4 de información, se conoce el tipo de cobertura que presenta cada pixel para la determinación del CCI_{eff} (Ghosh, Pal, & Das, 2006).

Considerando todos los puntos recientemente mencionados, la propuesta desarrollada presenta las siguientes ventajas:

- Identificación de pixeles con presencia de nubosidad y con condición de cielo despejado.
- Determinación del tipo de cobertura de nubes, como por ejemplo la presencia de nubosidad en multicapas.

- Al conocer la clase correspondiente de cada pixel de la imagen, permite obtener los valores de máxima cobertura asociado a cada una ellas.
- Al conocer los pixeles clasificados como cielo despejado, se identifican los valores mínimos de albedo de superficie asociado de cada uno.
- No asigna valores de máxima cobertura a pixeles despejados por tener altos valores de albedo de superficie.
- Todos los valores de máxima cobertura y de albedo de superficie son almacenados en función de la variable SP correspondiente pixel del que se obtuvieron. Con esto logra disminuir el sesgo en el cálculo del CCI_{eff} al utilizar pixeles comparables en intensidad de luz.
- No necesita que durante el período de análisis se presente una condición de cielo completamente despejado o completamente nublado para cada pixel de la imagen para calcular el valor correcto del CCI_{eff} .
- Al conocer los valores de máxima cobertura por clase y los asociados al albedo de superficie por pixel para cada rango de SP, no sobrestima los valores del índice de cobertura efectiva de nubes para zonas de poca nubosidad, ni subestima su valor para las zonas de gran nubosidad.
- Resuelve el problema de los saltos de radiación entre pixeles cercanos para condiciones similares de cobertura.

7.3. Nubes

Una nube es una masa visible formada por un conjunto de pequeñas partículas de agua o nieve que se encuentran suspendidas en el aire. En algunas ocasiones pueden contener partículas más grandes formadas de agua o nieve junto con otras de humo o polvo.

Su apariencia se encuentra determinada por la naturaleza, tamaño y distribución espacial de las partículas que la forman, además de verse fuertemente influenciada por la intensidad, por el color de la luz incidente en ella y de la posición relativa del observador y la fuente de luz.

Para realizar una descripción adecuada de los diferentes tipos de nubes es necesario tomar en consideración diversos factores tales como la dimensión, forma, estructura, textura, luminancia¹⁴ y color característicos.

La luminancia de una nube está determinada por la cantidad de luz reflejada, dispersada y transmitida por las partículas que la constituyen proveniente, en su mayor proporción, del sol o del cielo y en menor medida del reflejo de la superficie terrestre.

El color de una nube depende principalmente de la luz que recibe, sin embargo puede ser afectada por diferentes fenómenos como la neblina existente entre nubes lejanas y el observador, lo que puede provocar que se vean de color amarillo, naranja o rojo.

La siguiente sección contiene una descripción detallada de los tipos de nubes que se forman en la atmósfera y algunas técnicas de observación para su identificación y clasificación.

7.3.1. Clasificación

Las nubes evolucionan continuamente cambiando de apariencia pudiendo tomar una infinidad de formas. Sin embargo, se han definido ciertas configuraciones características que se pueden observar con frecuencia en todo el planeta en las que se agrupan todas las formas posibles (Bleeker, Alaka, Beaufils, & Bessemoulin, 1969). La clasificación se ha estructurado en tres niveles: género, especie y variedad.

El género consiste en diez grupos excluyentes entre sí, esto significa que cualquier tipo de nube que se forme, sólo puede corresponder a uno de ellos. Los diez grupos posibles son *Cirrus* (Ci), *Cirrocumulus* (Cc), *Cirrostratus* (Cs), *Altostratus* (As), *Nimbostratus* (Ns), *Stratocumulus* (Sc), *Stratus* (St), *Cumulus* (Cu) y *Cumulonimbus* (Cb).

El segundo nivel surge por ciertas peculiaridades en la forma y diferencias en la estructura interna de nubes pertenecientes al mismo género, llevando a crear subdivisiones de especies en la mayoría de los diez géneros señalados en el párrafo

¹⁴ Magnitud que expresa el flujo luminoso en una dirección determinada, por unidad de ángulo sólido y por unidad de área proyectada de la superficie radiante sobre el plano normal a la dirección de radiación. Su unidad en el Sistema Internacional es la *candela por metro cuadrado*. Fuente: RAE

anterior. Las especies de nubes que se pueden identificar son *fibratus* (fib), *uncinus* (unc), *spissatus* (spi), *castellanus* (cas), *floccus* (flo), *stratiformis* (str), *nebulosus* (neb), *lenticularis* (len), *fractus* (fra), *humilis* (hum), *mediocris* (med), *congestus* (con), *calvus* (cal) y *capillatus* (cap). Estas especies definidas son excluyentes entre sí, sin embargo, una especie en particular puede ser reconocida en más de un género. Ejemplo de esta situación ocurre con la especie len, que se puede observar en las nubes de género Cc, Ac y Sc.

El tercer nivel que se ha establecido para la clasificación de nubes es la variedad, que se determina por la manifestación de características especiales, que dicen relación con la disposición de los elementos de la nube en el espacio y con el grado de transparencia de ella. Las variedades de nubes definidas son *intortus*, *vertebratus*, *undulatus*, *radiatus*, *lacunosus*, *duplicatus*, *translucidus*, *perlucidus* y *opacus*, las que no son mutuamente excluyentes entre ellas, ya que una misma nube puede presentar características correspondientes a más de una variedad.

En la Tabla 7-1 se muestra el resumen de todas las posibles configuraciones de nubes que se han establecido en el Atlas Internacional de Nubes (Bleeker et al, 1969) considerando los tres niveles de clasificación: género, especie y variedad, que se encuentran ordenados en orden descendente en función de las altitudes en las que se presentan usualmente.

Tabla 7-1: Tabla de Clasificación de Nubes

Genero	Especie	Variedad
Cirrus	fibratus uncinus spissatus castellanus floccus	intortus radiatus vertebratus duplicatus
Cirrocumulus	stratiformis lenticularis castellanus floccus	undulatus lacunosus
Cirrostratus	fibratus nebulosus	duplicatus undulatus
Alto cumulus	stratiformis lenticularis castellanus floccus	translucidus perlucidus opacus duplicatus undulatus radiatus lacunosus
Altostratus		translucidus opacus duplicatus undulatus radiatus
Nimbostratus		
Stratocumulus	stratiformis lenticularis castellanus	translucidus perlucidus opacus duplicatus undulatus radiatus lacunosus
Stratus	nebulosus fractus	opacus translucidus undulatus
Cumulus	humilis mediocris congestus fractus	radiatus
Cumulonimbus	calvus capillatus	

Todos los tipos de nubes se encuentran generalmente en un rango de altitud determinado, que varía dependiendo del clima de la región. Por ejemplo, en las zonas tropicales se pueden observar nubes desde el nivel del mar hasta los 18 km, en los climas templados correspondientes a las latitudes intermedias, hasta los 13 km y en las regiones polares hasta los 8 km (Bleeker et al, 1969).

Por convención, según el sector de la atmósfera en que se presentan usualmente los diferentes géneros de nubes, se han definido tres pisos en dirección vertical: superior, medio e inferior. A Chile le corresponde por definición un clima templado producto de su ubicación geográfica, por lo tanto los rangos establecidos para los pisos superior, medio e inferior que le corresponden se muestran en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2: Rangos de Altura Establecidos donde se Produce la Formación de Nubes (Bleeker et al, 1969)

Piso	Climas Templados
Superior	De los 5 km hasta 13 km
Medio	De los 2 km hasta 7 km
Inferior	De la superficie hasta los 2 km

A continuación se presenta una breve definición extraída del Atlas Internacional de Nubes (Bleeker et al, 1969) de los diferentes tipos de género. Las diferentes configuraciones que definen las especies y variedades no se estudiarán en detalle al escaparse de los alcances considerados en este trabajo, ya que por medio de las observaciones satelitales se logran distinguir comúnmente hasta la clasificación de géneros.

7.3.1.1. Género

- *Cirrus* (Ci)

Nubes compuestas por cristales de hielo dispuestas en forma separada y formadas por delgados filamentos o bandas estrechas que se pueden disponer en forma recta, curva o

alguna configuración irregular. Presentan un predominio importante del color blanco y es común que terminen, en su parte superior, en forma de garfio o copo. Se caracterizan por una apariencia fibrosa y se ubican en el piso superior de la atmósfera. En la Figura 7-3 se muestra una imagen del Desierto de Atacama donde se presenta una nube de este género.



Figura 7-3: Nube de Género *Cirrus* (Ci)
(Imagen Extraída de sitio Web)¹⁵

- *Cirrocumulus* (Cc)

Nube blanca y delgada en forma de parche o capa con ausencia de sombras, compuesta casi exclusivamente por cristales de hielos, pudiendo existir presencia de gotas de agua sobre enfriadas que rápidamente son reemplazadas por cristales. Se ubica en el piso superior de la atmósfera caracterizándose principalmente por su disposición en pequeños elementos con forma de granos u ondas, pudiendo estar unidos o separados. En la Figura 7-4 se muestra una imagen de un cielo cubierto casi completamente por Cc.

¹⁵ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Cirrus
(visitado 13.12.2010)



Figura 7-4: Nube de Género *Cirrocumulus* (Cc)
(Imagen Extraída de sitio Web)¹⁶

- *Cirrostratus* (Cs)

Nube transparente en forma de velo compuesta principalmente por cristales de hielo. Presenta un aspecto suave que cubre parcial o totalmente el cielo. Se ubica en el piso superior de la atmósfera y es común que produzca el fenómeno de la aureola.

Figura 7-5 se muestra una imagen de nubes Cs, donde se puede apreciar el fenómeno de la aureola característico de este género.



Figura 7-5: Nube de Género *Cirrostratus* (Cs)
(Imagen Extraída de sitio Web)¹⁷

¹⁶ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Cirrocumulus
(visitado 13.12.2010)

¹⁷ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Cirrostratus
(visitado 13.12.2010)

- *Altostratus* (Ac)

Nube compuesta por gotas de agua, pudiendo presentar a temperaturas muy bajas formación de cristales de hielo. Se presenta en forma de parche o capa de color blanco, gris o una combinación de ambos. Generalmente presenta sombras y está formada por láminas, masas redondas o rollos que pueden presentarse unidos o separados, ubicándose en el piso medio de la atmósfera. En la Figura 7-6 a continuación, se puede observar un ejemplo del cielo con presencia de nubes de este género.



Figura 7-6: Nube de Género *Altostratus* (Ac)
(Imagen Extraída de sitio Web)¹⁸

- *Altostratus* (As)

Nube grisácea o azulada compuesta por gotas de agua y cristales de hielo dispuesta en forma de capa o lámina con apariencia fibrosa o uniforme, que cubre en forma parcial o total el cielo. Generalmente posee sectores más delgados donde revela en forma vaga al sol, pero no produce el fenómeno de la aureola como lo hacen las del género Cs. Se encuentran principalmente en el piso medio de la atmósfera, sin embargo es común que

¹⁸ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Altostratus
(visitado 13.12.2010)

se extienda hasta el piso superior pudiendo presentar más de una capa. En la Figura 7-7 se aprecia una imagen de este tipo de nubosidad.



Figura 7-7: Nube de Género *Altostratus* (As)
(Imagen Extraída de sitio Web)¹⁹

- *Nimbostratus* (Ns)

Nube formada por una capa de nube gris generalmente oscura, compuesta por gotas de agua y de lluvia en forma de cristales o copos de nieve. Su apariencia se vuelve difusa por la caída continua de lluvia o nieve que en la mayoría de los casos alcanza el suelo. Es lo suficientemente gruesa para no dejar ver el sol tal como se puede apreciar en la Figura 7-8.

¹⁹ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Altostratus
(visitado 13.12.2010)



Figura 7-8: Nube de Género *Nimbostratus* (Ns)
(Imagen Extraída de sitio Web)²⁰

- *Stratocumulus* (Sc)

Nube formada por gotas de agua y en algunas ocasiones con presencia de gotas de lluvia. Presenta un color gris levemente blanco, o una combinación de ambos, y se dispone en forma de parche o capa que casi siempre presenta partes oscuras compuestas por masas redondas o rollos que pueden presentarse unidos. La mayoría de las veces puede parecer similar a una nube del género Ac, pero se ubica en un nivel inferior pareciendo ser más extensa. En la Figura 7-9 se aprecia una imagen de un atardecer con el cielo cubierto de este tipo de nubosidad.

²⁰ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Nimbostratus
(visitado 13.12.2010)



Figura 7-9: Nube de Género *Stratocumulus* (Sc)
(Imagen Extraída de sitio Web)²¹

- *Stratus* (St)

Capa de nube gris que presenta una base uniforme formada por pequeñas gotas de agua o por partículas de hielo cuando hay temperaturas muy bajas. Este tipo de nubosidad, dependiendo de las condiciones y temperaturas de la atmósfera, puede causar llovizna, caída de prismas de hielo o incluso granos de nieve. Cuando se logra ver al sol a través de las nubes no es posible identificar su contorno, tal como se puede verificar en la imagen presentada en la Figura 7-10 donde una gran masa de nubosidad de este género se encuentra cubriendo el cielo en toda su extensión.

²¹ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Stratocumulus
(visitado 13.12.2010)



Figura 7-10: Nube de Género *Stratus* (St)
(Imagen Extraída de sitio Web)²²

- *Cumulus* (Cu)

Nubes que se disponen en forma individual presentando un aspecto denso y con marcados contornos. Se desarrollan en forma vertical generando montículos o torres nubosas que se elevan en la atmósfera cuya parte superior se asemeja a la forma de una coliflor. Al desarrollarse verticalmente, se pueden llegar a ubicar en más de un piso de la atmósfera. Está compuesta principalmente por gotas de agua, sin embargo cuando las condiciones atmosféricas presentan temperaturas inferiores a los 0° C, puede haber presencia de cristales de hielo. Las partes de la nube que son iluminadas por el sol se ven de un color blanco brillante, mientras que su base es relativamente oscura y horizontal. En la imagen de la Figura 7-11 que se muestra a continuación, se puede apreciar en forma clara la presencia de nubes del género Cu en la atmósfera.

²² http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Stratus
(visitado 13.12.2010)



Figura 7-11: Nube de Género *Cumulus* (Cu)
(Imagen Extraída de sitio Web)²³

- *Cumulonimbus* (Cb)

Nube densa y pesada con una considerable extensión vertical en forma de enormes montañas o torres. Al menos una parte de su porción superior se presenta casi siempre lisa y aplanada. Se compone por gotas de agua y por cristales de hielo, estos últimos en especial en la parte superior de ella. Además contiene gotas de lluvia de gran magnitud y a menudo presenta presencia de copos de nieve y pellets de nieve o hielo.

La base de la nube se presenta a menudo oscura, con presencia de pequeñas nubes y con probabilidad de generar precipitaciones de gran intensidad. Es común que la parte superior de este tipo de nubosidad vaya acompañado de nubes del género Ci. Dada su gran dimensión vertical, puede ocurrir que una misma nube alcance a estar en los tres niveles atmosféricos a la vez. En la Figura 7-12 se presenta una imagen con un ejemplo de una nube del género descrito.

²³ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Cumulus
(visitado 13.12.2010)



Figura 7-12: Nube de Género *Cumulonimbus* (Cb)
(Imagen Extraída de sitio Web)²⁴

Con el objetivo de consolidar las principales características y la disposición en la atmósfera de los diez géneros de nubes que han sido definidos, en la Figura 7-13 se muestra una representación esquemática donde se identifican los principales atributos que permiten identificarlas.

²⁴ http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/clouds/cloud_il.html&lang=en#Cumulonimbus
(visitado 13.12.2010)

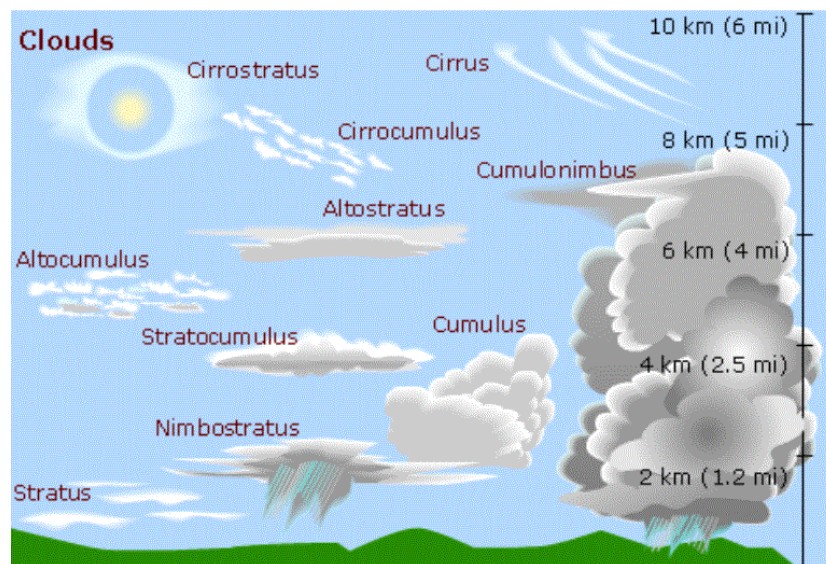


Figura 7-13: Representación de los Tipos de Géneros en la Tropósfera
(Imagen Extraída de sitio Web)²⁵

7.4. Procedimiento

El procedimiento propuesto para la determinación del índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}) implementado para el modelo CHILE-SR está especialmente diseñado para trabajar con un número mínimo de imágenes satelitales. Si bien no es una condición necesaria para su correcto funcionamiento, los resultados que obtenga a partir del procesamiento si se verá afectado por este factor.

Al calcular el CCI_{eff} de los píxeles de la imagen de un día y hora especificada, para obtener un valor con el mayor nivel de exactitud, es necesario conocer la información de los datos satelitales enviados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) de los 16 días previos y 16 días posteriores. Esto se traduce en alrededor de 1.170 imágenes para cada canal de información, tal como se explica en el capítulo 7.1. Por consiguiente, el modelo trabaja en forma óptima con 1.170 imágenes en el espectro visible, 1.170 en el infrarrojo y con el mismo número de archivos de *scatter phase* (ángulo que se produce

²⁵ <http://airlineworld.wordpress.com/2008/07/09/cloud-types/> (visitado 13.12.2010)

entre el sol y el satélite que toma la imagen en un pixel determinado de la imagen) y de datos necesarios para la georreferenciación. El número 1.170 es una aproximación de todos los archivos que se reciben en promedio cada mes, sin embargo se debe considerar que algunas de ellas pueden corresponder a imágenes nocturnas que no serán procesadas. Esta situación ocurrirá con mayor intensidad durante los meses de invierno en que se cuenta con menos horas de luz.

La propuesta implementada en CHILE-SR consiste en cinco fases que se encuentran representadas en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 7-14. Todas ellas deben ser realizadas en forma consecutiva y se encuentran programadas en el *software* MATLAB especialmente diseñadas para llevar a cabo una interfaz sencilla de comunicación con el usuario. Cada una de las etapas funciona en forma automática sin necesidad de intervenir durante su ejecución a excepción de la segunda, en que se desarrolla el entrenamiento asistido donde el usuario juega un rol fundamental durante toda su ejecución.

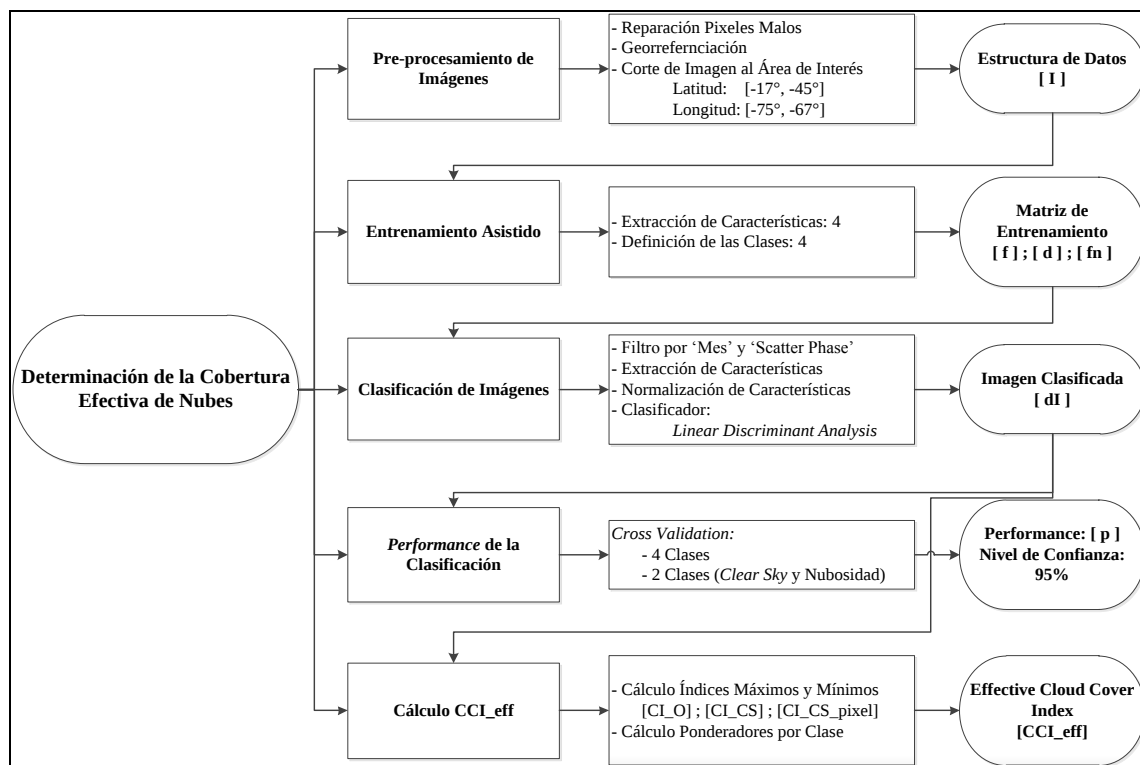


Figura 7-14: Diagrama de Flujo Propuesta para la Determinación del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes

El primer paso consiste en el Pre-procesamiento de imágenes digitales, que tiene por objetivo la identificación de archivos disponibles, eliminación de imágenes nocturnas, la reparación de píxeles malos (para todos los canales de información), la georreferenciación de cada píxel y el recorte de las imágenes al área de interés, en este caso el territorio chileno. La salida de esta primera fase es una estructura de datos **I** que guarda toda la información post-procesamiento extraída de los archivos satelitales que llegan desde la DMC en formato NetCDF²⁶.

Las tres etapas siguientes, entrenamiento asistido, clasificación de imágenes y cálculo del *performance* de la clasificación, representan las propuestas más novedosas al ser una aplicación directa del área de investigación del Reconocimiento de Patrones en

²⁶ NetDDF (*Network Common Data Format*) es un formato estándar para el almacenamiento de datos auto-contenidos que no necesita de más archivos para su correcta interpretación.

combinación con la manipulación y procesamiento de imágenes digitales. El entrenamiento asistido tiene como objetivo el aprendizaje por parte del programa para lograr identificar en forma automática si existe presencia de nubosidad en cada pixel, y a qué tipo de nubosidad corresponde. Los tipos de nubes o la ausencia de ellas se encasillan en cuatro clases previamente definidas que se detallarán en el capítulo 7.4.2. Para lograr el aprendizaje antes descrito, el programa necesita interactuar con el usuario para realizar un proceso de extracción de características de las imágenes satelitales para todas las clases definidas, por eso recibe el nombre de entrenamiento asistido. La forma de realizar el entrenamiento será explicado con detalles en el capítulo 7.4.2. El *output* de este procedimiento es una matriz de entrenamiento **f**, un vector de clasificación **d** y un vector **fn** que registra el nombre de las características extraídas en **f**. Cuando se habla de las imágenes satelitales, se hace referencia a todos los datos que llegan con cada uno de los archivos provenientes de la DMC, estos son las imágenes del espectro visible (canal 1), las del espectro infrarrojo (canal 4), los archivos de *scatter phase* (SP) y los datos para la georreferenciación.

Luego de realizar el entrenamiento asistido, el programa se encuentra en condiciones de clasificar y calcular el índice de cobertura efectiva de nubes para todas las imágenes que permita el rango de imágenes con que se realizó el entrenamiento. Por ejemplo, si se van a procesar todas las imágenes del mes “i”, el resultado esperado es que todos los pixeles de cada una de las imágenes de dicho mes sean clasificados y posteriormente se les calcule su índice de cobertura efectiva (CCI_{eff}). Para lograr esto de la mejor forma posible, el programa debe haberse entrenado sobre días determinados de los meses “i-1”, “i” e “i+1”, que se especificarán con detalle en el capítulo 7.4.2.

La siguiente etapa corresponde a la Clasificación de Imágenes y utiliza como variables de entrada las matrices **f**, **fn** y el vector de clasificación **d**. En esta fase del procedimiento, se realiza un escaneo automático de todos los pixeles de las imágenes del mes a procesar, extrayéndoles las características definidas en **fn**. A continuación se lleva a cabo un proceso de normalización de las características extraídas para finalmente asignarle a cada pixel una de las cuatro clases mediante el uso de un clasificador de tipo

lineal llamado *Linear Discriminant Analysis*. El resultado de este proceso es una nueva imagen **dI**, del mismo tamaño de la imagen correspondiente al canal 1, en que cada pixel tomará un valor entero entre uno y cuatro, que representará la clase a la que fue asignado. Se generará una imagen de clasificación **dI** para cada set de imágenes del mes a procesar.

El cuarto paso corresponde al cálculo del *performance* de la clasificación, para ello, se utiliza una técnica ampliamente usada en el reconocimiento de patrones llamada validación cruzada, que bajo algunos supuestos estadísticos para la distribución de las características de las muestras (en este caso pixeles), determina el desempeño de la clasificación con un nivel de certeza conocido. Este paso intermedio y previo al cálculo del CCI_{eff} es necesario para saber si la clasificación se está desarrollando en forma correcta. Es importante tener un nivel de clasificación adecuado para poder continuar, ya que si el desempeño calculado en esta etapa es bajo, no es recomendable seguir adelante, porque significa que la matriz de entrenamiento **f** generada en la fase de entrenamiento no es de buena calidad. Si esto ocurre se debe realizar el entrenamiento y la clasificación de las imágenes nuevamente.

El último paso de la metodología implementada consiste en el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes, que utiliza como parámetros de entrada las imágenes clasificadas **dI** y todos los archivos del mes a procesar (Canal 1, canal 4, SP y archivos de georreferenciación). El procedimiento consiste en un escaneo completo de todas las imágenes, donde se identifican aquellos lugares geográficos donde se presentaron los mayores grados de cobertura para los pixeles clasificados con nubosidad, y aquellos que presentaron los días más claros de cielo descubierto para los pixeles clasificados como despejados. La identificación de dichos lugares se realiza sólo entre pixeles comparables en términos de luminosidad, para ello se filtra con la información proveniente de los archivos de SP, ya que para ángulos parecidos entre el sol y el satélite, la luminosidad que llega al lente del satélite es semejante.

Luego de identificar las condiciones extremas de presencia, ausencia de nubosidad y valores característicos del albedo de superficie del período de estudio, se calculan

empíricamente los ponderadores para cada clase, lo que permite asignar a cada pixel de las imágenes el valor del índice de cobertura efectiva de nubes en función de la clase que fue clasificado. El valor del CCI_{eff} para cada pixel, correspondiente a un número real entre cero y uno, que representan los valores de mínima y máxima cobertura posible respectivamente. El *output* de esta etapa es una nueva matriz CCI_{eff} , del mismo tamaño que la imagen del espectro visible para cada set de imágenes del período de estudio, donde cada punto (i,j) de la matriz, es el valor del índice de cobertura efectiva de nubes calculado para el correspondiente pixel de la imagen en el canal visible.

Las imágenes CCI_{eff} , junto con algunas variables climatológicas que intentan describir las particularidades de la atmósfera de Chile, son los parámetros de entrada que utiliza el modelo físico de transmitancia atmosférica CHILE-SR, cuyo resultado final son mapas de estimaciones de radiación solar sobre la superficie del territorio chileno. Los mapas de radiación producidos se pueden visualizar en los tres formatos de radiación solar: global, directa y difusa.

Cada una de las etapas del procedimiento desarrollado para el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes que se han mencionado se explica con mayor grado de detalles en los sub-capítulos a continuación.

7.4.1. Pre-Procesamiento de Imágenes

El primer paso de la metodología propuesta consiste en el pre-procesamiento de los archivos que son enviados diariamente por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), cuyas etapas se muestran en el diagrama de flujo presentado en la Figura 7-15.

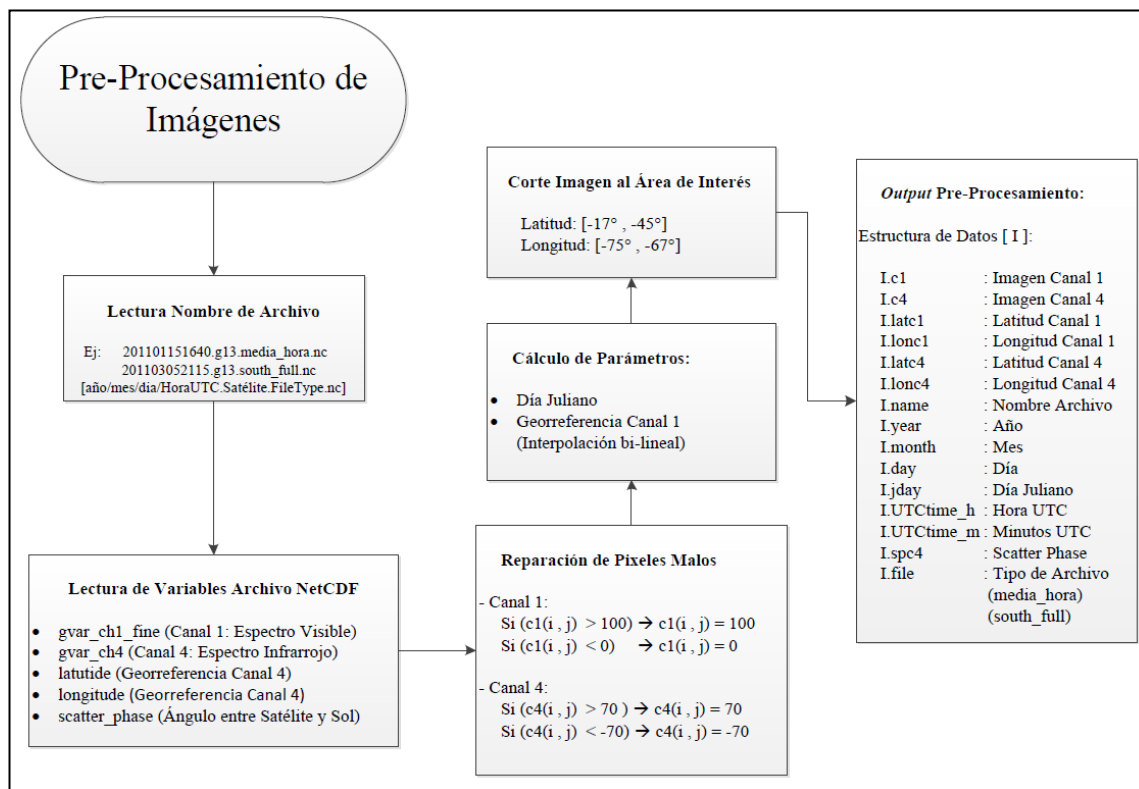


Figura 7-15: Diagrama de Flujo Pre-Procesamiento de Imágenes

Los datos satelitales consisten en 39 archivos NetCDF, en que cada uno corresponde a la información procesada por el satélite a una determinada hora del día. De las 39 imágenes diarias, 26 de ellas corresponden a archivos con extensión “media_hora” y las restantes 13 con “south_full”. Las primeras son imágenes que abarcan una franja horizontal entre los paralelos 20° S y 45°S, mientras que las de extensión “south_full” son de mayor dimensión, considerando una extensión terrestre comprendida entre las latitudes 10° N y 50° S. Tal como se muestra en el primer recuadro del diagrama de flujo, cada archivo lleva en el nombre información del año, mes y hora en que fueron capturadas las imágenes. Tomando el mismo ejemplo de la figura, el archivo: 201101151640.media_hora.nc, corresponde a los datos procesados por el satélite el día 15 de Enero del año 2011 a las 14:40 hrs. (UTC) en formato “media_hora”. Cada uno de los archivos NetCDF contiene cinco variables que deben ser extraídas: una imagen del espectro visible (canal 1), que considera el rango espectral comprendido entre las

longitudes de onda de magnitud $0,5\ \mu\text{m}$ y $0,7\ \mu\text{m}$, una del espectro infrarrojo (canal 4), que da información de la radiación comprendida entre los $10,2\ \mu\text{m}$ y $11,2\ \mu\text{m}$ de longitud de onda, un archivo de latitud y longitud, que dan información de la referencia geográfica de cada pixel de las imágenes, y finalmente el archivo de *scatter phase* (SP), que entrega información del ángulo formado entre la posición del satélite y el sol para cada pixel de la imagen. Los cinco archivos vienen en dos resoluciones diferentes, el canal 1 tiene una resolución fina de aproximadamente $1\ \text{km} \times 1\ \text{km}$ por pixel, mientras que los otros cuatro vienen en una resolución más baja de $4\ \text{km} \times 4\ \text{km}$ por pixel. La información proveniente en los archivos de extensión *south_full* viene almacenada en matrices de datos de dimensión $[5.320 \times 10.260]$ para la resolución fina y de $[1.330 \times 2.565]$ para las de resolución normal, mientras que los de extensión *media_hora* son de dimensiones $[1.728 \times 9.020]$ y $[432 \times 2.255]$ respectivamente. En la Figura 7-1 se muestra un ejemplo de una imagen del canal visible de extensión *south_full* en tamaño completo.

Luego de extraer los archivos del set de datos, se realiza la eliminación de imágenes nocturnas, para ello se calcula la posición solar según el día y la hora, eliminándose aquellos archivos que correspondan a imágenes en que el ángulo de elevación del sol es menor a los 3° . A continuación se procede a la georreferenciación de las imágenes en el espectro visible mediante un proceso de interpolación bilineal para luego continuar con el recorte de las imágenes al área de interés, que considera todo el territorio chileno hasta un poco más al sur de la isla de Chiloé, específicamente entre las latitudes $17^\circ\ \text{S}$ y 45° , y longitudes $67^\circ\ \text{W}$ y $75^\circ\ \text{W}$. Luego del recorte las imágenes quedan de $[1.792 \times 1.092]$ pixeles en la resolución fina, y de $[448 \times 273]$ en resolución normal para los archivos *south_full*, mientras que para los de extensión *media_hora*, las matrices quedan de $[1.696 \times 1.092]$ y de $[424 \times 273]$ para cada una de las resoluciones respectivamente.

A continuación se realiza la reparación de pixeles malos, que consiste en la interpolación de los vecinos más cercanos en el caso que vengan filas o columnas sin datos, o bien, en la imposición de cotas en los canales 1 y 4. Para el caso de las imágenes del canal 1 se establecen las cotas mínimas y máximas en 0% y 100% respectivamente al estar en

porcentaje de albedo, y en las imágenes del canal 4 se establecen entre los -70°C y 70°C , al proveer información termal de la imagen capturada.

Luego de los pasos descritos, se guarda la información procesada en una estructura de datos **I** del *software* MATLAB. En el último recuadro del diagrama de flujo presentado en la Figura 7-15 se muestra la información almacenada en esta variable, y en la Figura 7-16 se muestra un ejemplo de la interfaz en MATLAB de la información almacenada luego de procesar el archivo 201103051640.media_hora.nc.

```

I =

    name: '201103051640.g13.media_hora.nc'
   year: 2011
  month: 3
   day: 5
UTCtime_h: 16
UTCtime_m: 40
   jday: 64
   file: 1
  latc4: [424x273 double]
  lonc4: [424x273 double]
  latc1: [1696x1092 double]
  lonc1: [1696x1092 double]
   sem: 'jun'
  spc4: [424x273 double]
    c1: [1696x1092 double]
    c4: [424x273 double]

```

Figura 7-16: Ejemplo Información Almacenada en Estructura de Datos I

En la Figura 7-17 a continuación, se presenta un ejemplo de las variables **I.c1** y **I.c4** de la estructura de datos, que corresponden a las imágenes en el canal 1 y 4 de la estructura de datos presentada en la Figura 7-16.

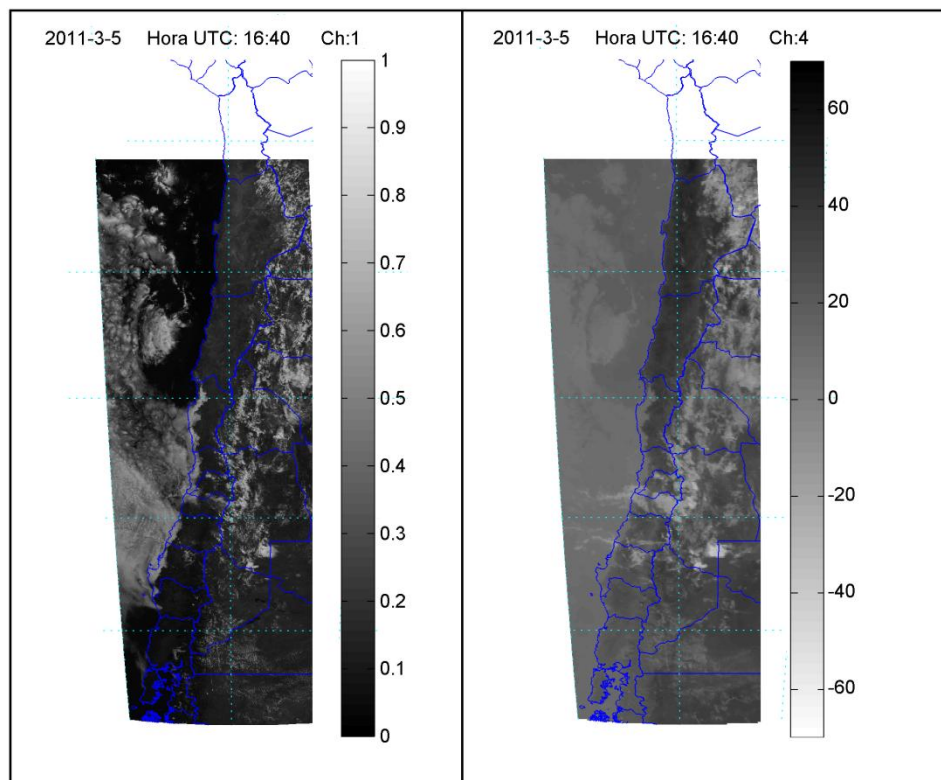


Figura 7-17: Ejemplo Imágenes del Canal 1 y 4 luego del Pre-Procesamiento

7.4.2. Entrenamiento Asistido

El segundo paso del procedimiento se denomina entrenamiento asistido, cuyo nombre se explica porque necesita de la interfaz con un usuario para funcionar. En esta etapa, el programa aprende a identificar los tipos de nubosidad que se pueden presentar en cada pixel, a modo de preparación para la etapa siguiente, en que deberá clasificar el tipo de nubosidad presente en cada punto de las imágenes.

La presencia o ausencia de nubosidad y todos los tipos de nubes que se podrán identificar en las imágenes se asocian según sus principales características en los siguientes cuatro grupos o clases.

- Clase 1: *Clear Sky*
- Clase 2: St, Sc, As, Ac

- Clase 3: Ns, Cu, Cb
- Clase 4: Ci, Cc, Cs

La clase 1 corresponde a los pixeles que no presentan presencia de nubosidad, por ello su nombre en inglés que hace referencia a un cielo despejado.

En la clase 2 se agrupan las nubes de los géneros *Stratus*, *Stratocumulus*, *Altostratus* y *Altostratus* que se ubican en las zonas bajas y medias de la atmósfera, llegando en promedio hasta los 7.000 m de altura aproximadamente. Estos géneros presentan generalmente un espesor óptico de nivel medio, sin tener un importante desarrollo de tipo vertical, tal como se explicó en el capítulo 7.3.1.1, y se puede observar en la representación de la Figura 7-13.

La clase 3 agrupa las nubes del género *Nimbostratus*, *Cumulus* y *Cumulonimbus* que poseen un espesor óptico importante, en especial las últimas dos que se desarrollan en forma vertical, pudiendo tener su tope superior en niveles muy elevados de la atmósfera, pudiendo alcanzar los 10.000 m o incluso los 12.000 m de altura.

Finalmente la cuarta clase agrupa las nubes del género *Cirrus*, *Cirrocumulus* y *Cirrostratus*, que se caracterizan por tener un espesor óptico muy delgado y posarse en la parte superior de la atmósfera, entre los 8.000 m y 10.000 m de altura.

Tal como se muestra en el diagrama de flujo de esta etapa presentado en la Figura 7-18, el usuario debe especificar al programa el rango de imágenes con las que se desea entrenar, que tal como se comentó en el capítulo 7.4, lo ideal es que sean ciertos días entre los 16 previos a la primera imagen a procesar para el cálculo del CC_{Ieff} y algunos otros de los 16 días posteriores a la última imagen del grupo. Después de especificar el intervalo de archivos a entrenar, el programa comienza a desplegar en pantalla todas las imágenes correspondientes a dicho rango manera semejante a como se muestra en la Figura 7-17 mostrando en pantalla las imágenes del canal 1 y 4 para cada archivo.

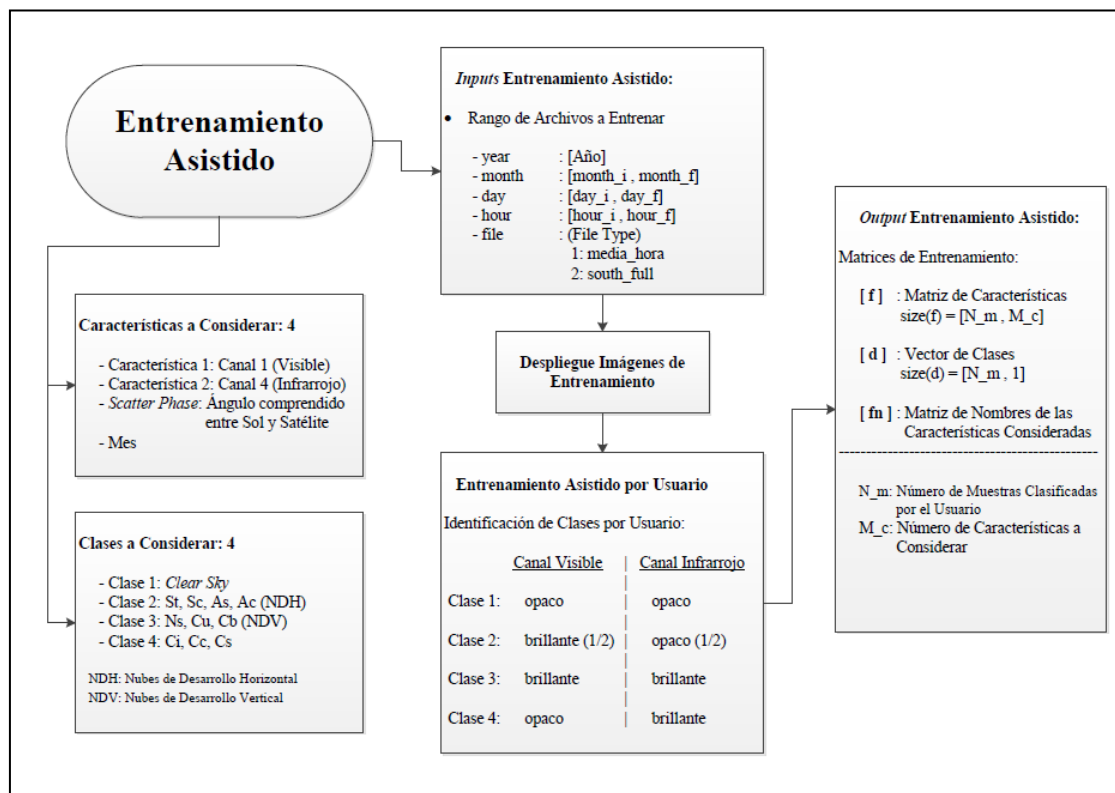


Figura 7-18: Diagrama de Flujo Entrenamiento Asistido

Una vez desplegada las imágenes de entrenamiento, el programa solicita al usuario marcar con el puntero del mouse los puntos correspondientes a la clase 1, 2, 3 y 4 en forma consecutiva. Este procedimiento se realiza en forma iterativa hasta terminar con todos los archivos del rango especificado. El número de puntos a marcar por clase, y los días de entrenamiento óptimos a considerar se detallarán más adelante.

A medida que el usuario marca los puntos de cada clase sobre la imagen, el programa comienza a extraer características de todos los canales de información que asocia a cada clase. Como se aprecia en el diagrama de flujo presentado, el programa extrae las siguientes cuatro características por cada punto marcado por el usuario:

- Característica 1: Magnitud de radiación en el espectro visible (Canal 1), medido en porcentaje de albedo.
- Característica 2: Magnitud de radiación en el espectro infrarrojo (Canal 4), medido en grados Celsius.

- Característica 3: Ángulo comprendido entre el sol y el satélite en función del día, hora y posición geográfica (*scatter phase*).
- Característica 4: Mes al que pertenece la imagen de entrenamiento.

La primera característica entrega información del espesor de la nube en caso de haber presencia de nubosidad, siendo más brillante mientras más espesor tenga, representado en un porcentaje de albedo mayor. Por el contrario, será cada vez más oscura, mientras menos espesor tenga la nube, hasta el punto de observarse un pixel negro, que indicará ausencia absoluta de nubosidad.

La segunda característica entrega información termal, mostrando la temperatura calculada del tope superior de las nubes. De esta información, se puede extraer la altura aproximada a la que se encuentra la parte superior de las nubes, ya que la temperatura a la que se encuentra la nubosidad, corresponde a temperatura atmosférica de la altura en que esté ubicada. En la Figura 7-19 se muestra el perfil estándar de temperatura atmosférica, y considerando que las nubes se ubican entre la superficie y la tropopausa (hasta los 10.000 m aproximadamente), estas pueden presentar temperaturas que varían entre los 15°C cuando están cercanas a la tierra y los -60°C aproximadamente. Por esta razón en la fase del pre-procesamiento se establece una cota de -70°C, ya que a esta o menores temperaturas, se concluye que la nube tiene su tope superior en la zona alta de la tropósfera. Considerando el caso de ausencia de nubosidad, el espectro infrarrojo arrojará valores de temperatura de la superficie terrestre, que a excepción de lagos, nieve y salares, durante el día arrojará valores superiores a los que percibe cuando hay presencia de nubosidad.

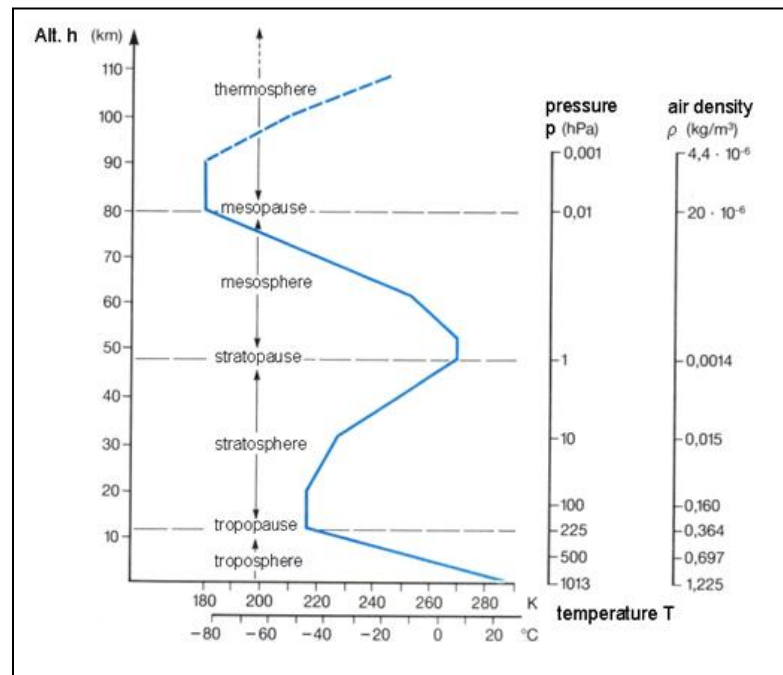


Figura 7-19: Perfil de Temperatura Atmosférica
(Imagen Extraída de sitio Web)²⁷

La tercera característica entrega información de la luminosidad o brillo de la imagen en el espectro visible, siendo estas mucho más claras cerca del medio día, donde se registran valores cercanos a los 25° en comparación con las imágenes del atardecer, que pueden alcanzar valores superiores a los 80°, las que se ven muy oscuras en el canal visible.

Finalmente la cuarta característica almacena el mes correspondiente a la imagen de la que se capturó el pixel por parte del usuario.

Conociendo las clases y la información que entregan las características, el usuario tiene la capacidad de identificar visualmente la clase de todos los pixeles de la imagen considerando las primeras dos características. En la Figura 7-20 se muestran las reglas básicas que establecen las relaciones a considerar al entre las clases y características.

²⁷ http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Introducti_n_al_Clima/-_Atm_sfera_440.html
(visitado 14.11.2011)

Entrenamiento Asistido por Usuario		
Identificación de Clases por Usuario:		
	<u>Canal Visible</u>	<u>Canal Infrarrojo</u>
Clase 1:	opaco	opaco
Clase 2:	brillante (1/2)	opaco (1/2)
Clase 3:	brillante	brillante
Clase 4:	opaco	brillante

Figura 7-20: Relación entre Clases y Características

A medida que el usuario marca los puntos de la imagen correspondientes a cada una de las clases, el programa comienza a guardar las cuatro características en la matriz de entrenamiento **f**, ubicando en la primera columna la característica 1, en la segunda la característica 2 y así hasta la cuarta columna. De esta manera, para cada punto marcado por el usuario se creará una nueva fila que se llenará con las cuatro características. En forma conjunta se construye el vector columna de clasificación **d**, que irá almacenando el número de la clase asignada por el usuario en la posición correspondiente. Por último, se crea la matriz **fn** que almacena el nombre de las cuatro características extraídas.

Luego del proceso de entrenamiento, si el usuario marcó “P” puntos en total, la matriz de entrenamiento **f** será de dimensión $[P \times 4]$ y el vector de clasificación **d** será de largo $[P]$.

Las cuatro columnas de **f** formarán en un espacio de características de cuatro dimensiones, generando zonas en el espacio donde habrá un predominio de alguna de las clases correspondientes. Esta situación se muestra en el mapa de características presentado en la Figura 7-21, para el caso en que se consideran las dos primeras columnas de la matriz de entrenamiento del mes de Enero de 2011.

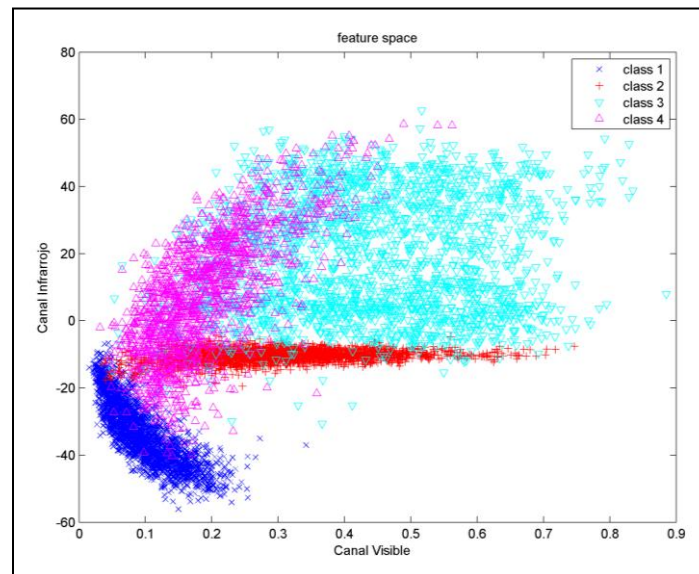


Figura 7-21: Mapa de Características del Entrenamiento Correspondiente a Enero de 2011

Se puede apreciar que existe una distribución de características para las clases considerando sólo las extraídas del canal visible e infrarrojo.

En la Figura 7-22 a continuación, se muestra el mismo set de entrenamiento, pero esta vez considerando las tres primeras características, formándose así una muestra espacial de los datos de entrenamiento. La situación es análoga al caso para dos dimensiones, pues se ven ciertos sectores en el espacio donde existe una concentración de clases. Éstos son los parámetros que en la etapa de clasificación el programa interpreta y aprende por medio de un clasificador de tipo lineal que será explicado en el capítulo 7.4.3.

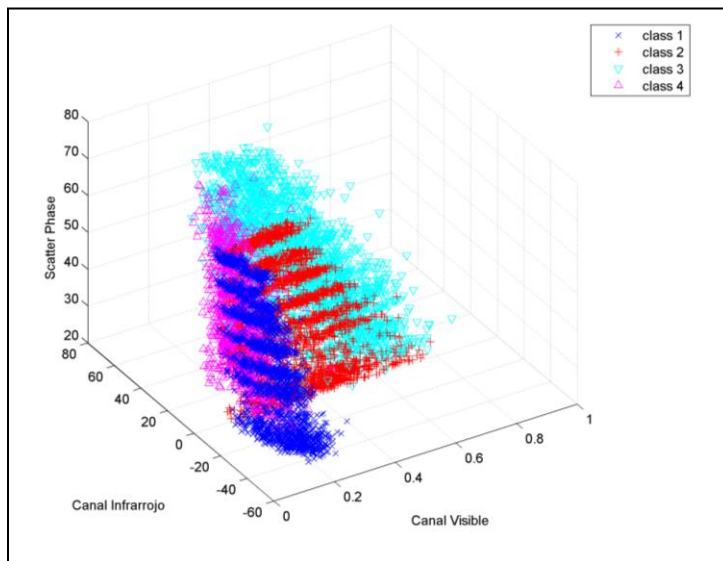


Figura 7-22: Muestra Espacial de Características del Entrenamiento Correspondiente a Enero de 2011

El clasificador que se utilizará para la fase de clasificación de imágenes será uno de tipo lineal, conocido como *Linear Discriminant Analysis* (LDA) (Park & Park, 2008). Éste clasificador trabaja bajo el supuesto que cada set de características extraídas en el proceso de entrenamiento representa a un grupo de variables aleatorias que poseen una cierta distribución. Esto sumado a lo que enuncia el Teorema Central del Límite, que cuando se cuenta con un número de muestras superior a 30 de un grupo de variables aleatorias, la distribución de la suma de ellas tiende a una distribución normal (Blaiotta & Delieutraz, 2004), el número mínimo de muestras a considerar por cada clase en la matriz de entrenamiento f , para cada uno de los intervalos de *scatter phase* definidos es 30, ya que el clasificador LDA estima las matrices de varianza-covarianza asumiendo este supuesto.

En el capítulo 7.4.3 se explicará cómo el clasificador LDA trabaja con el set de datos de entrenamiento, y en los párrafos a continuación, se muestra la forma de determinar los días de cada mes a utilizar para la fase de entrenamiento con el objetivo de lograr obtener un mínimo de 30 muestras por clase, para cada intervalo de análisis determinado

por la variable *scatter phase*, que asegurará en cada grupo de muestras sólo pixeles comparables por luminosidad.

El SP es la variable que se utiliza para determinar el conjunto de muestras comparables entre sí, entregando información de la luminosidad en las imágenes. El clasificador implementado trabaja con un rango de SP de 5° , con el que logra clasificar en forma correcta los pixeles de las imágenes. Utilizando este rango máximo de SP, un mismo tipo de nubosidad tendrá siempre un valor semejante en el espectro visible, lo que no ocurriría si se compararan imágenes con SP muy diferentes entre sí, tal como se aprecia en la Figura 5-2, donde un mismo tipo de nubosidad se observa con diferentes valores para la imagen de las 17:45 hrs. (UTC) en comparación con la de las 21:40 hrs. (UTC), siendo bastante mayor en la primera.

En las imágenes presentadas en la Figura 7-23, Figura 7-24 y Figura 7-25, se presenta la variación diaria de la variable SP para tres localidades de Chile: San Pedro, correspondiente a la zona norte del país, Santiago, de la zona central y Puerto Montt representando una localidad de la zona sur. La primera figura muestra el comportamiento diario de esta variable para las 12:40 hrs. (UTC), que corresponde a las 9:40 hrs. hora local, a partir del día 2 de Enero de 2011. Las dos imágenes siguientes muestran la misma situación, pero para las 16:40 hrs. (UTC) y 20:40 hrs. (UTC) respectivamente.

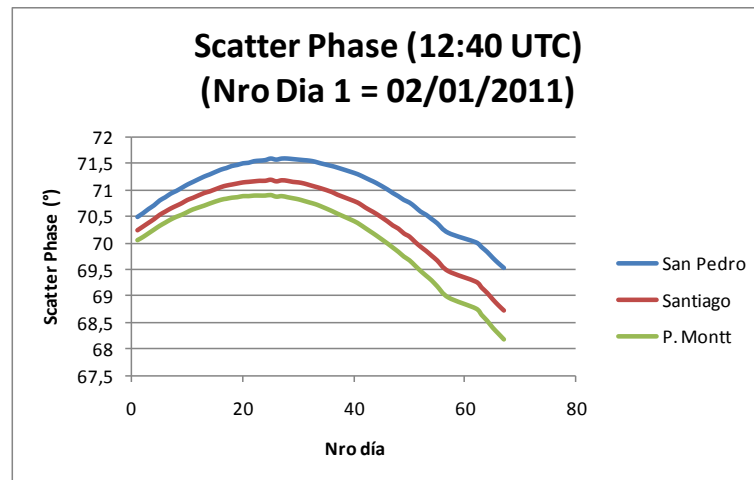


Figura 7-23: Variación Diaria de *Scatter Phase* para Diferentes Localidades de Chile. 12:40 hrs. (UCT)

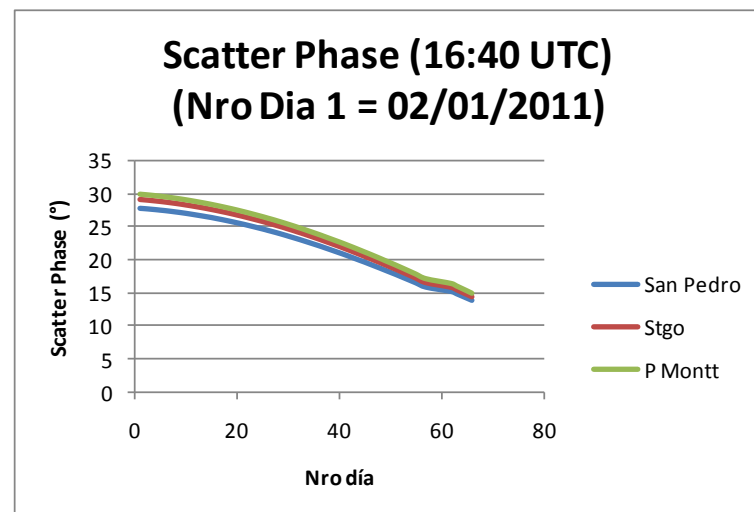


Figura 7-24: Variación Diaria de *Scatter Phase* para Diferentes Localidades de Chile. 16:40 hrs. (UCT)

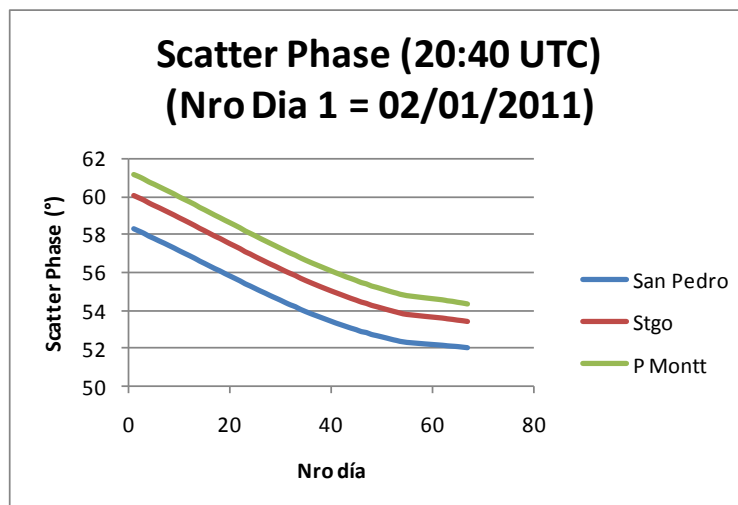


Figura 7-25: Variación Diaria de *Scatter Phase* para Diferentes Localidades de Chile. 20:40 hrs. (UCT)

En las figuras previas se puede apreciar que el ángulo comprendido entre el sol y el satélite varía en forma similar para todas las zonas del país a lo largo de los días, pero no si se consideran diferentes horas del día. Con el objetivo de determinar el promedio de variación diaria máxima para el SP, se utilizaron los puntos máximos y mínimos para determinar una pendiente aproximada de las curvas para cada una de las horas. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas: Tabla 7-3, Tabla 7-4 y Tabla 7-5, que resumen los cálculos realizados para el caso de las 12:40 hrs. (UCT), 16:40 hrs. (UCT) y 20:40 hrs. (UCT) respectivamente.

Tabla 7-3: Análisis de Variación Diaria de *Scatter Phase*. 12:40 hrs. (UCT)

	Max	Día Max	Min	Día Min	(max-min)	Dif_días	dSP/día	dSP/hora
San Pedro	71,58	25	69,52	67	2,06	42	0,049	11,357
Santiago	71,19	25	68,73	67	2,46	42	0,059	11,057
P. Montt	70,89	25	68,17	67	2,72	42	0,065	10,849

Tabla 7-4: Análisis de Variación Diaria de *Scatter Phase*. 16:40 hrs. (UTC)

	Max	Día Max	Min	Día Min	(max-min)	Dif_días	dSP/día	dSP/hora
San Pedro	27,69	1	13,89	66	13,8	65	0,212	11,357
Santiago	28,97	1	14,52	66	14,45	65	0,222	11,057
P. Montt	29,81	1	14,99	66	14,82	65	0,228	10,849

Tabla 7-5: Análisis de Variación Diaria de *Scatter Phase*. 20:40 hrs. (UCT)

	Max	Dia Max	Min	Dia Min	(max-min)	Dif_dias	dSP/dia	dSP/hora
San Pedro	58,34	1	52,06	67	6,28	66	0,095	11,357
Santiago	60,01	1	53,39	67	6,62	66	0,100	11,057
P. Montt	61,14	1	54,31	67	6,83	66	0,103	10,849

En las tablas precedentes se puede observar que para la zona sur a las 16:40 hrs. (UCT), se presenta la mayor variación diaria de SP, alcanzando los 0,23°/día. Éste valor extremo será utilizado para calcular el número de días a entrenar por mes con el objetivo de lograr al menos 30 muestras por clase para intervalos de *scatter phase* de 5°.

Luego de conocer la variación diaria de SP para diferentes zonas y horarios representativos a lo largo de 65 días, a continuación, en la Figura 7-26 se muestra la variación horaria de SP durante el día 15 de Enero de 2011.

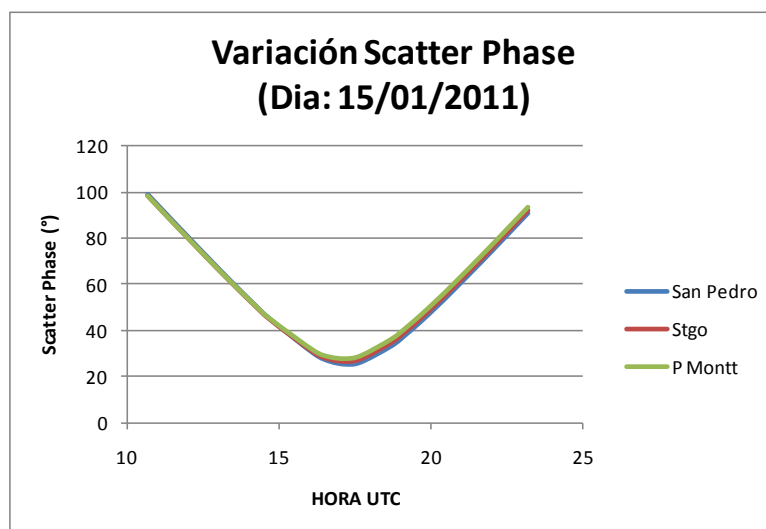


Figura 7-26: Variación Horaria de *Scatter Phase* para Diferentes Localidades de Chile. 15 Enero 2011

Se puede apreciar que durante el amanecer y atardecer del día se producen los valores máximos, y alrededor del medio día se presenta el menor valor, generando la forma parabólica de la gráfica. Otro aspecto importante a destacar, es que para cualquier hora del día, los valores de SP observados para las tres zonas del país son muy semejantes, no alcanzando a superar una diferencia de 5° entre ellos. Por esta razón se concluye que para cualquier hora en que se capture la imagen satelital, todos los pixeles a lo largo de Chile son comparables entre sí.

Otra información importante que se obtiene a partir de la Figura 7-26 es que para cualquier hora del día habrá al menos dos imágenes que tendrá pixeles comparables entre sí. Por ejemplo, una imagen de las 14:30 hrs. (UCT) será comparable con una imagen de las 20:30 hrs. (UCT), ya que tendrán valores de SP en un rango menor a $\pm 5^\circ$ por pixel.

Considerando todos los factores mencionados, se realizó un análisis para determinar el número de días por mes a utilizar para la fase de entrenamiento, cuyos resultados principales se resumen en la Tabla 7-6. El detalle de los valores utilizados para obtener los resultados mostrados se muestran en la Tabla A- 1, Tabla A- 2, Tabla A- 3, Tabla A- 4, Tabla A- 5 y Tabla A- 6 en el Anexo A: Análisis de *Scatter Phase* Anexo B.

Tabla 7-6: Resumen Resultado de Análisis de *Scatter Phase*

Análisis Scatter Phase	12:40	16:40	20:40
Nro Dias de Dif Maximo	77,2	21,9	48,3
Dif nro Dias a Considerar	5	5	5
Imágenes Disp a Comparar	60	16	36
Puntos Minimios por Clase por Imagen	1	2	1

Los resultados obtenidos señalan que el horario de las 16:40 hrs. (UCT) representa el período del día en que produce la máxima diferencia de SP entre días consecutivos, por eso presenta el menor número de imágenes a comparables para dicha hora, con 21,9 días. Esto quiere decir que para horas cercanas a las 16:40 hrs. (UCT), no serán

comparables las imágenes de los primeros días del mes con las de los últimos días. La segunda fila establece la diferencia entre los días de entrenamiento, en este caso 5, que significa realizar el entrenamiento en intervalos de 5 días. Por ejemplo, si se realiza el entrenamiento de un mes completo, se deberán utilizar las imágenes de los días 5, 10, 15, 20, 25 y 30. Al realizar esto, para cada imagen cercana al horario de las 14:40 hrs. (UCT) tendrá entre las imágenes del entrenamiento al menos 60 comparables entre sí, para las que se encuentran cercanas a las 16:40 hrs. (UCT), tendrán al menos 16, y para las cercanas a las de las 20:40 hrs. (UCT), contarán con al menos 36. Considerando el número de imágenes disponibles a comparar para cada intervalo horario, se calcularon los puntos mínimos a marcar por clase para cada imagen desplegada en el entrenamiento, que se muestra en la última fila de la Tabla 7-6.

Como conclusión de este análisis se determinó como regla de entrenamiento, que éste debía ser realizado para cada mes en intervalos de cinco días, procurando marcar al menos dos puntos por clase para todas las imágenes desplegadas durante el proceso. De esta manera se asegura obtener un mínimo de 30 muestras por clase para intervalos de SP de $\pm 5^\circ$.

7.4.3. Clasificación de Imágenes

El tercer paso de la metodología implementada corresponde a la Clasificación de Imágenes, cuyo procedimiento se resume en el diagrama de flujo presentado en la Figura 7-27.

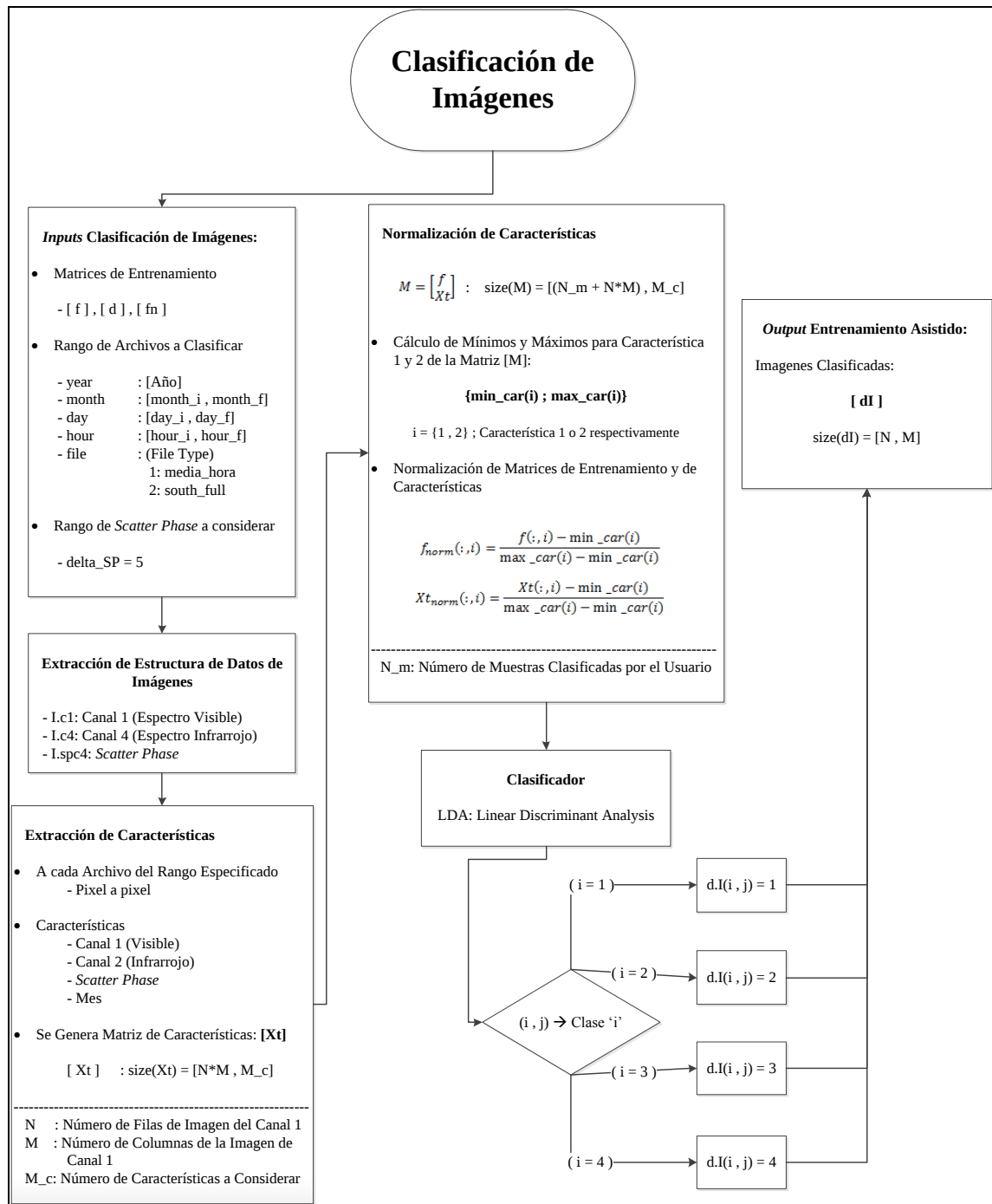


Figura 7-27: Diagrama de Flujo Clasificación de Imágenes

Esta fase utiliza como variables de entrada la matriz de entrenamiento **f**, el vector de clasificación **d**, el vector **fn**, que almacena el nombre de las características almacenadas en **f**, y la imagen a clasificar, con los canales de información visible, infrarrojo, *scatter phase* y los datos de georreferenciación respectivos.

El programa está diseñado para que el usuario establezca el rango de imágenes a clasificar para no tener que iniciar el proceso por cada una de ellas. Por lo tanto, si el rango de imágenes a clasificar corresponde a un mes completo, el procedimiento que se describe a continuación se realiza para cada una de las imágenes.

La primera etapa de la clasificación consiste en la extracción de las características señaladas en **fn** para todos los píxeles de la imagen, las que se almacenan en la matriz de características **Xt**. Si se trata de una imagen de extensión “media_hora” que posee [1696 x 1092] píxeles, la matriz **Xt** tendrá una dimensión de [1.852.032 x 4], donde cada fila corresponde a un píxel de la imagen, y las columnas a las característica extraídas de él. La estructura de **Xt** es semejante a la de **f** ya que la primera columna almacena el valor del espectro visible, la segunda, el valor del espectro infrarrojo, la tercera, el valor correspondiente de SP, y la cuarta columna registra el mes en que fue capturada la imagen correspondiente.

Luego de realizar la extracción, se calcula el promedio simple de los valores de SP de todos los píxeles de la imagen (SP_{prom}), y a continuación se toman de la matriz de entrenamiento **f** todas las muestras que posean un valor de SP que difiera en menos de 5° con el valor SP_{prom} junto con los valores correspondientes del vector de clasificación **d**. En términos simples, se extraen las filas de la matriz **f** y los valores correspondientes del vector **d** que cumplan con la condición:

$$|f_{i,3} - SP_{prom}| \leq 5 \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_m \quad (\text{Ecuación 7-1})$$

Donde N_m es el número de filas de la matriz **f**.

Luego de realizar el filtro por SP de la matriz **f**, se realiza un proceso de normalización de características de la matriz de entrenamiento **f** y de la matriz de características **Xt**, Para finalmente proceder a clasificar cada uno de los píxeles de la imagen, que se

encuentran almacenados en las filas de la matriz $\mathbf{Xt}$, mediante el clasificador *Linear Discriminant Analysis* (LDA).

El clasificador LDA se desarrolla considerando el supuesto que cada set de características extraídas en el proceso de entrenamiento representa a un grupo de variables aleatorias que poseen una distribución determinada. En función de esto, calcula la matriz de covarianza Inter-clase ($\mathbf{C_b}$) y la matriz de covarianza Intra-clase ($\mathbf{C_w}$), considerando las características 1 y 2 del set de entrenamiento. El programa toma la decisión para determinar la clase de la muestra buscando el máximo valor del cociente producido para cada clase entre $\mathbf{C_b}$ y $\mathbf{C_w}$ (Park & Park, 2008). Esto lo hace con el objetivo de buscar la clase que posea la mejor combinación entre maximizar $\mathbf{C_b}$ y minimizar $\mathbf{C_w}$ para la muestra a clasificar.

En la Figura 7-28 se muestra la representación gráfica de lo que realiza el clasificador LDA a través del mapa selector de clases, correspondiente al el set de entrenamiento de Enero de 2011 para las características 1 y 2 después de ser normalizadas, para el rango de SP: $[30^\circ, 35^\circ]$. En la figura se ve cómo se asignan sectores para cada clase en función de la distribución de características de cada una de ellas.

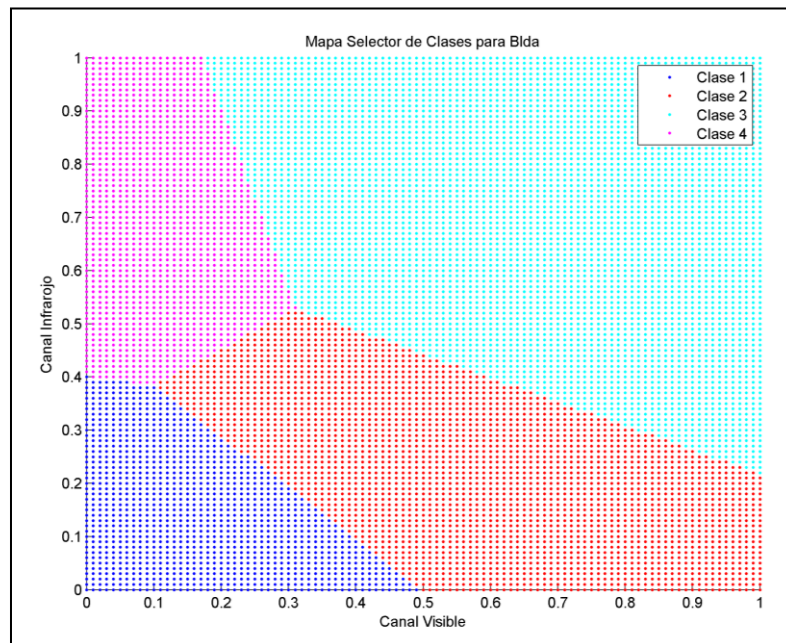


Figura 7-28: Mapa Selector de Clases para Rango de *Scatter Phase*: [30°,35°]

El clasificador LDA adjudica a cada pixel un valor entero entre 1 y 4, correspondiente a la clase que se le asignó en función de las características observadas en la fila correspondiente en **Xt**. El resultado que exporta el clasificador es una imagen de clasificación **dI**, del mismo tamaño de la imagen en el canal 1, en que cada pixel posee el valor de la clase que se le asignó.

En la Figura 7-29 se muestra un ejemplo de las imágenes correspondientes al día 2 de Enero de 2011 a las 12:40 hrs. (UCT), en los canales 1 y 4 previas a ser clasificadas. Y seguido a ella, en la Figura 7-30 se observa la misma imagen pero posterior a la clasificación, donde cada clase es representado por un color diferente. Recordar que las clases fueron definidas de la siguiente manera: clase 1: *Clear Sky*, clase 2: St, Sc, As, Ac, clase 3: Ns, Cu, Cb y clase 4: Ci, Cc, Cs.

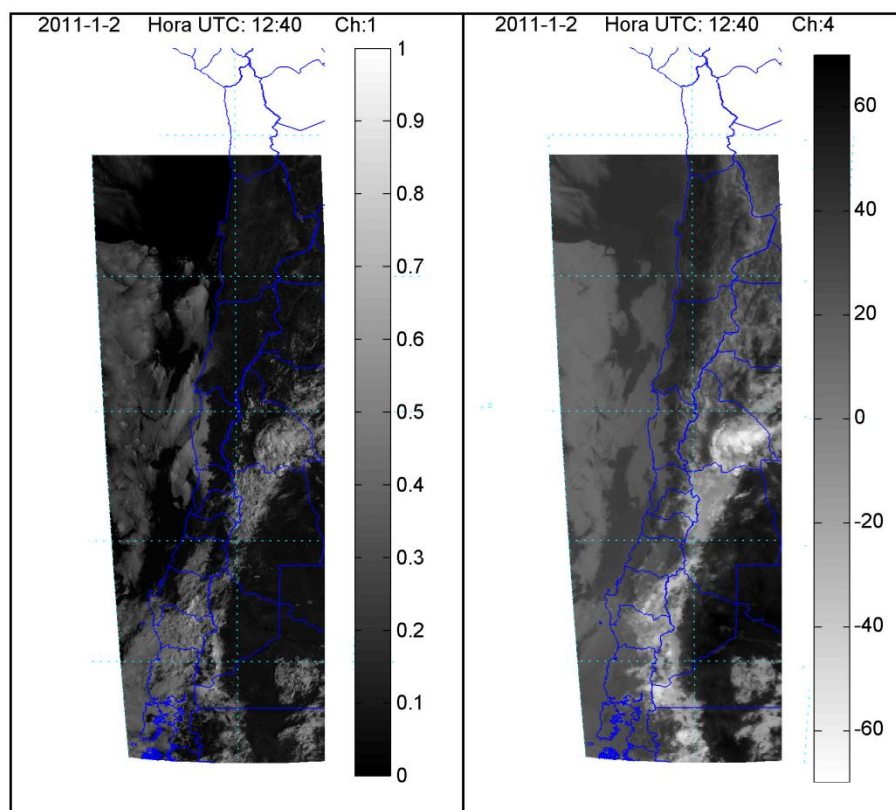


Figura 7-29: Imágenes en Canal 1 y 4 Previas a ser Clasificadas. 2 Enero 2011, 12:40 hrs. (UCT)

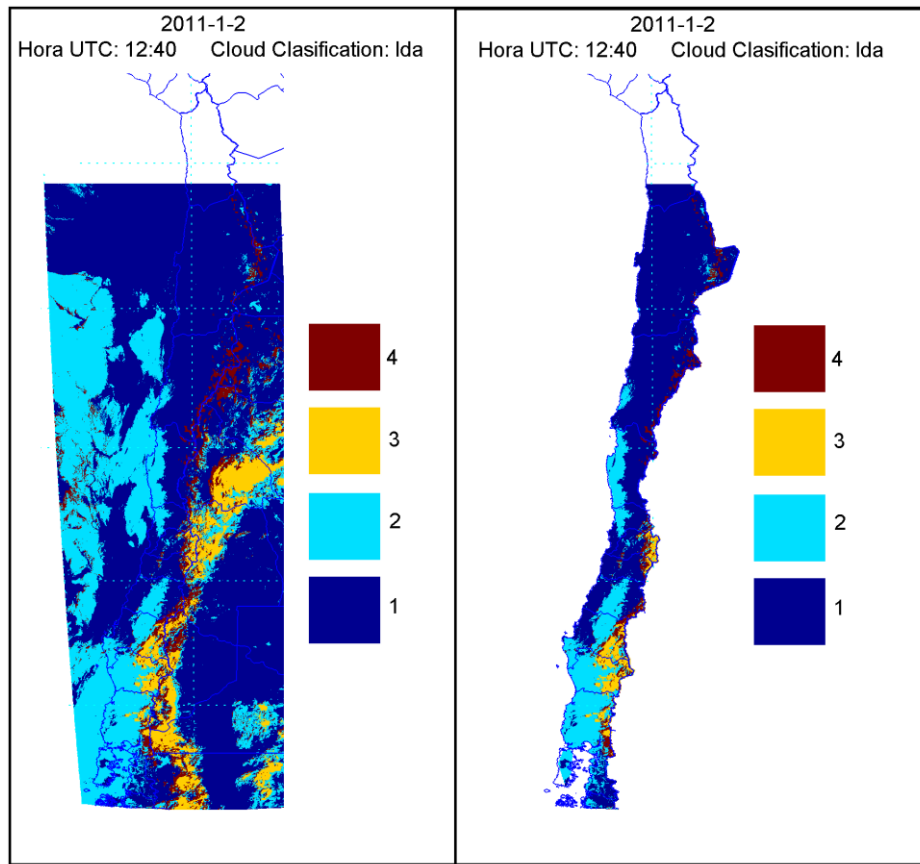


Figura 7-30: Imagen Clasificada por Clasificador LDA. 2 Enero 2011, 12:40 hrs. (UCT)

7.4.4. *Performance* de la Clasificación

La cuarta etapa consiste en el cálculo del desempeño de la clasificación. Si bien esta etapa no es necesaria de realizar antes del último paso para su correcto funcionamiento, es altamente recomendable realizarla en forma previa, ya que entrega información acerca de la calidad del set de entrenamiento producido en la segunda fase. Y por tanto, da información del nivel de exactitud con que se realizó la clasificación en el tercer paso del procedimiento, cuyo resultado sí es directamente influyente en el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes. Las fases del cálculo del *performance* se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 7-31, donde se identifican las variables de entrada

necesarias para su realización: la matriz de entrenamiento **f**, el vector de clasificación **d** y el vector **fn** que contiene el nombre de las características almacenadas en **f**.

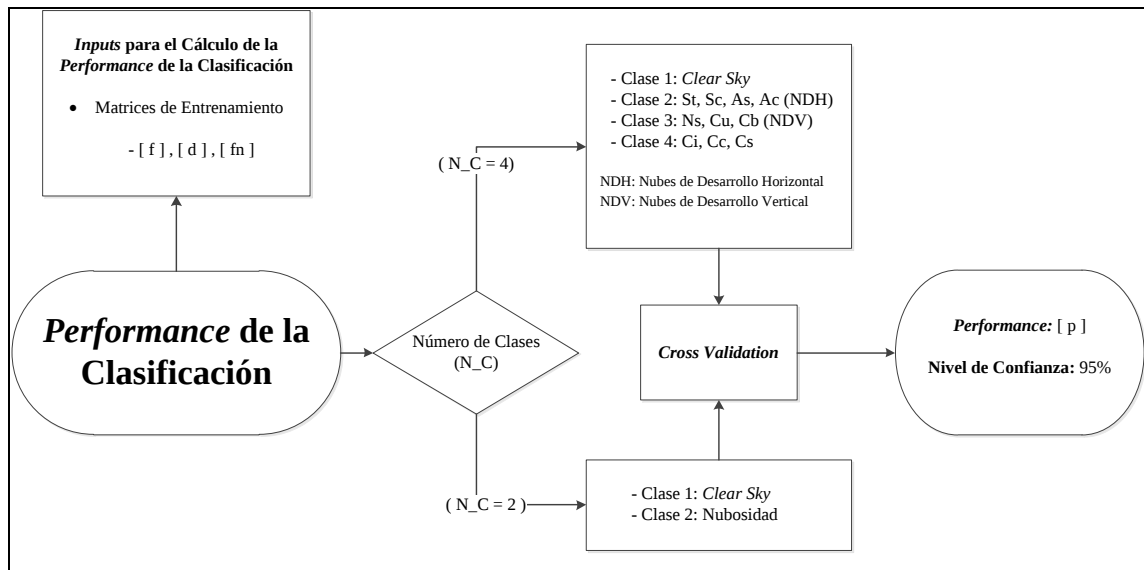


Figura 7-31: Diagrama de Flujo *Performance de la Clasificación*

El cálculo del desempeño de la clasificación se realiza utilizando una metodología ampliamente utilizada en el campo del reconocimiento de patrones llamada validación cruzada, que tiene por objetivo determinar el desempeño de la clasificación intentando eliminar cualquier tipo de sesgo para no caer en errores de subestimación o sobrestimación del desempeño calculado (Anderssen, Dyrstad, Westad, & Martens, 2006).

Se debe recordar que la matriz **f** almacena en cada una de sus columnas las cuatro características correspondientes a las muestras identificadas en la fase del entrenamiento asistido. Por lo tanto, si en dicha fase se identificaron N_m muestras, la dimensión de la matriz **f** será de $[N_m \times 4]$. En forma paralela, el vector de clasificación **d** almacena en cada una de sus casilleros la clase asignada por el usuario a cada muestra de la fila correspondiente de la matriz **f**. Por lo tanto, el vector **d** tendrá un largo de N_m .

El proceso de validación cruzada consiste en la definición aleatoria de un set de entrenamiento y un set de *test* a partir de la matriz $\mathbf{f}$ y del vector $\mathbf{d}$. Lo primero que se hace es tomar al azar el 90% de las muestras de $\mathbf{f}$ con los respectivos valores asociados en $\mathbf{d}$, definiéndolos como la nueva matriz de entrenamiento $\mathbf{f_tra}$ y el nuevo vector de clasificación $\mathbf{d_tra}$, mientras que el 10% restante de las muestras de $\mathbf{f}$ pasarán a ser las muestras a clasificar $\mathbf{f_tes}$, el símil de la matriz de características $\mathbf{Xt}$ del proceso de clasificación, y los correspondientes elementos del vector $\mathbf{d}$, serán el patrón que se comparará con la clasificación que se realice a $\mathbf{f_tes}$. El valor del *performance* para estos nuevos sets se calcula como el número de muestras correctamente clasificadas dividido por el número total de muestras a clasificar (filas de $\mathbf{f_tes}$). Este procedimiento se repite diez veces, para recién calcular el desempeño final como el promedio simple de los diez valores obtenido en cada una de las iteraciones.

El proceso de validación cruzada se realiza para dos escenarios, el primero consiste en el cálculo del *performance* del clasificador considerando dos grandes clases, la primera correspondiente a *clear sky* (clase 1) y la segunda a aquellos pixeles con presencia de nubosidad (clases 2, 3 y 4 en forma conjunta). Y el segundo escenario consiste en medir el desempeño del clasificador considerando las cuatro clases en forma independiente.

Se mide el desempeño bajo estos dos escenarios porque es muy importante que se realice una correcta clasificación de los pixeles de cielo descubierto, ya que en la última etapa del procedimiento se separan estos pixeles de los que se definieron en las clases 2, 3 y 4. Si bien también tiene relevancia en el cálculo del CCI_{eff} el tipo de nubosidad para un pixel determinado, la influencia de una clasificación errónea entre las clases 2, 3 y 4 es muy baja en comparación con un error en la clasificación de los pixeles de la clase 1.

El resultado obtenido para la clasificación correspondiente al mes de Enero de 2011 bajo el primer escenario fue de un 97,16% con una desviación estándar de 1,45% y con un nivel de confianza del 95% en el cálculo de este índice. Y para el segundo escenario, en que se consideran las cuatro clases en forma separada, se obtuvo un desempeño de 88,02% con una desviación estándar de 2,71%, también con un nivel de confianza del

95%. En el capítulo 8 se muestran los resultados obtenidos en esta etapa en forma detallada para cada intervalo de *scatter phase* utilizado.

7.4.5. Cálculo del CCI_{eff}

El cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}) es el último paso de la metodología propuesta, y recibe como parámetros de entrada todo el set de datos de las imágenes del período que se quiera trabajar, que debe ser de al menos un mes, además de las correspondientes imágenes de clasificación **dl** obtenidas en la fase de clasificación para el mismo período. El *output* de este procedimiento es una imagen del mismo tamaño de la imagen en el espectro visible, que guarda los valores calculados del CCI_{eff} correspondientes a cada coordenada de la imagen original. Si el período a trabajar corresponde a un mes que posee “X” archivos, en que cada uno corresponde a un día y hora específica, se obtendrá el mismo número de imágenes con los valores del CCI_{eff} para cada pixel. En la Figura 7-32, Figura 7-34 y Figura 7-35 se muestra el diagrama de flujo de las etapas que realiza el, las que se pueden enmarcan dentro de dos grandes procesos, el primero consiste en el cálculo de índices máximos y mínimos de cobertura y el segundo, en el cálculo del CCI_{eff} .

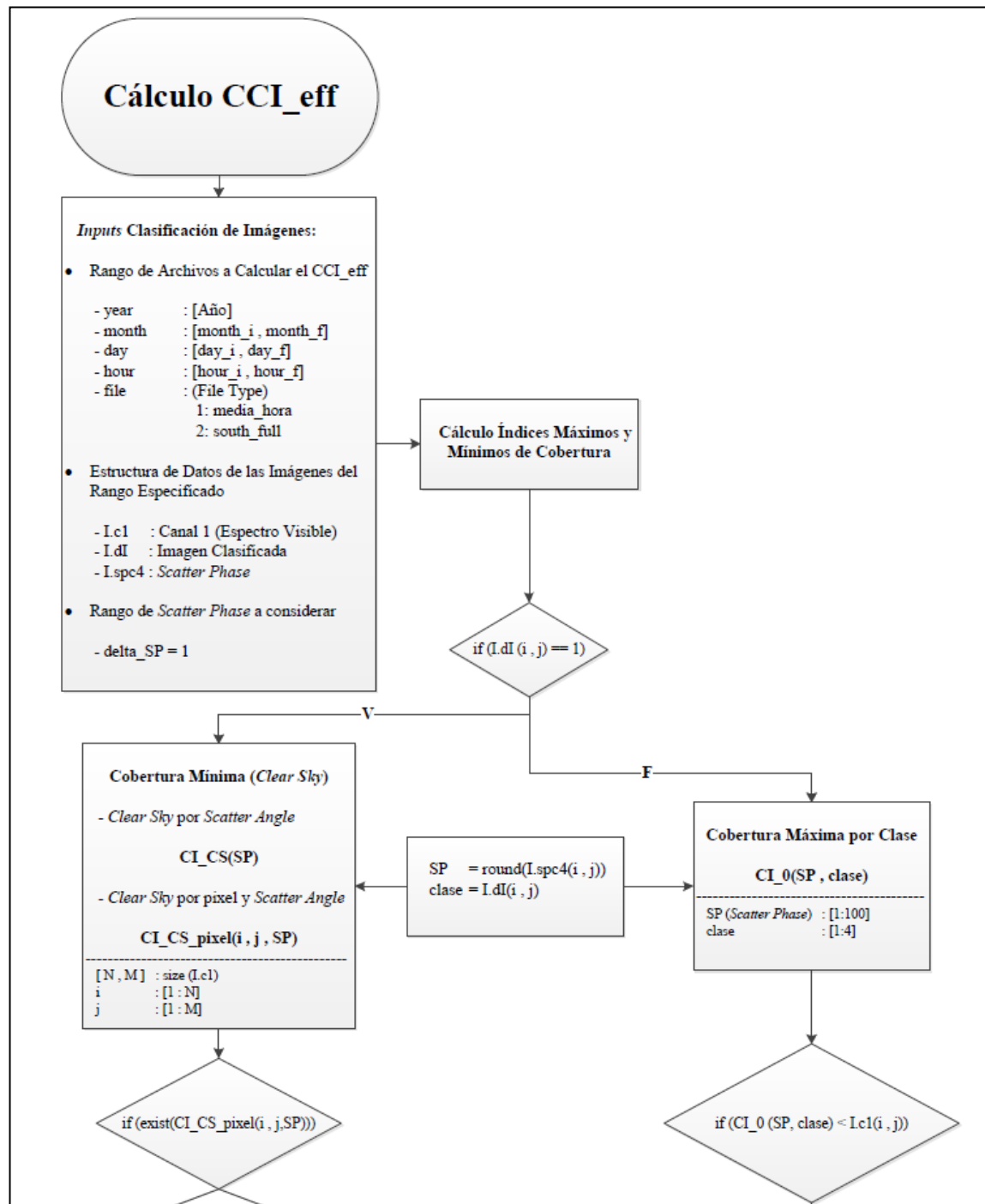


Figura 7-32: Diagrama de Flujo Cálculo del CCI_{eff} (Parte 1)

Figura 7-33: Diagrama de Flujo Cálculo del CCI_{eff} (Parte 2)

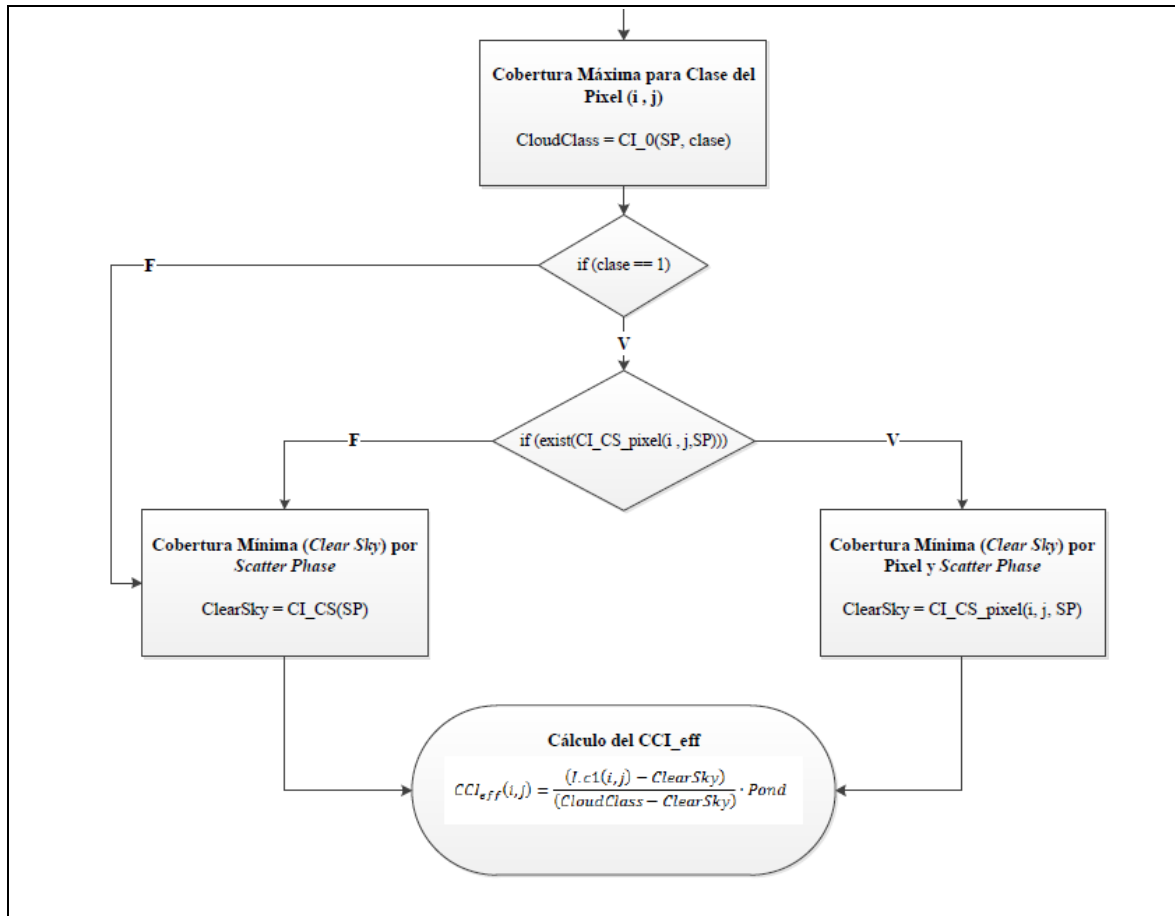


Figura 7-34: Diagrama de Flujo Cálculo del CCI_{eff} (Parte 3)

7.4.5.1. Cálculo de Índices Máximos y Mínimos

Lo primero que hace el programa es un escaneo de los píxeles de las variables que recibe como parámetros de entrada en el rango especificado. A medida que realiza esto, genera la matriz **CI_0** que guarda los valores de máxima cobertura para cada valor posible de *scatter phase* (SP), el vector **CI_CS**, que almacena los valores mínimos para cada valor de SP de todos los píxeles clasificados como *clear sky* en la imagen de clasificación **dl**, y finalmente la matriz **CI_CS_pixel**, que al igual que **CI_CS**, registra los valores mínimos para todos los píxeles clasificados como *clear sky*, pero asociado a cada pixel de la imagen, es decir, registra los valores de albedo terrestre superficial para todos los puntos de la imagen.

El vector y las dos matrices que se crean son comunes para todos los archivos, por lo tanto, si el mes de estudio cuenta con “X” archivos, se guardan los valores extremos encontrados entre todas las imágenes del rango.

Los parámetros extremos que se buscan durante el escaneo, corresponden a los valores mínimos y máximos de las imágenes del canal 1, por lo que es trascendental realizar las comparaciones entre pixeles semejantes. Por esa razón cada punto se compara sólo con aquellos pixeles del rango que tengan un valor de SP que difiera en menos de 1° . Considerando este margen de SP en el rango de comparación, se definen 100 valores posibles de SP: $1^\circ, 2^\circ, \dots, 100^\circ$. No se consideran valores mayores que 100° ya que corresponden a imágenes absolutamente oscuras, por lo que si un pixel llegara a tener un valor superior, se almacena en el rango de los 100° . A modo de ejemplo, si un pixel tiene un valor de SP de $27,8^\circ$, se comparará en el grupo de 30° , y su valor en el espectro visible será guardado en la matriz **CI_0** sólo si tiene un valor de cobertura superior al máximo encontrado entre los pixeles de 30° de la misma clase, en caso de haber sido clasificado como cielo cubierto. O bien, si dicho pixel fue clasificado como despejado, se almacenará en las matrices **CI_CS** y **CI_CS_pixel**, si posee un valor inferior que el resto del pixeles correspondiente al grupo de SP.

Como se observa en la Figura 7-32, la dimensión de la matriz **CI_0** es de $[100 \times 4]$, donde cada fila representa los valores posibles de SP, y las columnas corresponden a la clase de los pixeles. Por otra parte, el vector **CI_CS** tiene dimensión 100, y guarda en cada casillero los pixeles de mínima cobertura asociados a cada valor de *scatter phase*. Por último la matriz **CI_CS_pixel**, de dimensión $[N, M, 100]$, donde N y M representan el número de filas y columnas de la matriz que almacena la imagen del espectro visible. En cada plano de la tercera dimensión se almacenan los valores mínimos de cobertura para cada pixel, o dicho de otra manera, se registra el menor valor característico del albedo superficial de los pixeles de la imagen clasificados como despejados para el valor correspondiente de SP. Por ejemplo, si el pixel (i, j) fue clasificado como día despejado y posee un valor de SP de $41,3^\circ$, se almacenará en la posición (i,j,43) de la matriz

CI_CS_pixel sólo si corresponde al menor valor entre todos los pixeles (i, j) del total de imágenes del rango, que tengan un valor de SP entre 39,6° y 40,4°.

Luego de realizar el escaneo de todas las imágenes del rango especificado, se realiza el cálculo de los ponderadores de cada una de las clases, tal como se puede ver en el diagrama de flujo de la Figura 7-33. Los ponderadores de cada clase corresponden a la proporción de cobertura efectiva máxima que pueden alcanzar al compararse con las demás clases especificadas. Los valores de los ponderadores asignados a cada clase se almacenan en el vector **Pond** de dimensión [4], almacenando el valor del ponderador de cada clase en el casillero correspondiente.

7.4.5.2. CCI_{eff}

Luego del proceso de escaneo, donde se obtienen los valores extremos de máxima y mínima cobertura, y del cálculo de ponderadores para las clases, se da paso a la última fase del procedimiento propuesto: el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes (CCI_{eff}).

El procedimiento, en términos macro, consiste en la lectura y escaneo de los pixeles de cada imagen del rango a ser procesada, calculando el CCI_{eff} para cada uno de ellos. Al terminar de procesar todos los pixeles de una imagen, se genera una matriz del mismo tamaño que la imagen del espectro visible, asignando a cada uno el valor del CCI_{eff} correspondiente, formando así una imagen de cobertura efectiva de nubes CCI_{eff} por cada archivo del rango.

A continuación se explica la secuencia lógica de procesamiento que calcula el CCI_{eff} de cada pixel para cada imagen del rango. Para facilitar la explicación, se utilizará como referencia el pixel (i, j) de la k-ésima imagen del rango.

Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 7-34, el primer paso consiste en determinar el grupo de SP correspondiente al pixel a clasificar. Para ello se aproxima el valor de SP del pixel (i, j) al entero más cercano asignándolo a la variable “SPhase”. De esta manera, si el pixel (i, j) de la k-ésima imagen tiene un valor de 21,7°, entonces se le asignará a “SPhase” el número 22. A continuación, se almacena en la variable “class” el

número de la clase asignada en la fase de clasificación, para ello se extrae el valor del pixel (i, j) de la k-ésima imagen de clasificación **dI**. Luego, se almacena en la variable “CloudClass” el valor de cobertura máxima almacenado en la matriz **CI_0** para el valor de SP y clase correspondiente de la siguiente manera:

$$\mathbf{CloudClass} = \mathbf{CI_0}(\mathbf{SP_{phase}}, \mathbf{class}) \quad (\text{Ecuación 7-2})$$

A continuación, si el pixel fue clasificado como despejado (class = 1) y en la búsqueda de máximos y mínimos se encuentra un valor de cobertura mínimo para el pixel (i, j) con su respectivo SP, entonces se asigna a la variable “ClearSky” el valor correspondiente de la matriz **CI_CS_pixel**:

$$\mathbf{ClearSky} = \mathbf{CI_CS_pixel}(i, j, \mathbf{SP}) \quad (\text{Ecuación 7-3})$$

En su defecto, si en la búsqueda de máximos y mínimos no se encuentra el valor correspondiente para **CI_CS_pixel**, o bien el pixel es clasificado en alguna clase diferente de 1, entonces se le asigna a “ClearSky” el valor correspondiente del vector **CI_CS**:

$$\mathbf{ClearSky} = \mathbf{CI_CS}(\mathbf{SP}) \quad (\text{Ecuación 7-4})$$

Una vez asignadas todas las variables, se calcula el $\mathbf{CCI_{eff}}$ del pixel (i, j) de la k-ésima imagen de la siguiente manera:

$$\mathbf{CCI_{eff}}(i, j) = \frac{(\mathbf{I.c1}(i, j) - \mathbf{ClearSky})}{(\mathbf{CloudClass} - \mathbf{ClearSky})} \cdot \mathbf{Pond(class)} \quad (\text{Ecuación 7-5})$$

Donde “I.c1(i, j)” representa el valor del pixel (i, j) del espectro visible para la k-ésima imagen del rango.

En la Figura 7-35 se muestra un ejemplo de los resultados intermedios y final del procedimiento completo del cálculo del $\mathbf{CCI_{eff}}$ para los archivos de la imagen del 30 de Enero de 2011 a las 16:40 hrs. (UCT). En las dos imágenes superiores, se muestran el espectro visible e infrarrojo luego de la etapa de pre-procesamiento. Luego, en la imagen inferior izquierda se muestra la clasificación realizada sobre las imágenes superiores en

la fase de clasificación, y finalmente, en la imagen inferior derecha, se muestra la representación de la matriz de CCI_{eff} calculada a partir de las anteriores.

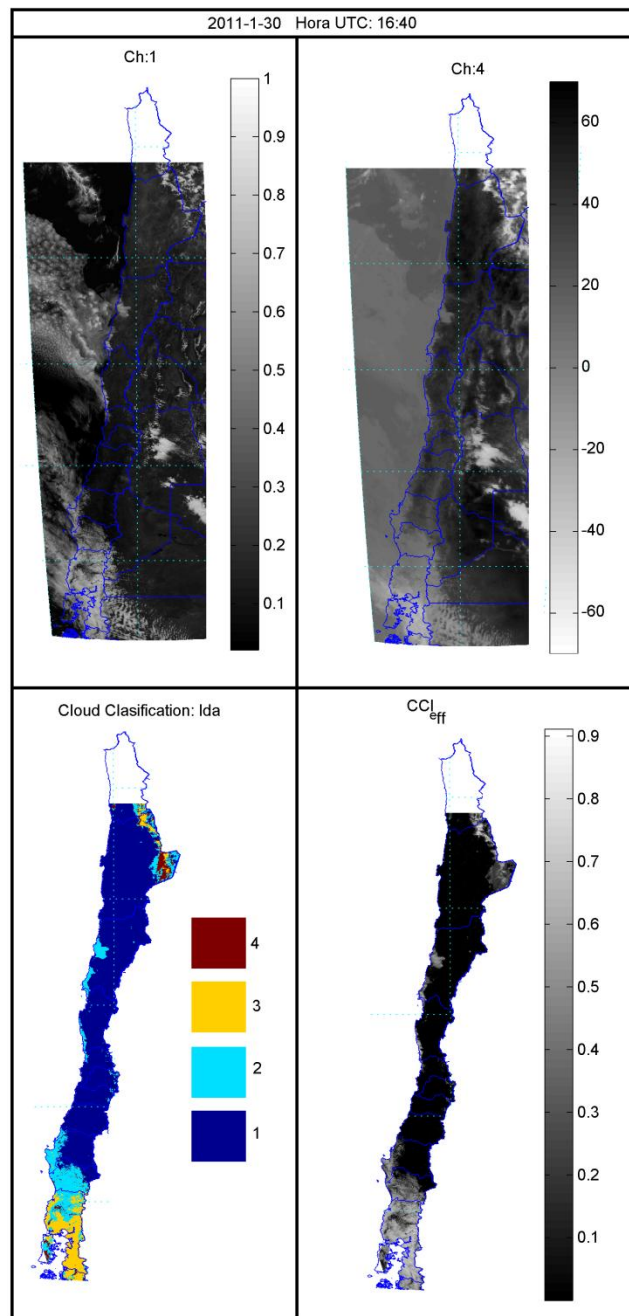


Figura 7-35: Ejemplo Resultado de Metodología Implementada para el Cálculo del CCI_{eff} . 30 de Enero de 2011, 16:40 hrs. (UCT)

8. RESULTADOS Y VALIDACIÓN

Los resultados obtenidos y sus respectivos análisis serán mostrados en dos fases. La primera corresponde a un análisis cualitativo, en el que se verá en forma gráfica los resultados intermedios y finales obtenidos por CHILE-SR y se contrastarán con algunas imágenes obtenidas por el modelo BRASIL-SR. Y luego, en la segunda fase se realiza un análisis cuantitativo de los resultados donde se muestra el proceso de validación cruzada, que determina el desempeño de la etapa de clasificación, y luego se exponen los resultados de las estimaciones de radiación obtenidos por el modelo y su comparación con mediciones de estaciones terrestres para determinar la desviación de los valores obtenidos por ambas metodologías.

8.1. Resultados Cualitativos

El primer set de resultados intermedios que se obtiene con la metodología implementada en el modelo CHILE-SR para el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes corresponde a la clasificación de imágenes, que consiste en asignar a cada pixel el valor de la clase a la que corresponde. Se debe recordar que las clases definidas en el procedimiento son las que se detallan a continuación, y que fueron explicadas con mayor detalle en el capítulo 7.4.2.

- Clase 1: *Clear Sky*
- Clase 2: St, Sc, As, Ac
- Clase 3: Ns, Cu, Cb
- Clase 4: Ci, Cc, Cs

En la Figura 8-1 se observa un ejemplo de la clasificación realizada para el día 7 de Enero de 2011 a las 20:45 hrs. (UCT) a partir de las imágenes del espectro visible e infrarrojo. Se aprecia que la mayor parte del territorio de Chile fue clasificado correctamente como despejado al igual que la nubosidad costera entre Valparaíso y Concepción, típica por ser del tipo *Stratus* (clase 2). También se ven nubes del género *Cirrus* (clase 4) correctamente detectadas al norte de la isla de Chiloé, características por ser opacas en el canal 1 y brillantes en el 4.

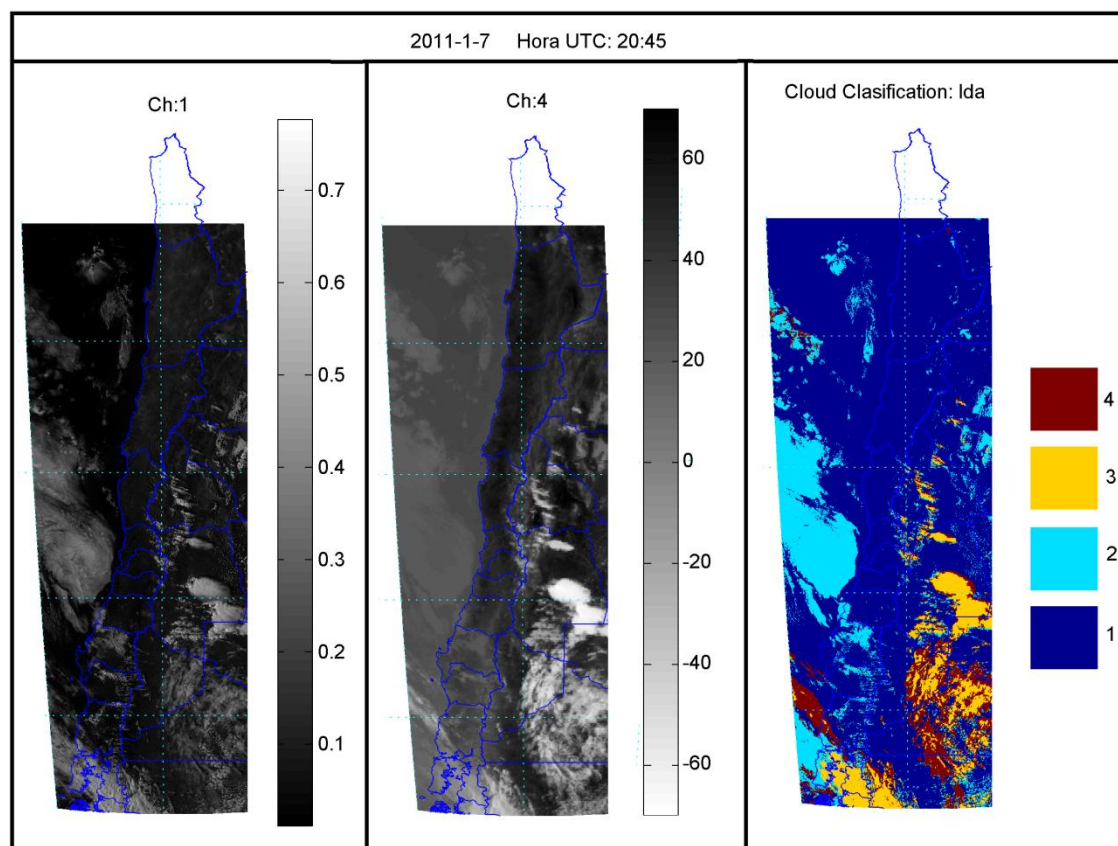


Figura 8-1: Resultado Clasificación de Imagen. 7 Enero 2011, 20:45 hrs. (UCT)

También fue identificada nubosidad de la clase 3, teniendo su forma más clara en la nube de género *Cumulonimbus* en el territorio argentino un poco más al sur que el paralelo que pasa por Santiago.

En términos generales y cualitativos el clasificador implementado parece estar identificando en forma correcta la mayor parte de los pixeles de la imagen para este ejemplo.

En la Figura 8-2 se muestra una vista en detalle de la identificación de las cuatro clases definidas para diferentes sectores de una imagen correspondiente al mes de Diciembre de 2010.

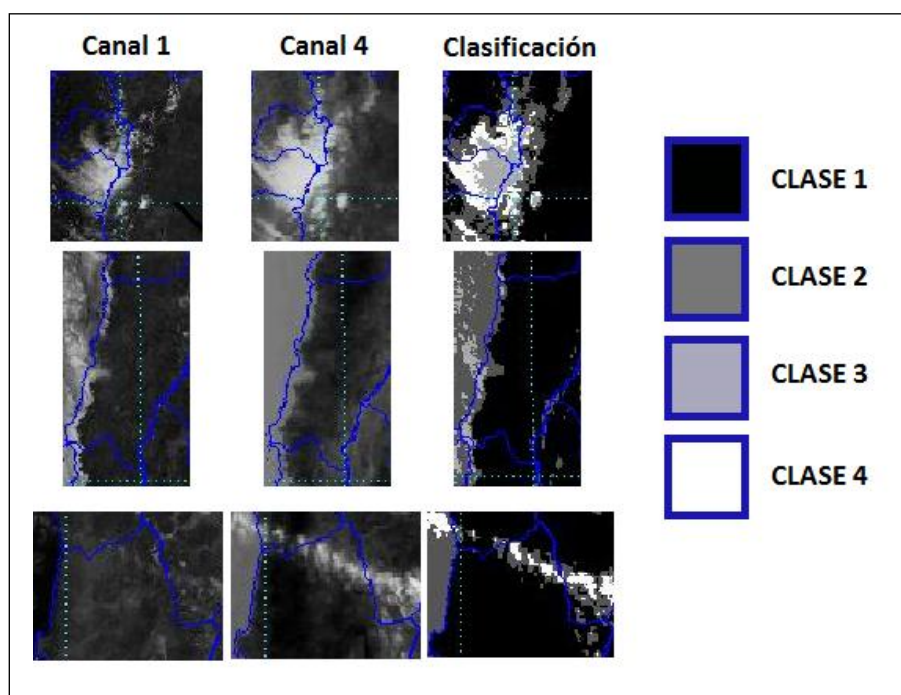


Figura 8-2: Resultados Generales de Clasificación (1)

La primera columna de imágenes de la figura corresponde a los datos obtenidos en el espectro visible de radiación, la segunda al infrarrojo y finalmente, la tercera muestra la clasificación que realizó el modelo entre las cuatro clases definidas.

En la primera fila se puede observar que en el sector central de la imagen se presenta una nube de desarrollo vertical, correspondiente al tipo Cu o Cb, mientras que en el resto de la imagen se ve un cielo descubierto. La clasificación hecha da muestras de ello, ya que clasifica al centro de esta gran masa como clase 3, acompañada de algunas nubes del género *Cirrus* (clase 4) que es bastante común de encontrar acompañando a las del tipo Cb, mientras que al resto de la imagen lo clasifica como despejado (clase 1).

En la segunda fila se aprecia un sector de Chile que abarca desde Copiapó hasta La Serena. Se observa una gran extensión de nubosidad del tipo *Stratus* que alcanza a cubrir toda la zona costera, fenómeno muy habitual en esta zona del país. La clasificación hecha logra identificar este tipo de nubosidad, como también los sectores que se encuentran despejados.

Finalmente, la tercera fila muestra la importancia de la utilización del canal 4 para la determinación de la cobertura, ya que la masa nubosa que se identifica corresponde a un típico desarrollo del género *Cirrus* con formación en estrías. Lo particular de este tipo de nubosidad es que se desarrolla a gran altura, razón por la que se ve claramente en el canal infrarrojo, pero se presenta con un espesor óptico muy delgado, causando que el canal visible no la alcance a identificar en forma correcta.

La Figura 8-3 a continuación, muestra una zona del sur de Chile en el que hay presencia de todas las clases, habiendo sectores despejados, otros con nubosidad alta y una gran extensión de nubosidad de gran espesor óptico (clase 3), que se encuentra en el costado inferior derecho de la imagen.

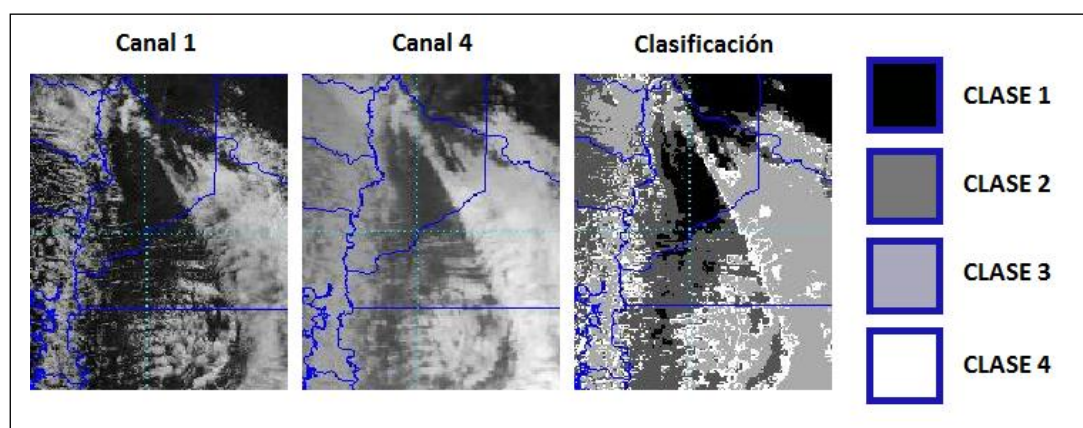


Figura 8-3: Resultados Generales de Clasificación (2)

Entre los aspectos débiles mencionados de la metodología del modelo BRASIL-SR, se comentó que al contar sólo con el procesamiento del canal visible no es posible la identificación de la nubosidad en multicapas, ya que los píxeles que se ven entre las nubes de la capa superior se presentan de color oscuro producto que estas mismas proyectan sombras sobre las capas inferiores. En consecuencia, si se toma dicho píxel y se observa sólo en el canal visible, será interpretado como un píxel despejado.

En la Figura 8-4 se muestra un ejemplo de cómo CHILE-SR logra identificar en forma correcta la gran extensión de nubosidad en multicapas que se presenta en la costa de Chile desde Valparaíso hacia el norte el día 21 de Enero de 2011 a las 16:40 hrs. (UCT).

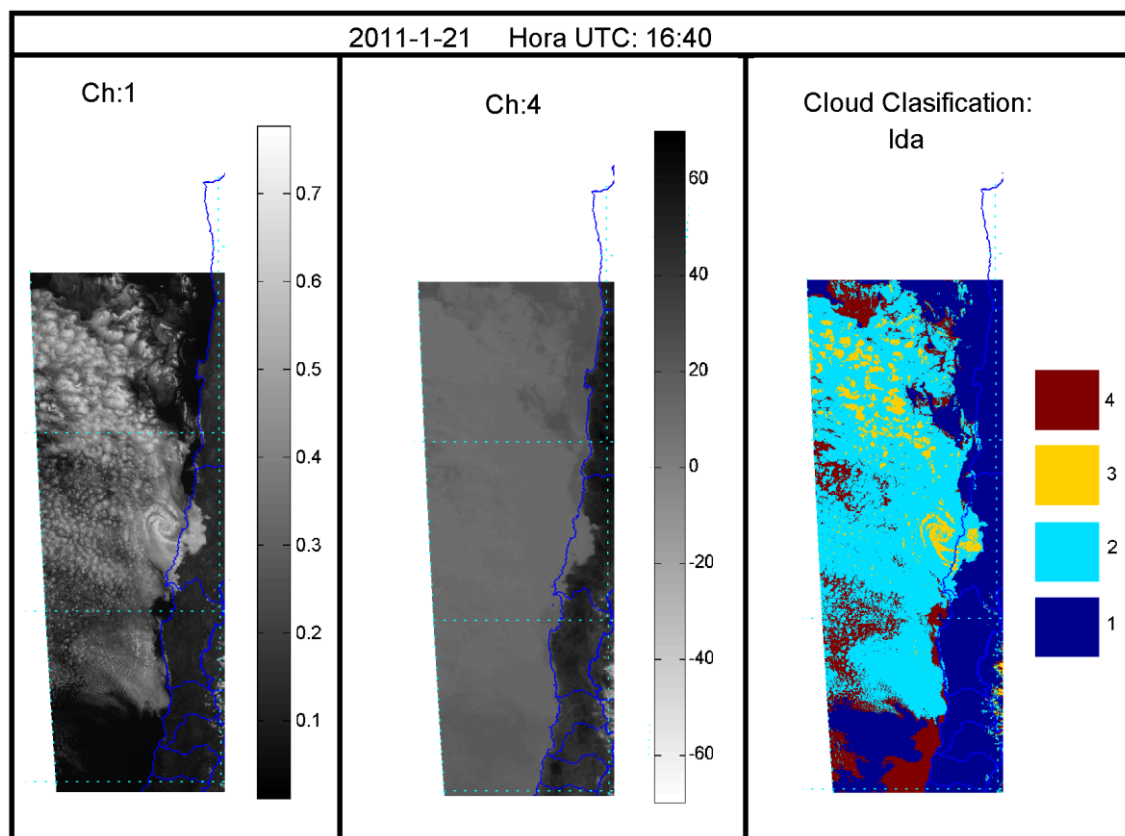


Figura 8-4: Resultado de Clasificación para Nubosidad Multicapas. 21 Enero 2011, 16:40 hrs. (UCT)

Luego de realizar el proceso de clasificación de las imágenes se procede al cálculo del CCI_{eff} según se explica en el capítulo 7.4.5, resultado que es entregado como variable de entrada al modelo de transmitancia atmosférica de CHILE-SR, donde se realizan los cálculos para determinar la radiación incidente en superficie en forma de mapas de radiación para todo el territorio chileno. En la Figura 8-5, Figura 8-6, Figura 8-7, Figura 8-8 y Figura 8-9 se muestran las imágenes de los resultados intermedios y finales obtenidos durante el día 2 de Enero de 2011, partiendo desde las 13:10 hrs. (UCT)

(10:10 AM, hora local) hasta las 20:45 hrs. (UCT) En cada una de las figuras se muestra la imagen correspondiente al canal visible e infrarrojo, las imágenes de clasificación y de CCI_{eff} y finalmente los mapas de radiación directa y global.

Se observa que la zona norte presenta condiciones de cielo despejado durante todo el día, registrando niveles de radiación de 700 W/m^2 para el primer ejemplo en la Figura 8-5, cercanos a los 1.200 W/m^2 para horas cercanas al medio día y de 500 W/m^2 para la última imagen presentada en la Figura 8-9.

Por otra parte al observar la zona costera de Coquimbo, se aprecia nubosidad de tipo *Stratus* (clase 2) que se comienza a desaparecer alrededor de las 18:40 hrs. (UCT) como se observa en la Figura 8-8, mientras que en la zona sur del país, principalmente en la X Región, se observa la presencia de nubosidad de clase 3 durante todo el día, provocando un mayor valor de índice de cobertura efectiva de nubes, lo que se ve reflejado en una radiación menor. Esta situación se observa con mayor claridad en la Figura 8-7 donde se muestran niveles de radiación de alrededor de 600 W/m^2 en las localidades cercanas a La Serena, en comparación con los calculados en la zona sur donde se presentan radiaciones un 25% menores, del orden de los 450 W/m^2 .

Finalmente, en la Región Metropolitana, se observa presencia de nubosidad durante todo el día en la zona precordillerana, pero más hacia el interior se presenta un cielo mayormente despejado desde las 16:40 hrs. (UCT), alcanzando en ese momento valores de radiación cercanos a los 1.100 W/m^2 .

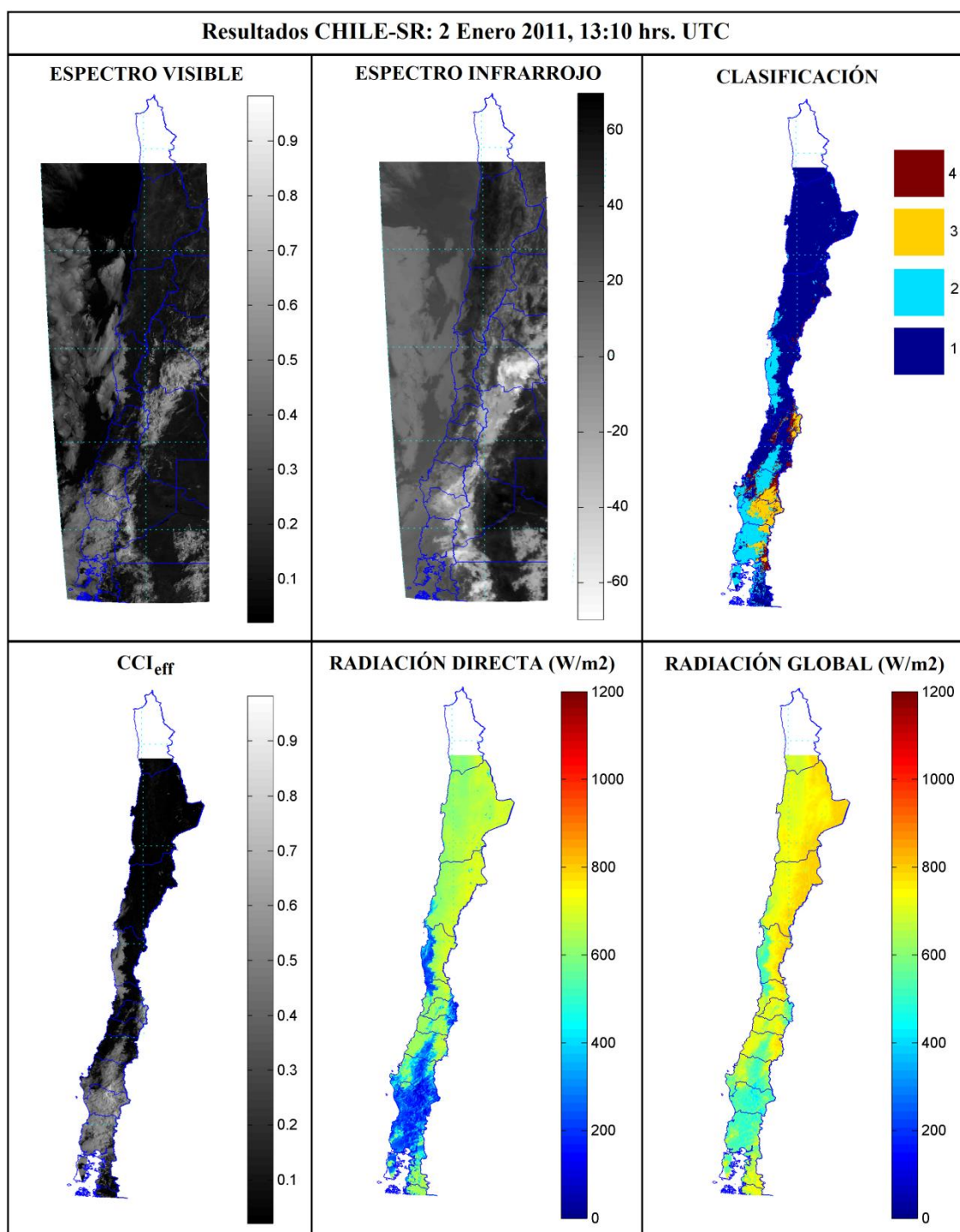


Figura 8-5: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 13:10 hrs. (UCT)

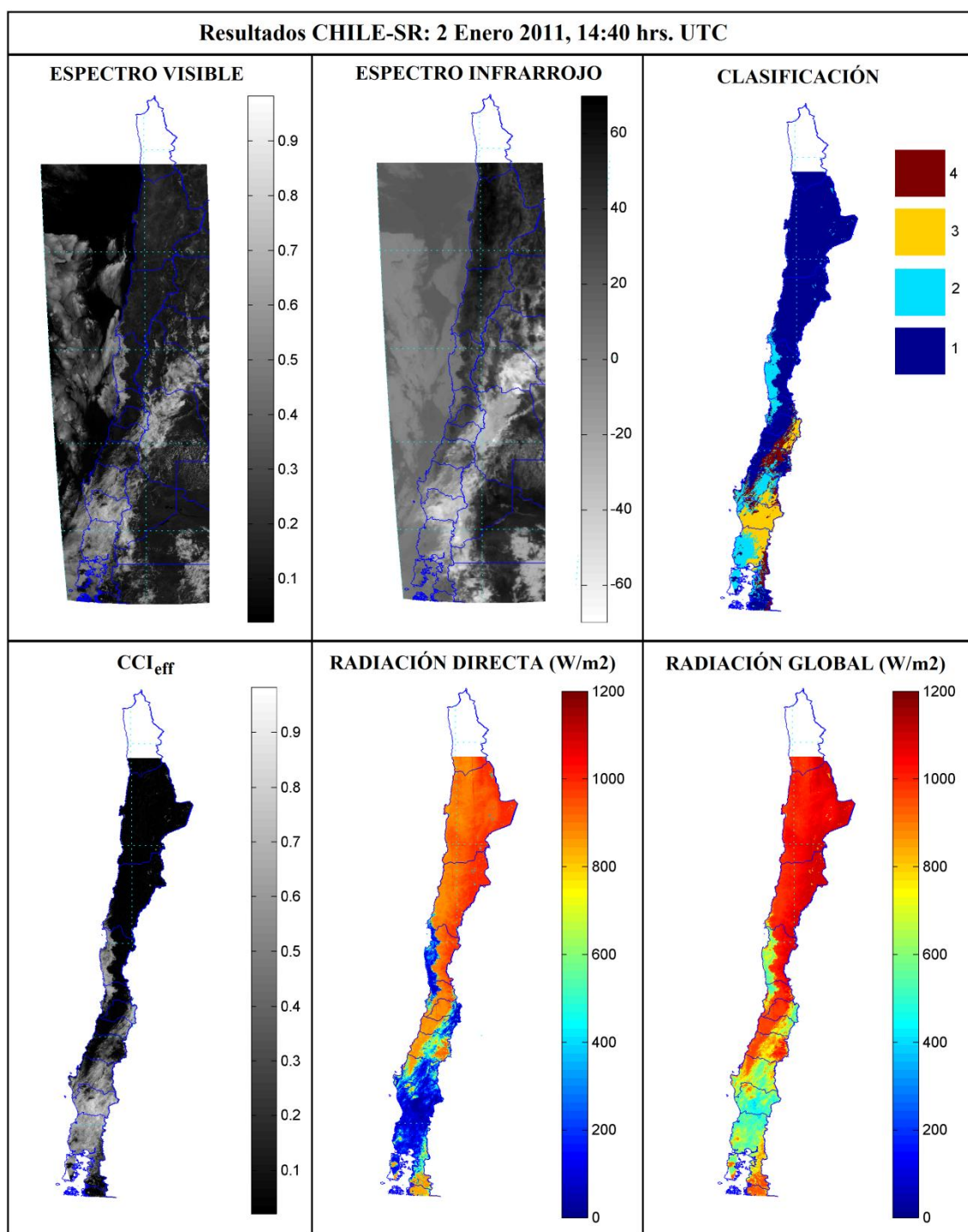


Figura 8-6: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 14:40 hrs. (UCT)

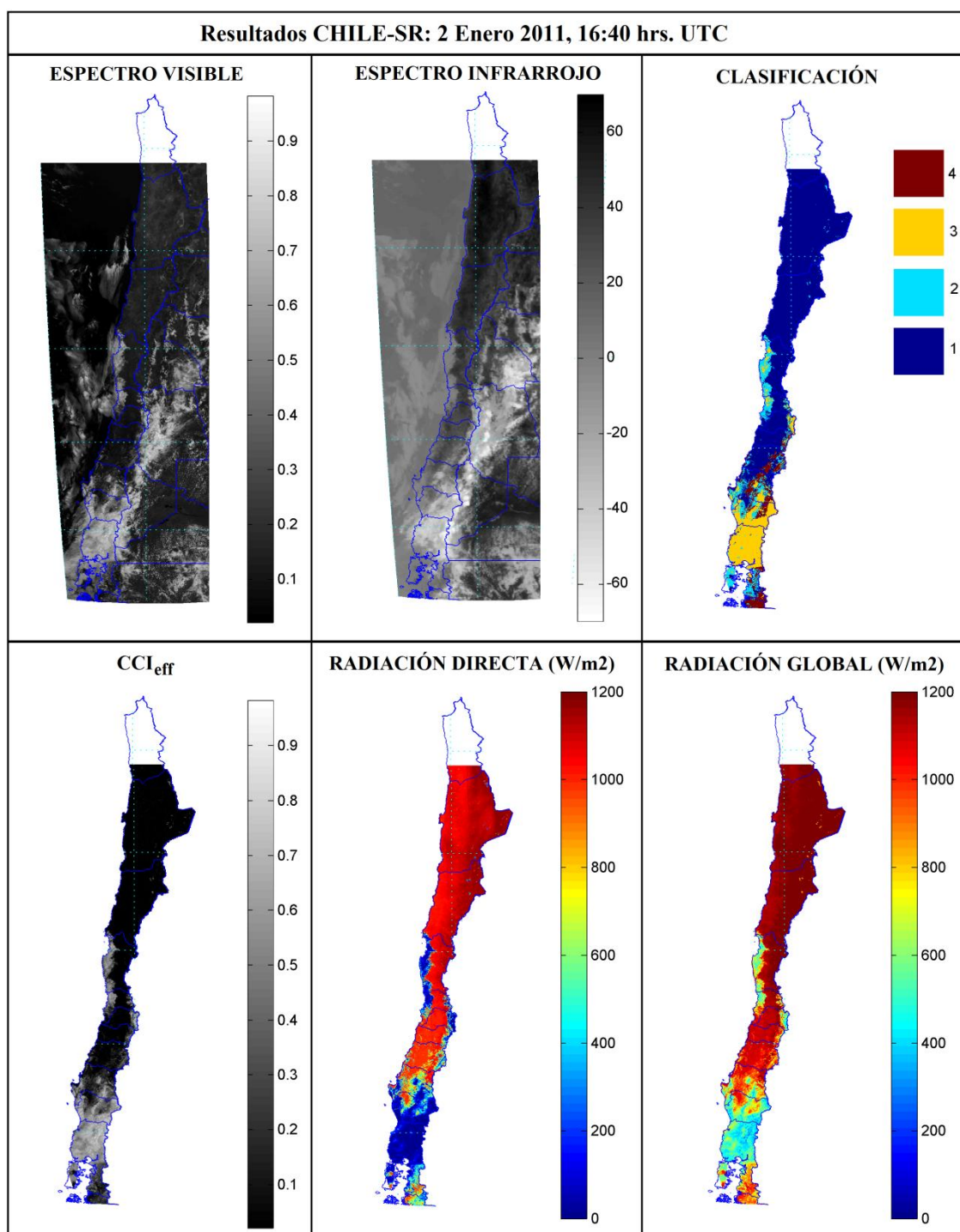


Figura 8-7: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 16:40 hrs. (UCT)

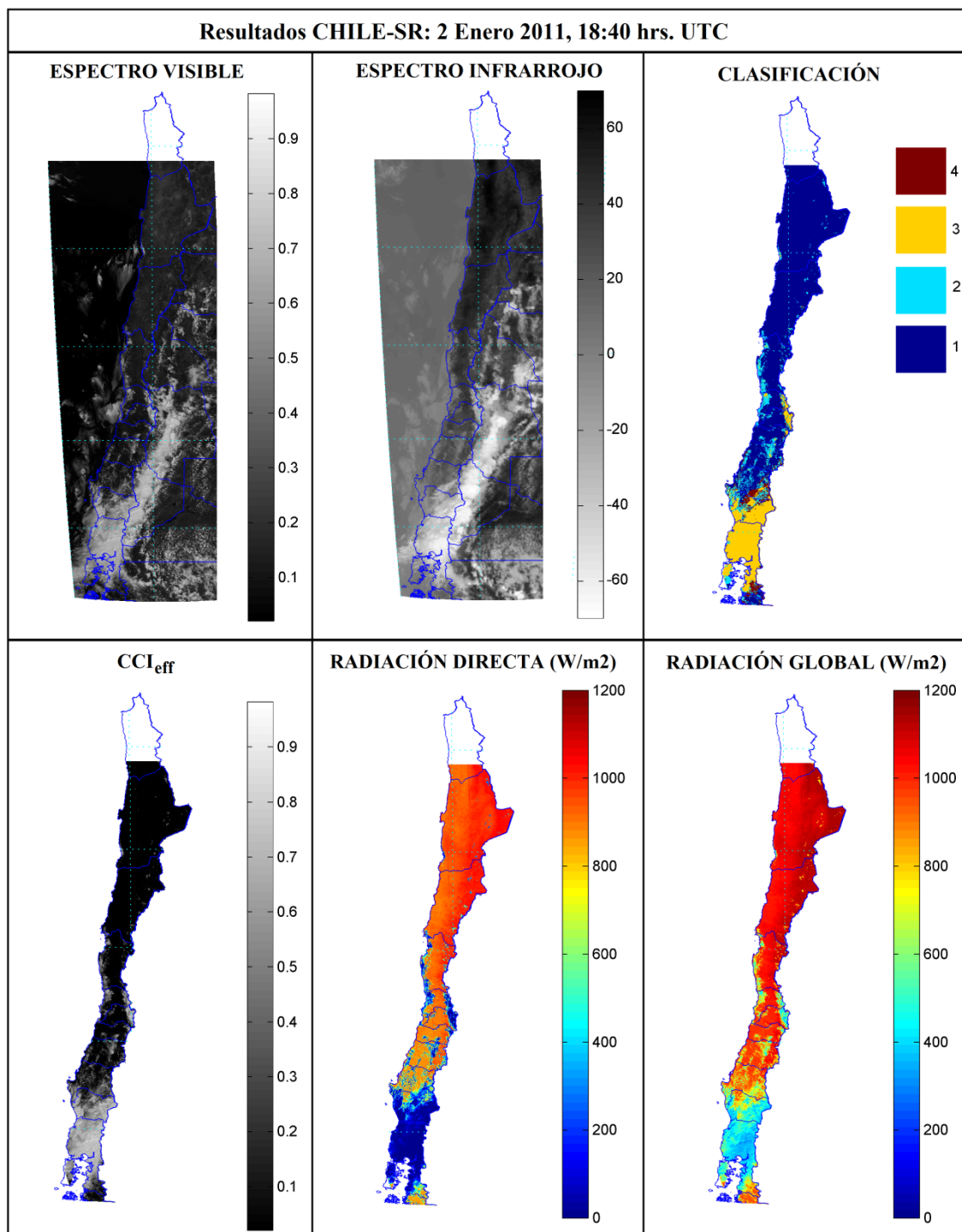


Figura 8-8: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 18:40 hrs. (UCT)

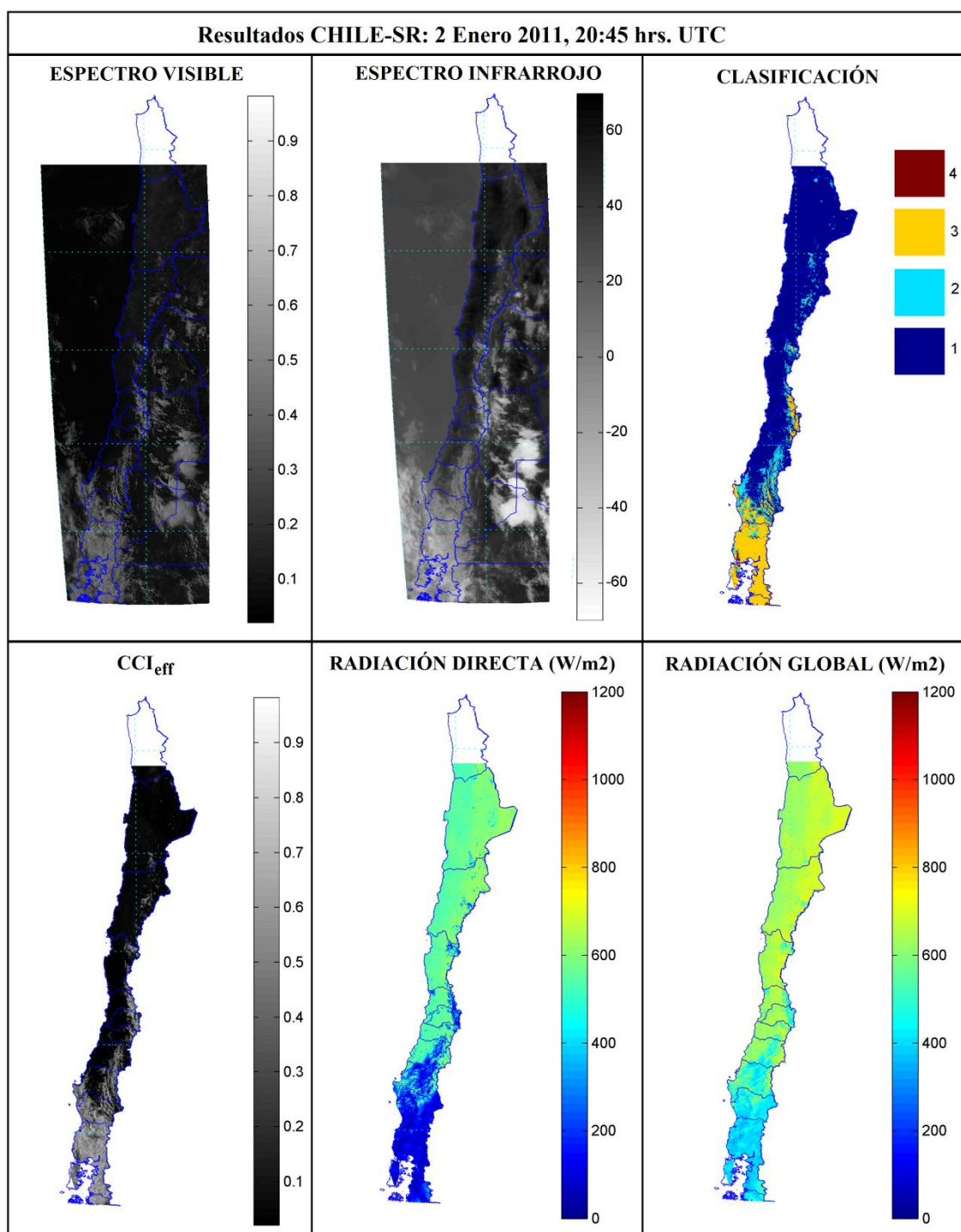


Figura 8-9: Resultados CHILE-SR. 2 Enero 2011, 20:45 hrs. (UCT)

En el Anexo B: Resultados CHILE-SR, se presentan más ejemplos con resultados gráficos intermedios y finales como los mostrados recientemente para otros días del mes. A continuación, en la Figura 8-10, Figura 8-11, Figura 8-12 y Figura 8-13 se muestran algunas imágenes de los mapas de radiación directa y global producidos por la metodología de cálculo del CCI_{eff} de BRASIL-SR y CHILE-SR de los días 1 Enero de 2011 a las 16:10 hrs. UCT, 2 Enero de 2011 a las 16:10 hrs. UCT, 15 Enero de 2011 a las 14:40 hrs. UCT y 29 Enero de 2011 a las 18:40 hrs. UCT, con el objetivo de realizar una comparación cualitativa entre ambos. Los resultados presentados en estas imágenes reflejan algunas de las propuestas de mejora del procedimiento desarrollado principalmente en las zonas de cobertura, ya que en las zonas de cielo despejado los dos tipos de radiaciones son semejantes a excepción de algunos puntos de la zona norte, específicamente en la II Región, donde el modelo de Brasil presenta unos saltos de radiación entre pixeles vecinos cuando esto no debiera ocurrir, ya que en todo ese sector de presenta una condición homogénea de cielo descubierto.

La situación descrita se produce porque el modelo brasilero no sabe cuáles pixeles se encuentran despejados al no realizar un proceso de clasificación, lo que conlleva a asignar valores de máxima cobertura a puntos correspondientes a albedos de superficie elevados. Esto provoca que a dicho pixel se le asigne un valor de CCI_{eff} erróneo terminando en una subestimación de la radiación incidente en ese lugar. Este problema no ocurre para el caso de CHILE-SR, ya que al conocer los pixeles que se encuentran despejados, almacena los valores de albedo de superficie para cada nivel de luminosidad de la imagen sin confundirlos como pixeles con cobertura de nubes. Esta situación se ve claramente en los mapas de radiación del modelo chileno, ya que presenta una distribución homogénea de la radiación entre pixeles cercanos con similares condiciones de cobertura.

Lo que ocurre en lugares donde efectivamente existe presencia de nubosidad es completamente diferente, ya que se aprecia en todo momento una subestimación de la radiación global incidente. Por ejemplo en la Figura 8-10 se ve con claridad en el manto

nuboso que se extiende desde Concepción hasta Valparaíso, al igual que en la Figura 8-11 en la X Región, que CHILE-SR calcula valores de hasta un 50% más elevados para algunos puntos. Este patrón no varía mucho en las imágenes de la Figura 8-12 y Figura 8-13, en que se presentan los resultados para horas de la mañana y tarde respectivamente. Si bien en ambas los niveles generales de radiación son menores, CHILE-SR continúa obteniendo valores superiores para los píxeles con presencia de nubosidad tanto para la radiación global como directa, que se ve muy notoriamente en las imagen correspondiente al 15 de Enero, donde existen dos sectores muy definidos con presencia de nubosidad.

La razón por la que se da esta situación es porque el modelo BRASIL-SR se sustenta sobre la idea que durante un mes, en cada pixel de la imagen se debe producir, al menos una vez, una condición de cielo completamente despejado y otra de cielo completamente nublado. Considerando esta metodología, cuando no ocurre dicho supuesto lo que resulta es una asignación del valor de cobertura máxima a uno que en la realidad no representa esa situación, o bien en el caso contrario, se puede asignar un valor de cielo completamente despejado a un pixel con cobertura. La consecuencia de esto es una sobrestimación del cálculo del índice de cobertura efectiva para el primer caso, o una subestimación para la segunda posibilidad. Cualquiera de las dos situaciones que ocurra producirá un sesgo en el cálculo de la radiación, ya sea subestimándola si ocurre la primera situación, o bien sobrestimándola. Lo anteriormente descrito se agrava aún más si se considera que se comparan píxeles que no tienen el mismo nivel de luminosidad, ya que como se planteó en el capítulo 7.4.2, ni siquiera un mismo pixel al comienzo del mes es comparable a sí mismo para la misma hora al final del mes.

Este problema es solucionado por el modelo CHILE-SR, ya que no necesita que cada pixel presente condiciones extremas de cobertura, ya que toma los valores máximos entre todos los píxeles clasificados con presencia de nubosidad que sean comparables en términos de luminosidad. Para los píxeles de cielo despejado, registra los valores mínimos de albedo también en función de la luminosidad de la imagen.

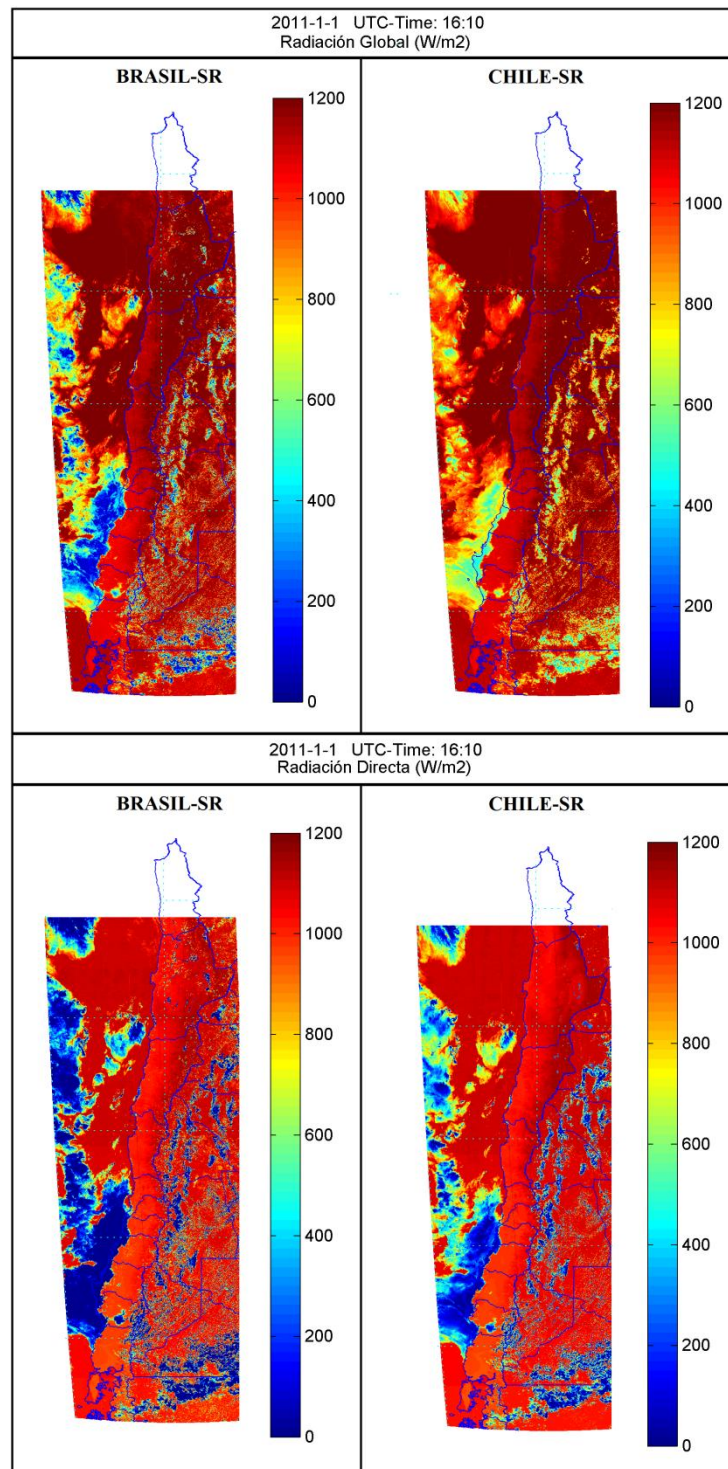


Figura 8-10: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 1 Enero 2011, 16:10 hrs. (UCT)

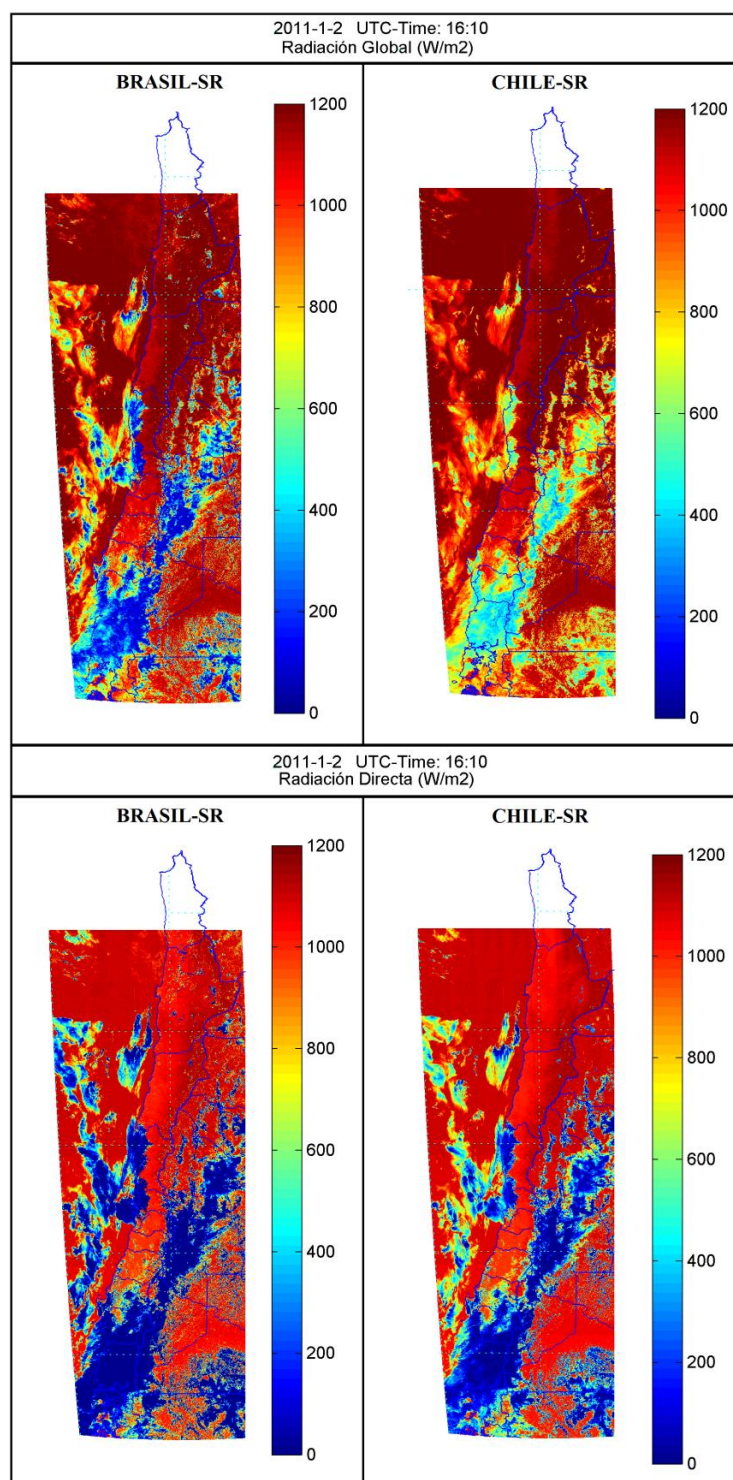


Figura 8-11: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 2 Enero 2011, 16:10 hrs. (UCT)

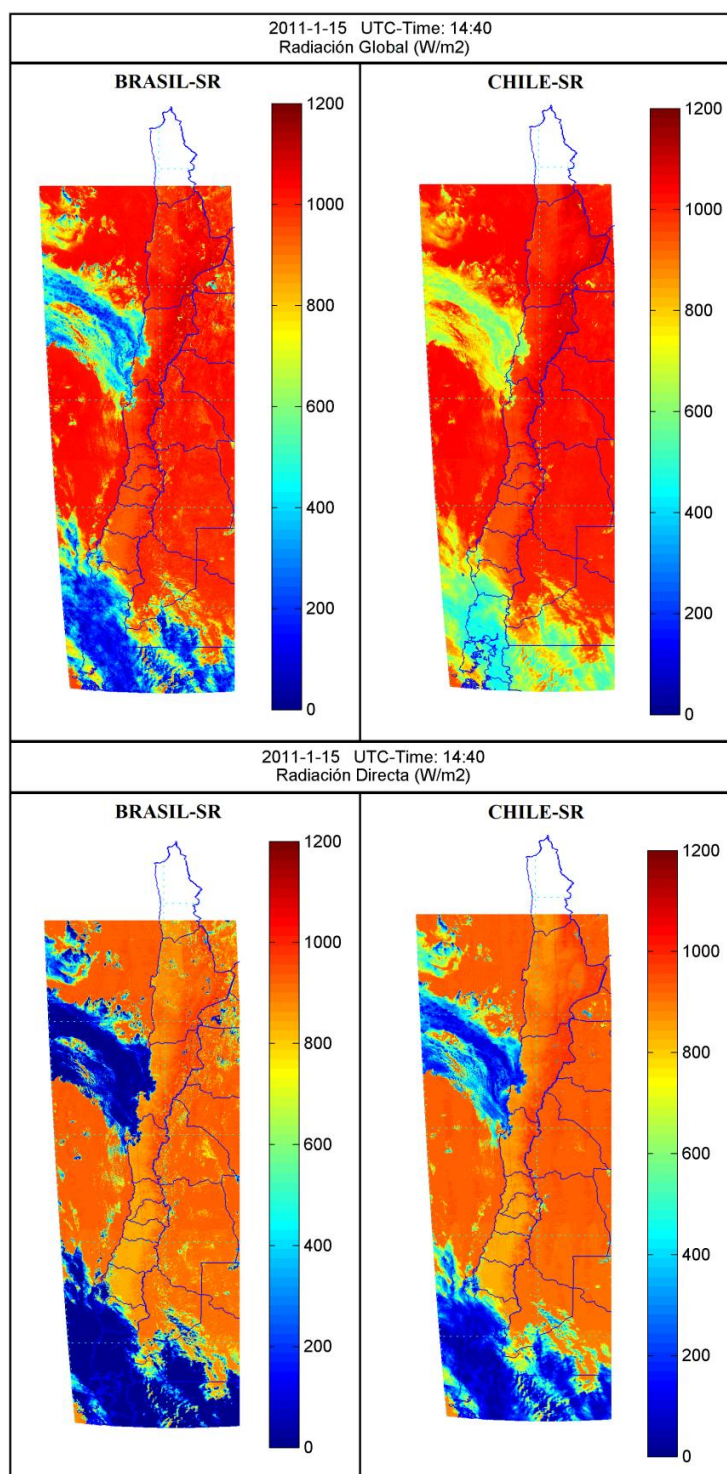


Figura 8-12: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 15 Enero 2011, 14:40 hrs. (UCT)

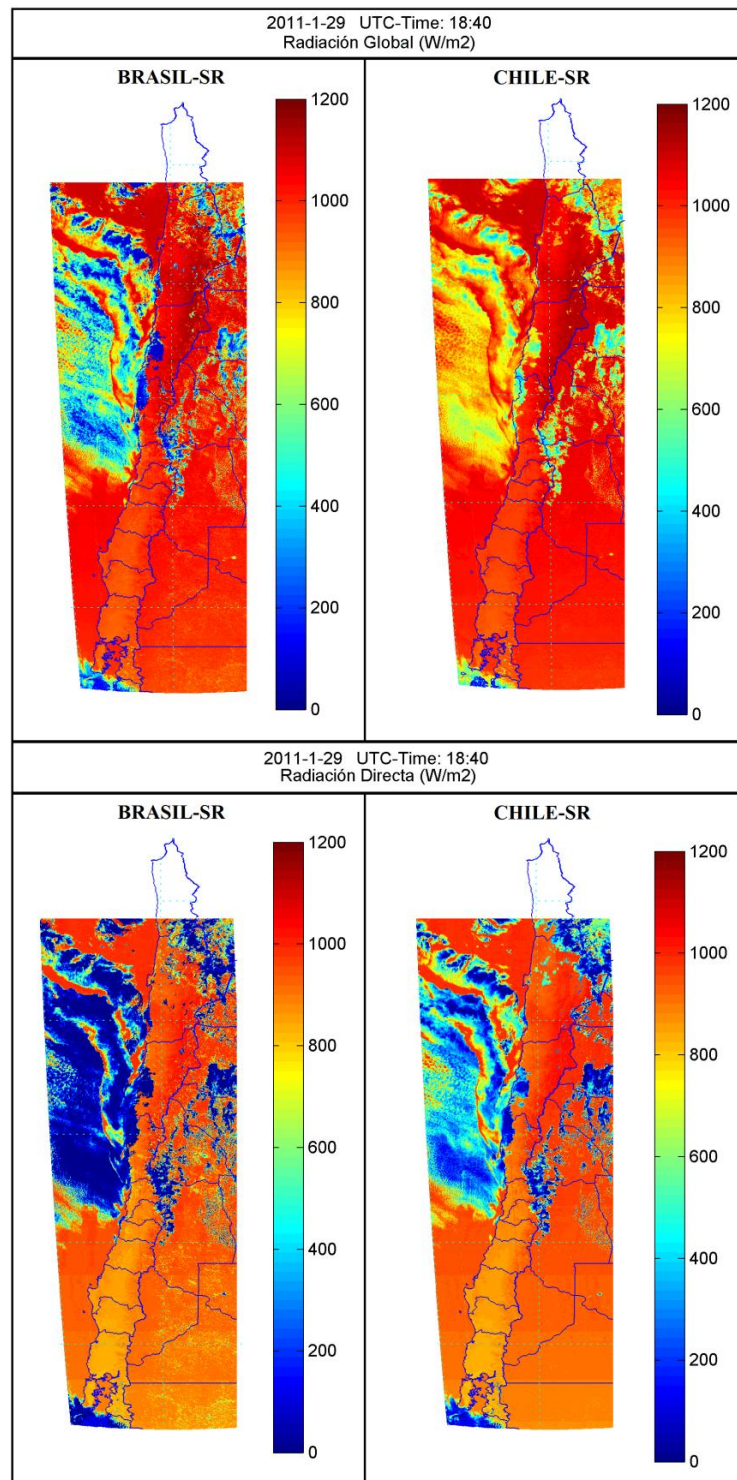


Figura 8-13: Comparación Resultados BRASIL-SR y CHILE-SR. 29 Enero 2011, 18:40 hrs. (UCT)

8.2. Resultados Cuantitativos

Luego de mostrar los análisis en forma gráfica para una apreciación de tipo cualitativa, a continuación se presentan algunos valores de desempeño y desviaciones obtenidas por el modelo implementado.

El procedimiento para el cálculo del CCI_{eff} , tal como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 7-14, contempla un proceso de cálculo del desempeño de la clasificación utilizando una metodología de validación cruzada, cuyo resultado entrega información acerca de la calidad de la matriz de entrenamiento producida en el proceso de entrenamiento asistido y por tanto, indica el rendimiento general que debiera tener el clasificador al momento de clasificar las imágenes.

El proceso de validación cruzada se realizó bajo dos escenarios, el primero consiste en ver el desempeño obtenido al clasificar los píxeles despejados respecto de los otros, es decir, clasificar entre dos situaciones, píxeles con cielo despejado (clase 1) y píxeles con presencia de nubosidad (clase 2, 3 y 4). El segundo escenario calcula el *performance* de la clasificación considerando las cuatro clases originales en forma independiente.

El cálculo de los desempeños para la clasificación se realizó una vez sin considerar la variable de luminosidad y luego para intervalos de *scatter phase* (SP) de $\pm 5^\circ$ para cada uno de los escenarios.

Los resultados del proceso de validación cruzada bajo el primer escenario para el mes de Enero de 2011 se presentan en la Tabla 8-1 a continuación.

Tabla 8-1: Performance de la Clasificación mediante Cross Validation Considerando Dos Clases para Diferentes Intervalos de Scatter Phase

Rango Scatter_Phase	Clases a Considerar	Performance (%)	Intervalo de Confianza	
			Intervalo de Confianza	Nivel de Certeza
(0° , 180°)	2	97,77%	(97,41° , 98,13°)	95%
(15° , 25°)	2	100,00%	(100° , 100°)	95%
(20° , 30°)	2	98,75%	(98,17° , 99,34°)	95%
(25° , 35°)	2	98,46%	(97,9° , 99,01°)	95%
(30° , 40°)	2	98,14%	(97,25° , 99,03°)	95%
(35° , 45°)	2	97,95%	(97,1° , 98,8°)	95%
(40° , 50°)	2	97,07%	(96,11° , 98,02°)	95%
(45° , 55°)	2	96,27%	(95,17° , 97,37°)	95%
(50° , 60°)	2	96,12%	(95,1° , 97,14°)	95%
(55° , 65°)	2	95,78%	(94,76° , 96,8°)	95%
(60° , 70°)	2	95,81%	(94,44° , 97,18°)	95%
(65° , 75°)	2	95,86%	(94,48° , 97,24°)	95%
(70° , 80°)	2	95,71%	(94,28° , 97,14°)	95%
PROMEDIO		97,16%		
DESV. EST.		1,45%		

Tal como se aprecia en la tabla presentada, el resultado obtenido para la clasificación correspondiente al mes de Enero de 2011 bajo el primer escenario fue de un 97,16% con una desviación estándar de 1,45% y un nivel de confianza del 95%. Este promedio no considera el caso en que se clasifica sin considerar la variable SP.

Para facilitar la lectura de los resultados para cada intervalo de SP, en la Figura 8-14 se presenta un gráfico con los desempeños calculados.

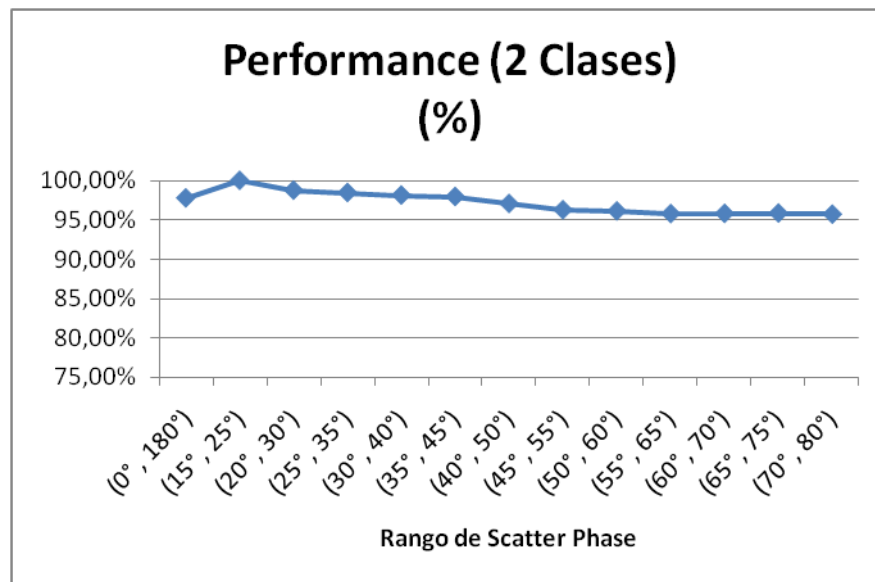


Figura 8-14: Performance de la Clasificación mediante Cross Validation Considerando Dos Clases para Diferentes Intervalos de Scatter Phase

Se aprecia en la figura arriba que los desempeños obtenidos tienden a disminuir a medida que el SP se hace mayor. La explicación a esta situación puede deberse a que los mayores de SP corresponden a imágenes del amanecer o atardecer, por lo tanto a imágenes más oscuras, lo que produce un histograma de la imagen del canal 1 en un rango más acotado, haciendo la clasificación más compleja.

Considerando el promedio y la baja desviación estándar en las mediciones, se puede concluir que el clasificador logra la distinción entre pixeles de cielo descubierto y nublado con una elevada precisión.

A continuación, se procede a mostrar la misma metodología presentada recientemente, pero ahora bajo el segundo escenario, en que se considera la clasificación de las cuatro clases definidas. En la Tabla 8-2 se presenta el resumen de los desempeños calculados.

Tabla 8-2: Performance de la Clasificación mediante Cross Validation Considerando Cuatro Clases para Diferentes Intervalos de Scatter Phase

Rango Scatter_Phase	Clases a Considerar	Performance (%)	Intervalo de Confianza	
			Intervalo de Confianza	Nivel de Certeza
(0° , 180°)	4	85,21%	(84,34° , 86,08°)	95%
(15° , 25°)	4	96,00%	(89,85° , 100°)	95%
(20° , 30°)	4	89,24%	(87,61° , 90,88°)	95%
(25° , 35°)	4	87,83%	(86,36° , 89,3°)	95%
(30° , 40°)	4	86,49%	(84,24° , 88,75°)	95%
(35° , 45°)	4	88,64%	(86,73° , 90,55°)	95%
(40° , 50°)	4	87,78%	(85,93° , 89,63°)	95%
(45° , 55°)	4	85,79%	(83,76° , 87,81°)	95%
(50° , 60°)	4	87,39%	(85,64° , 89,15°)	95%
(55° , 65°)	4	87,13%	(85,43° , 88,82°)	95%
(60° , 70°)	4	87,33%	(85,06° , 89,61°)	95%
(65° , 75°)	4	86,57%	(84,21° , 88,94°)	95%
(70° , 80°)	4	86,04%	(83,58° , 88,49°)	95%
PROMEDIO		88,02%		
DESV. EST.		2,71%		

Como se observa en la tabla recién presentada, para el segundo escenario en que se consideran las cuatro clases en forma separada, se obtuvo un desempeño de 88,02% con una desviación estándar de 2,71%, también con un nivel de confianza del 95%. El desempeño promedio bajo alrededor de un 10% como era de esperar, ya que al ser mayor el número de clases dificulta el trabajo del clasificador.

A diferencia del escenario 1, en la Figura 8-15 se puede apreciar que a medida que el SP aumenta a partir de los 30° no existe una tendencia a disminuir como se vio en el caso anterior, sino que se queda bastante estable entre el 85% y 90%, por lo que la explicación en el aumento de la desviación estándar es por causa de la diferencia producida en el cálculo del desempeño de la clasificación entre los 15° y 25° de SP, respecto de los otros intervalos.

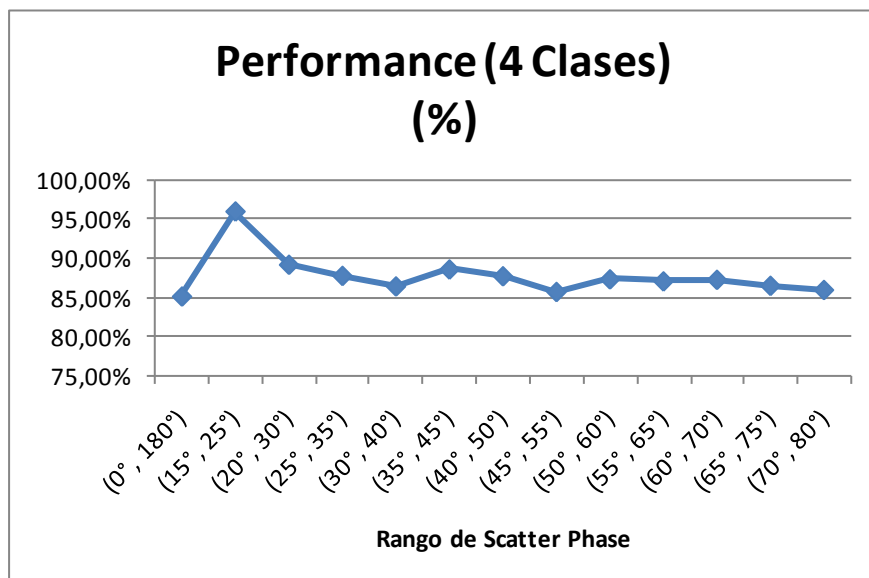


Figura 8-15: *Performance* de la Clasificación mediante *Cross Validation* Considerando Cuatro Clases para Diferentes Intervalos de *Scatter Phase*

El desempeño obtenido es aceptable para continuar con el proceso de clasificación, pues como se mencionó en el capítulo 7.2, la clasificación que tiene mayor injerencia sobre el cálculo del CCI_{eff} es la que se realiza bajo el escenario 1, ya que es primordial en la asignación de valores mínimos y máximos si el pixel corresponde a uno nublado o despejado, mientras que una equivocación en la clasificación del pixel en un 11% de las veces tendrá una injerencia mínima en el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes.

Si bien los objetivos de esta Tesis están puestos sobre el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes, se realizará un proceso de validación de resultados de estimaciones de radiación utilizando mediciones terrestres de ella. Los resultados y desempeño de la estimación final, además de depender del cálculo del CCI_{eff} dependen de los datos climatológicos, que también ingresan como variables de entrada, y de la exactitud del modelo de transmitancia en sí.

Con el objetivo de identificar las principales diferencias entre la metodología de cálculo propuesta por CHILE-SR en comparación con la de BRASIL-SR, se mantendrán

constantes los datos de entrada climatológicos, y se utilizará el mismo modelo de transmitancia, cambiando sólo la forma de cálculo del CCI_{eff} .

Para la validación de los valores de radiación estimados por CHILE-SR y BRASIL-SR se utilizó la estación de medición terrestre a cargo del Profesor Rodrigo Escobar que se encuentra en el Campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile en la ciudad de Santiago, ubicada en la coordenada geográfica (33,5°S, 70,61° W).

El análisis se realizó sobre un período de tiempo de tres meses correspondientes a Enero, Febrero y Marzo de 2011. Estos datos de las estimaciones realizadas por el modelo CHILE-SR y BRASIL-SR junto con las mediciones realizadas por la estación terrestre se encuentran en la Tabla C- 1 y en la Tabla C- 2 en forma de irradiación global y directa diaria.

Del período considerado para el análisis se obtuvieron 57 días válidos. No se pudieron realizar comparaciones en un mayor número de muestras ya que la estación de medición no estuvo en funcionamiento los últimos días de Enero y los primeros de Febrero, y en algunas ocasiones falló la recepción de los archivos satelitales provenientes de la Dirección Meteorológica de Chile.

El resumen de las desviaciones obtenidas de la irradiación diaria en sus formas directa y normal, realizadas para la ciudad de Santiago por los modelos CHILE-SR y BRASIL-SR se muestran en la Tabla 8-3. En ella se puede observar que ambos modelos obtuvieron un mejor desempeño en la estimación de la irradiación diaria global en comparación con las estimaciones realizadas para la componente directa.

Otro aspecto a destacar es que las desviaciones obtenidas en las estimaciones realizadas por CHILE-SR fueron menores que las de BRASIL-SR en apenas un 0,6% en términos del el error cuadrático medio (rRMSE).

Tabla 8-3: Desviaciones en Estimaciones de Radiación Realizadas por CHILE-SR y BRASIL-SR para Santiago

Modelo	Tipo Rad	MBE Wh/m2	rMBE %	rRMSE %	Fact. Corr.
NUMERO DE MUESTRAS:		57			
CHILE-SR	Global	-446,20	-6,3%	7,9%	0,94
	DNI	1.142,53	13,5%	18,7%	1,18
NUMERO DE MUESTRAS:		53			
BRASIL-SR	Global	-463,02	-6,4%	8,5%	0,94
	DNI	1.154,02	13,5%	18,7%	1,17

El detalle de los resultados presentados en la tabla anterior para la estimación de irradiación global por el modelo CHILE-SR se presentan en el gráfico de dispersión de la Figura 8-16, donde los puntos representan los valores de radiación estimados y la línea diagonal de color rojo muestra las mediciones tomadas por la estación.

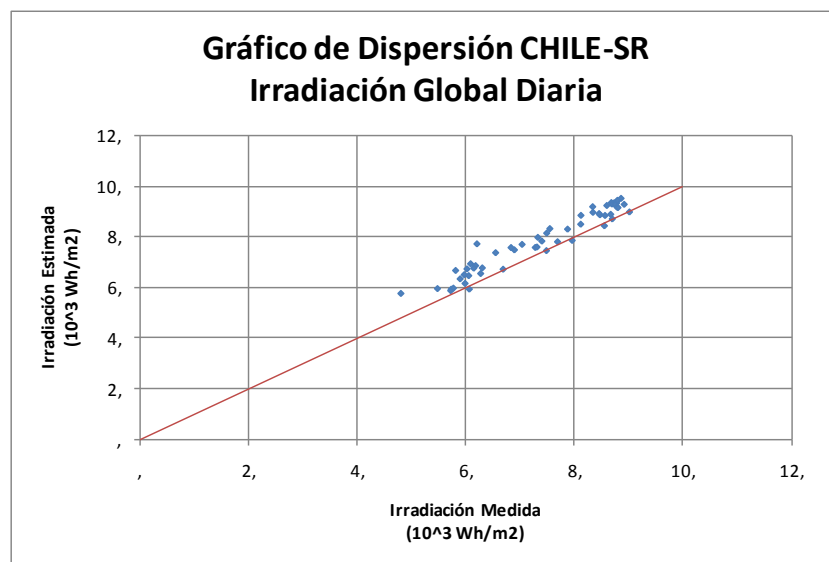


Figura 8-16: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Global Diaria de CHILE-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre

En forma análoga al gráfico de dispersión para la estimación de la componente global de CHILE-SR, en la Figura 8-17, Figura 8-18 y Figura 8-19 se muestran los detalles de la

irradiación global diaria obtenida por BRASIL-SR y las estimaciones de irradiación directa diaria para CHILE-SR y BRASIL-SR respectivamente.

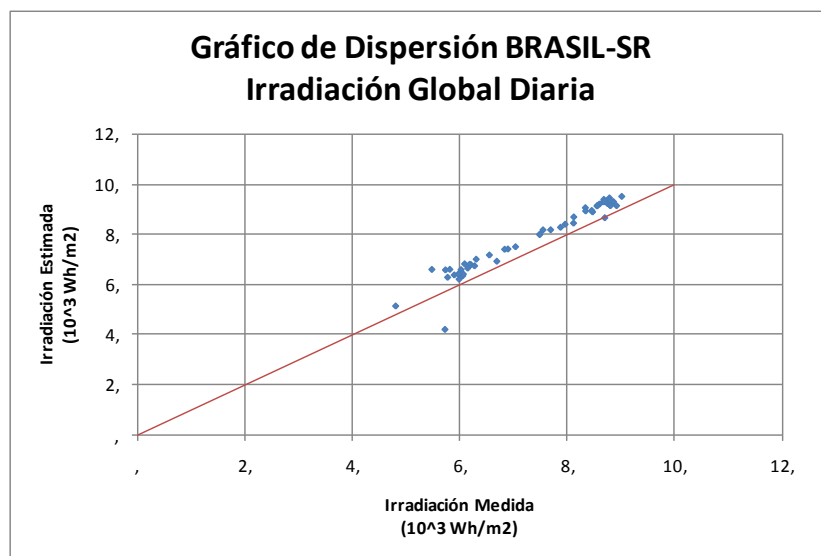


Figura 8-17: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Global Diaria de BRASIL-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre

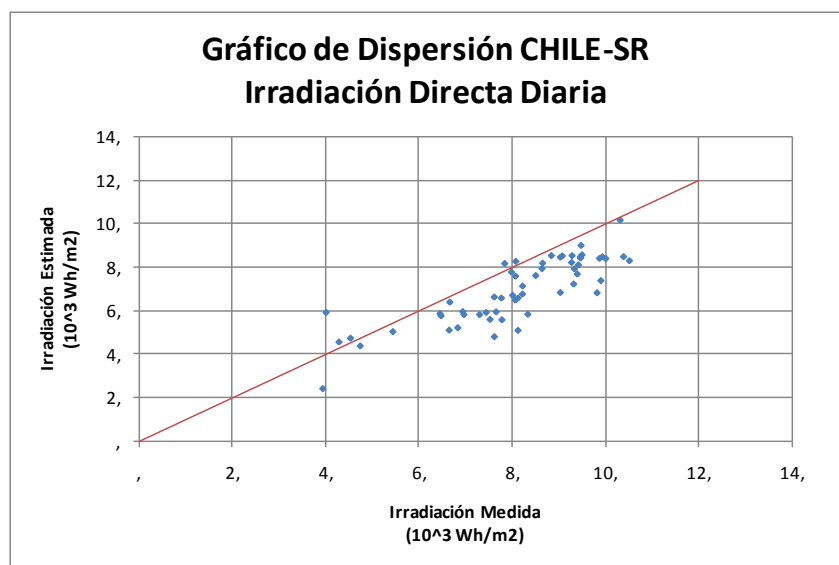


Figura 8-18: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Directa Diaria de CHILE-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre

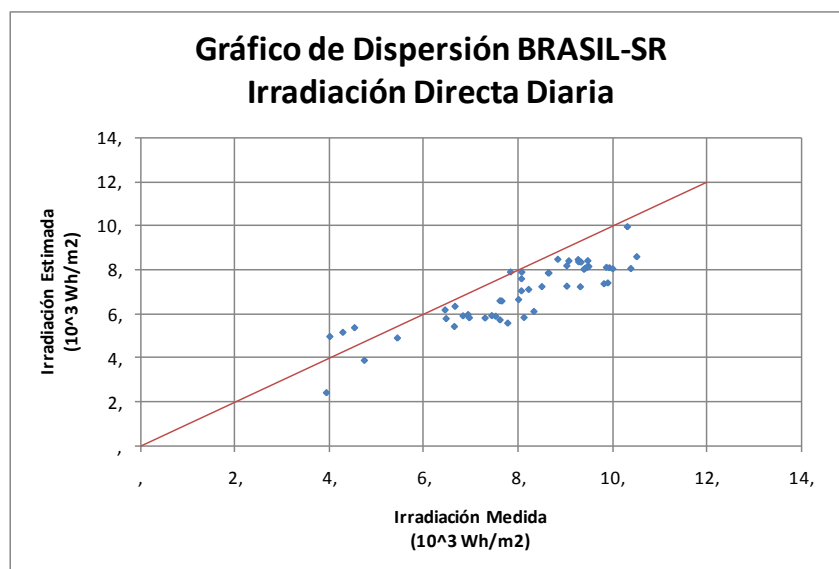


Figura 8-19: Gráfico de Dispersión entre Estimaciones de Irradiación Directa Diaria de BRASIL-SR y Mediciones Tomadas por Estación Terrestre

Se puede apreciar en las gráficas recién mostradas que ambos modelos presentan desempeños muy semejantes obteniendo valores de desviación muy parecidos.

Para el caso de las estimaciones de irradiación diaria global, CHILE-SR obtuvo un error de desviación medio (MBE) de -446 Wh/m^2 y BRASIL-SR uno de -463 Wh/m^2 , correspondientes a un desvío medio relativo (rMBE) de $-6,3\%$ y $-6,4\%$ respectivamente, a partir de lo cual se obtiene un error cuadrático medio relativo (rRMSE) de $7,9\%$ y $8,5\%$.

Para el caso de las estimaciones de irradiación directa diaria, CHILE-SR obtuvo un desvío medio de 1.142 Wh/m^2 , y BRASIL-SR de 1.154 Wh/m^2 , ambos correspondientes a un rMBE de $13,5\%$ y un rRMSE de $18,7\%$.

Con estos resultados se puede concluir que ambos modelos presentan un comportamiento muy semejante para los días de análisis, no habiendo una mejora sustancial por parte de CHILE-SR.

Considerando el bajo impacto logrado por la implementación de la metodología propuesta para los días de análisis es importante destacar que los resultados para el territorio chileno para las estimaciones de irradiación diaria global presentan valores de rRMSE un 5% menores que los obtenidos por BRASIL-SR para el territorio brasileiro, tal como se puede verificar en la Tabla 5-1. Por contraparte, los resultados de irradiación directa están alrededor de cuatro puntos porcentuales más bajos que los valores obtenidos por el modelo brasileiro sobre su territorio y que otros modelos desarrollados por la comunidad científica (Perez et al., 2002) en términos del rRMSE.

Además de obtener desviaciones menores en la estimación de irradiación global diaria respecto de las realizadas en Brasil, los resultados también fueron mejores que los modelos HELIOSAT, con un rRMSE de 15,5% (Rigollier et al., 2004) y SUNNY/ALBANY, con valores entre un 20% y 30% (Beyer et al., 1996).

Al observar los datos obtenidos presentados en la Tabla 8-3 se pueden extraer dos grandes conclusiones. En primer lugar, que los resultados obtenidos por CHILE-SR y BRASIL-SR para el territorio chileno en término de las estimaciones de irradiación diaria global presentan mejores resultados en términos del error cuadrático medio que el desempeño obtenido por los modelos HELIOSAT, SUNNY/ALBANY y BRASIL-SR, este último sobre el territorio brasileiro. Segundo, que la implementación de la metodología propuesta por CHILE-SR para el cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes tiene mejoras leves respecto de los resultados obtenidos basados en la formulación desarrollada en BRASIL-SR.

Sin embargo, a partir de los mismos resultados se pueden levantar ciertas hipótesis sobre la certeza del proceso de validación desarrollado, ya que se llevó a cabo sólo con los datos de medición de una estación ubicada en Santiago, en comparación con la validación realizada en Brasil, donde se utilizaron 106 estaciones de medición distribuidas en cinco zonas características durante un intervalo de 5 meses. Esta situación puede ser interpretada como que los resultados calculados para CHILE-SR presentados recientemente pueden tener un sesgo indeterminado, debido al bajo número

de muestras y a la poca representatividad que tienen las mediciones de un solo punto geográfico al compararlo con el resto del país.

Sumado a lo anterior, tal como se vio en los resultados cualitativos presentados en el capítulo 8.1, el modelo BRASIL-SR tiene un comportamiento semejante a CHILE-SR en zonas donde no confunde el albedo terrestre con nubosidad, tal como es la situación que se produce en Santiago, pero para las zonas con presencia de nubosidad se vio una subestimación de los niveles de radiación calculados en comparación con los obtenidos por CHILE-SR.

A partir de las situaciones planteadas, la hipótesis levantada es que los resultados obtenidos para el período de análisis poseen un sesgo desconocido al tener sólo 57 días válidos de mediciones para un solo punto de Chile, además de no mostrar en forma efectiva las diferencias cuantitativas de los modelos BRASIL-SR y CHILE-SR, ya que del total de días analizados, el 78,9% de ellos se presentaron con cielo despejado, y sólo un 21,1% tuvieron condiciones de cielo cubierto, situación en la que los modelos presentan las mayores diferencias al calcular el CCI_{eff} bajo procedimientos diferentes.

A modo de validar la hipótesis planteada, en la Figura 8-20 se presentan las mediciones obtenidas por la estación y las correspondientes estimaciones de radiación global en base horaria calculadas por los modelos CHILE-SR y BRASIL-SR para los días 2, 15 y 25 de Enero de 2011. En ella se puede ver que para días despejados ambos modelos se comportan en forma casi idéntica y siguen muy de cerca las mediciones obtenidas por la estación. Considerando los resultados obtenidos en las mediciones para el período de estudio y tomando en cuenta que cerca del 80% de los días estuvieron despejados, en esta imagen se puede ver el comportamiento de la mayoría de los días, en que las estimaciones se realizaron con una desviación muy pequeña con un leve grado de sobrestimación de la radiación solar incidente.

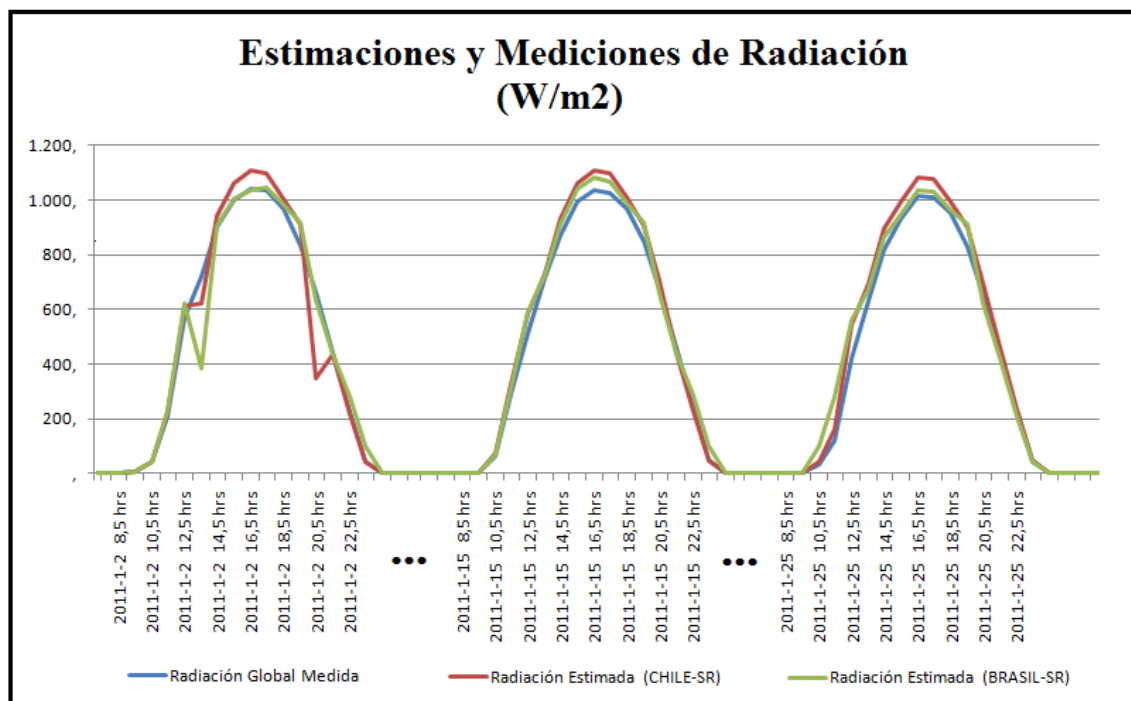


Figura 8-20: Curvas de Mediciones y Estimaciones de Radiación Global en Base Horaria para la Ciudad de Santiago (a)

Situación muy diferente se aprecia en la Figura 8-21 donde se muestra el comportamiento de los modelos en contrastación con las mediciones terrestres para los días 11 y 12 de Febrero de 2011 y 3 de Marzo del mismo año, ya que en todos ellos se presentó un cielo con presencia de nubosidad. Se puede observar que el nivel de precisión de ambos modelos disminuye considerablemente respecto de los casos mostrados en la figura anterior.

Tal como se observó en las imágenes de resultados obtenidas por ambos modelos, en los tres días presentados se ve que BRASIL-SR entrega valores de radiación menores a los de CHILE-SR producto de una sobrestimación de el índice efectivo de cobertura de nubes.

En la situación mostrada para el día 11 de Febrero se puede apreciar que CHILE-SR entrega por momentos valores superiores a los medidos en la estación. Sin embargo, se puede observar en la representación del día 3 de Marzo que sigue muy de cerca la curva

de la estación, siendo muy certero en las estimaciones, en especial para las horas pasadas el mediodía.

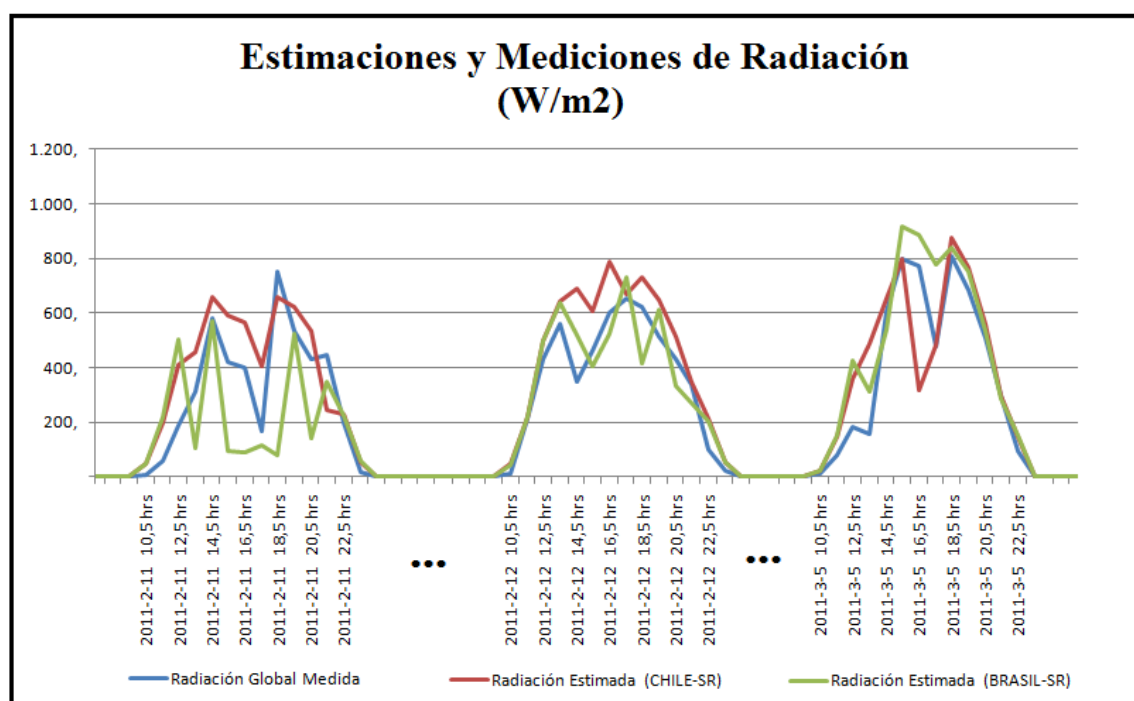


Figura 8-21: Curvas de Mediciones y Estimaciones de Radiación Global en Base Horaria para la Ciudad de Santiago (b)

Para desarrollar en forma más analítica la hipótesis planteada acerca de los valores de las desviaciones obtenidos, se analizarán y contrastarán las mediciones realizadas a dos días, uno con presencia de nubosidad, correspondiente al 4 de Enero de 2011, y otro con condiciones de cielo descubierto, situación representada por el día 7 de Enero de 2011. En la Figura 8-22 se presentan las estimaciones de radiación global en base horaria realizadas por los modelos CHILE-SR y BRASIL-SR en contraste con las mediciones realizadas por la estación de Santiago.

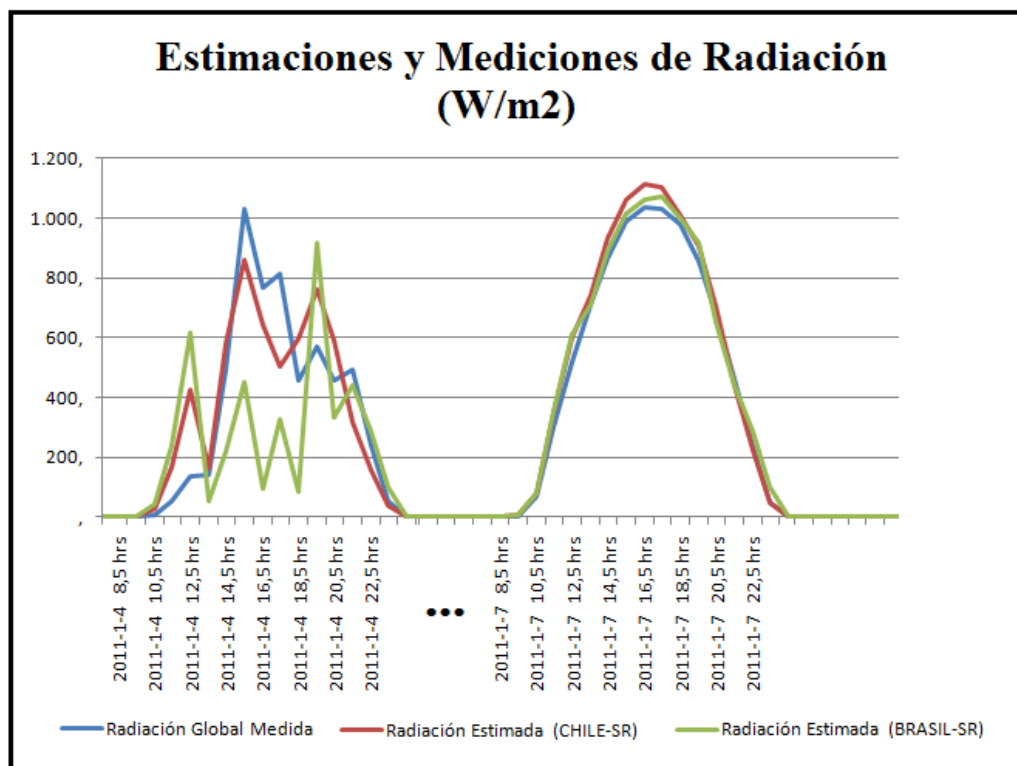


Figura 8-22: de Curvas de Mediciones y Estimaciones de Radiación Global en Base Horaria para la Ciudad de Santiago (c)

Además de mostrar los gráficos que representan las mediciones y estimaciones realizadas para ambos días, en la Figura 8-23 y Figura 8-24 se presentan las imágenes con los resultados intermedios y finales del procesamiento de los días 4 y 7 de Enero respectivamente.

En las imágenes del 4 de Enero se puede ver claramente a Santiago con presencia de nubosidad, y como esta es sobrestimada por el modelo BRASIL-SR al calcular niveles de radiación menores en las zonas cubiertas.

En la imagen del 7 de Enero se ve presencia de una masa nubosa en la zona costera de la parte céntrica del país, pero que no alcanza a cubrir la ciudad de Santiago en ningún momento del día, tal como lo avalan las mediciones mostradas en la Figura 8-22.

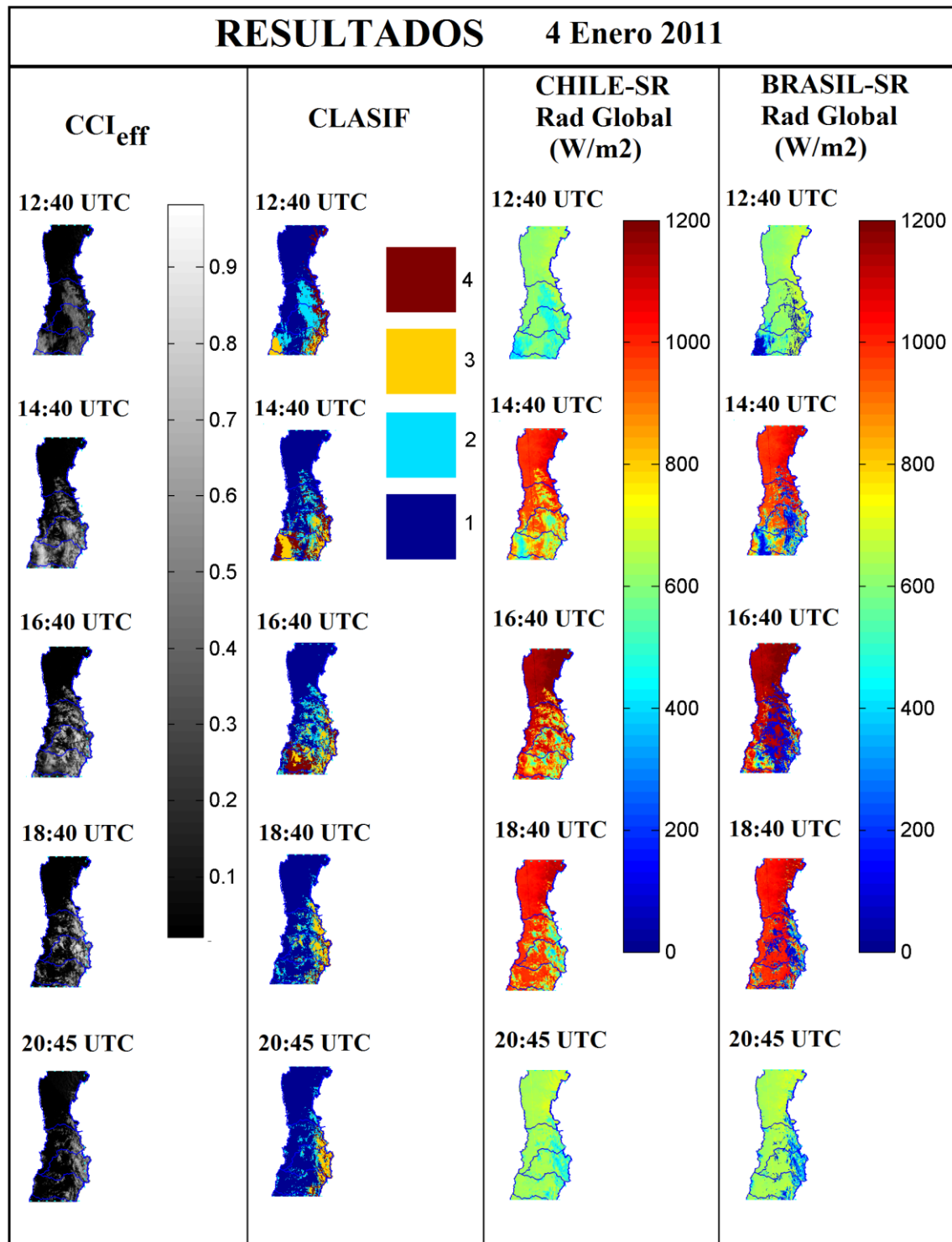


Figura 8-23: Resultados Intermedios y Finales Obtenidos para Santiago. 4 Enero 2011

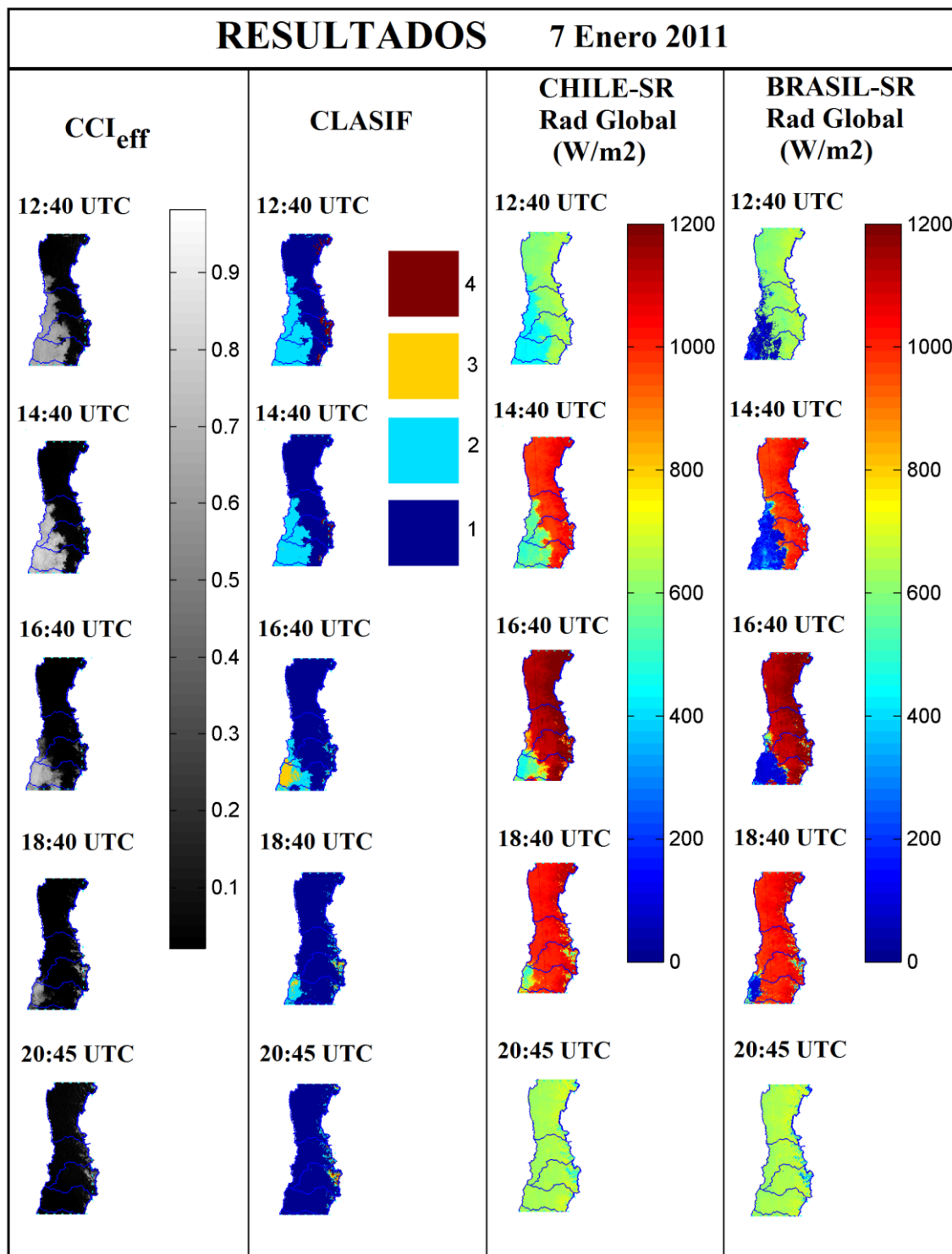


Figura 8-24: Resultados Intermedios y Finales Obtenidos para Santiago. 7 Enero 2011

En el Anexo C: Cálculo de Desviaciones CHILE-SR y BRASIL-SR, se presenta en la Tabla C- 3 las estimaciones de radiación global y directa en base horaria realizadas por el modelo CHILE-SR, además del cálculo de las respectivas desviaciones respecto de las mediciones tomadas por la estación para el día 4 de Enero. Luego en la Tabla C- 4 se muestran los mismos resultados pero con las estimaciones realizadas por el modelo BRASIL-SR. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla a continuación:

Tabla 8-4: Desviaciones de Estimaciones de Radiación Calculados para el día 4 de Enero

04/01/2011	CHILE-SR		BRASIL-SR	
	Rad Global	Rad Directa	Rad Global	Rad Directa
rMBE	-54,3%	21,9%	-77,7%	31,3%
rRMSE	114,6%	54,1%	193,2%	76,5%
Fac. Corr.	0,93	1,75	1,9	2,76

Luego en la Tabla C- 5 y Tabla C- 6 se presentan los mismos cálculos descritos anteriormente, pero para el día 7 de Enero. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 8-5 a continuación.

Tabla 8-5: Desviaciones de Estimaciones de Radiación Calculados para el día 7 de Enero

07/01/2011	CHILE-SR		BRASIL-SR	
	Rad Global	Rad Directa	Rad Global	Rad Directa
rMBE	-6,5%	10,4%	-14,3%	14,3%
rRMSE	9,6%	24,4%	30,0%	28,8%
Fac. Corr.	0,94	1,14	0,91	1,26

Al observar los resultados de las desviaciones obtenidas para los dos días de análisis, se puede observar que el desempeño relativo entre ambos modelos cambió, ya que en el día de cielo despejado correspondiente al 7 de Enero, CHILE-SR obtuvo un rRMSE para las estimaciones de radiación global de un 9,6%, separándose del error obtenido por BRASIL-SR en más de 15%. Mientras que en el caso del 4 de Enero, donde se presentó un día con presencia de nubosidad, la diferencia entre los rRMSE aumento hasta llegar a casi un 80%. Como se puede apreciar en las tablas del Anexo B, los altos valores del

error cuadrático medio se deben a las estimaciones de las primeras horas del día, en que un desvío de 100W/m^2 es mucho más incidente que el mismo error al medio día, cuando los índices de radiación son mucho más elevados. Pero para contextualizar bien los resultados se debe mirar el error de desviación medio (rMBE), en que la diferencia entre los valores obtenidos por CHILE-SR y BRASIL-SR para el día despejado respecto al nublado, incrementa desde un 8% a un 78%.

Otro aspecto a destacar es el indicador de factor de corrección (Fac. Corr.) el cual muestra que la radiación global calculada por BRASIL-SR para el día 4 de Enero (con presencia de nubosidad) es subestimada al tener un valor de 1,9. Mientras que para el día sin cobertura de nubes realizó estimaciones por encima de la radiación captada por la estación, logrando un factor de corrección de 0,91. Este cambio en el factor de corrección no sucedió con las estimaciones de CHILE-SR, que tanto para el día nublado como despejado se mantuvo a un nivel algo superior a las mediciones de la estación teniendo un valor parejo entre 0,93 y 0,94 de factor de corrección.

Si bien no se pueden sacar conclusiones absolutas a partir del análisis de dos días, los resultados obtenidos parecieran avalar la hipótesis planteada, que señala que BRASIL-SR calcula niveles de radiación semejantes a CHILE-SR para lugares despejados. Sin embargo, para condiciones con presencia de nubosidad, el modelo BRASIL-SR realiza sistemáticamente una subestimación de la radiación solar global incidente, ya que producto de la forma de calcular en índice de cobertura efectiva de nubes en función de un máximo por pixel, no se asegura que el valor registrado como tal represente efectivamente esa condición en la realidad, lo que provoca una sobrestimación del CCI_{eff} .

En contraposición, se puede señalar que el modelo CHILE-SR determina el valor del índice de cobertura efectiva de nubes sin ningún tipo de sesgo dependiente de la presencia o ausencia de cobertura, ya que al utilizar un mecanismo de clasificación, no necesita la presencia de una condición de cobertura de nubes (o cielo despejado) extrema para cada pixel, ya que es capaz de identificar dichos valores entre todos los pixeles comparables de la imagen.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado la formulación propuesta para el cálculo del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes (CCI_{eff}) para el modelo físico CHILE-SR, el cual se inserta en el proyecto FONDEF D08i1097 y tiene por objetivo estimar la radiación solar incidente sobre el territorio chileno.

Las estimaciones de radiación presentadas se realizaron para los meses de Enero, Febrero y Marzo del 2011 para la ciudad de Santiago, específicamente en la coordenada geográfica 33,5°S y 70,61° W, donde se encuentra la estación terrestre de medición.

Al contrastar los valores estimados con las mediciones se obtuvo para los datos de irradiación global diaria una desviación media (MBE) de $-44,2 \text{ Wh/m}^2$, correspondiente a un $-6,3\%$ de error relativo medio (rMBE), con una reducida dispersión en las comparaciones reflejadas en un error cuadrático medio (rRMSE) de $8,5\%$.

Paralelo al cálculo de la radiación global, se realizan estimaciones de la componente directa, las que obtuvieron un desempeño menor al tener una desviación media diaria de $1.142,5 \text{ Wh/m}^2$, lo que representa un error relativo de $13,5\%$ y un aumento de la dispersión logrando un rRMSE de $18,7\%$.

Los resultados obtenidos en esta primera formulación del modelo fueron muy buenos para la componente global de radiación en comparación con otros modelos de estimación que actualmente se encuentran en funcionamiento en varios países. Por ejemplo, el modelo HELIOSAT que trabaja con imágenes del satélite METEOSAT para la estimación de radiación en Europa, tiene valores del rRMSE de alrededor de un $15,5\%$, por otro lado el modelo SUNNY/ALBANY desarrollado por la Universidad Estatal de Nueva York presenta un error cuadrático medio relativo entre un 20% y 30% , y finalmente el modelo BRASIL-SR registra un rRMSE aproximado de 14% para varias zonas características de Brasil. Sin embargo la situación es diferente para las estimaciones de la componente directa de radiación realizadas por CHILE-SR, obteniendo valores con un mayor grado de desviación que los modelos anteriormente mencionados. Concretamente, BRASIL-SR mantuvo su error cuadrático relativo de 14% con una desviación media de $640,29 \text{ Wh/m}^2$.

Si bien los resultados obtenidos para la componente global fueron superiores a otros modelos en sus respectivos países, al aplicar la metodología de BRASIL-SR para los mismos días de evaluación en el territorio chileno, se constató que CHILE-SR tuvo un rRMSE de 0,6% mayor.

Se debe considerar que en los tres meses de evaluación se pudieron comparar sólo 57 días por causa que la estación de medición estuvo detenida por un corto período, sumado a que hubo ocasiones en que falló el envío de los archivos satelitales. Adicionalmente, producto de estar en la época de verano, ocurrió que cerca del 80% de los días presentó una condición de día completamente despejado para la zona de análisis que a la vez corresponde a sólo un punto geográfico del país.

Considerando los aspectos técnicos mencionados, no se pueden emitir conclusiones determinantes que permitan validar la hipótesis planteada, ya que las condiciones bajo las que se midieron los resultados pueden causar un sesgo desconocido al tener muy pocos días de mediciones válidas, considerando además el hecho que la mayor proporción no tuvo mayor variación en términos de cobertura, y que utilizar sólo un lugar del país, en comparación con toda su extensión, que además presenta la particularidad de tener una gran variedad de microclimas, es muy poco representativo.

El hecho que la mayor cantidad de los días de evaluación estuvieron despejados para Santiago toma mayor relevancia al considerar que la propuesta de CHILE-SR se enfoca en la correcta determinación del CCI_{eff} , por esta razón no se obtuvieron diferencias aún mayores al compararlo con BRASIL-SR, ya que el comportamiento de los modelos es parecido para condiciones con poca cobertura, razón que explica los resultados de ambos para los días de análisis especificados.

La propuesta planteada en esta Tesis consiste en una metodología de cálculo que integra el procesamiento de imágenes satelitales con una aplicación de reconocimiento de patrones que apuntan a mitigar algunas falencias identificadas en la formulación planteada en BRASIL-SR. Para ello, se incorpora el espectro de radiación infrarroja y el ángulo producido entre el satélite y el sol para el control de la luminosidad en las imágenes del canal visible. Esto permite realizar un proceso de clasificación del tipo de

nubosidad en cuatro clases en forma previa al cálculo del índice de cobertura efectiva de nubes.

De esta manera, las principales ventajas de la metodología que presenta la propuesta para el cálculo del CCI_{eff} son:

- Identifica los píxeles con presencia de nubosidad.
- Identifica los niveles de máxima cobertura por tipo de nubosidad.
- Identifica los valores característicos del albedo de superficie de todos los píxeles de la imagen.
- No subestima la radiación global calculada en zonas con condiciones de escasa nubosidad, ni la sobrestima para aquellas con gran presencia de nubosidad.
- No confunde valores elevados de albedo de superficie de píxeles con presencia de cobertura, en especial en la zona norte de Chile.
- Compara píxeles con similares condiciones de luminosidad eliminando posibles sesgos en el cálculo del CCI_{eff} .
- No requiere que un píxel presente una condición extrema (despejado o nublado) para calcular en forma adecuada el valor del CCI_{eff} para dicho píxel.

Con el objetivo de evaluar las propuestas de mejora de CHILE-SR, se realizó un análisis del comportamiento de ambos modelos para días con condiciones de cielo despejado y nublado, a partir del cual se pudo determinar que la metodología implementada logra identificar con un 97,16% de precisión aquellos píxeles de la imagen que presentan una condición de nubosidad y aquellos que presentan una de cielo despejado. Adicionalmente, luego de determinar los píxeles con presencia de nubosidad, clasifica en forma correcta el tipo de cobertura a la que corresponde en el 88,02% de los casos, permitiendo reconocer coberturas complejas como la nubosidad en multicapas, o las nubes del género *Cirrus*, aspectos que el modelo brasileiro no puede resolver.

El conocer la clase de cobertura de cada píxel permite obtener los valores de máxima cobertura de aquellos píxeles con presencia de nubosidad y los valores mínimos del albedo característico de superficie asociado a cada una ellos. De esta manera no asigna erróneamente valores de máxima cobertura a píxeles despejados por tener altos valores

de albedo de superficie como ocurre en el modelo BRASIL-SR, en especial para aquellos lugares con escasa presencia de nubosidad. Esta situación queda en evidencia en la zona norte de Chile, donde se observan saltos abruptos de la radiación estimada por el modelo brasilero para pixeles vecinos con condiciones similares de cobertura.

Al incorporar la variable que registra el ángulo producido entre el satélite y el sol, *scatter phase* (SP), todos los valores de máxima cobertura y albedo de superficie son almacenados en función de ella dependiendo del pixel del que se obtuvieron, logrando así disminuir el sesgo en el cálculo del CCI_{eff} al utilizar pixeles comparables en intensidad de luz.

El hecho de conocer aquellos pixeles con presencia de nubosidad, permite determinar los valores máximos de cobertura característicos para todas las intensidades de luminosidad, por lo que no necesita que durante el período de análisis se presente una condición de cielo completamente despejado o completamente nublado en cada pixel de la imagen, para calcular el valor correcto del CCI_{eff} . Esto permite que no sobrestime los valores del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes para zonas de poca nubosidad, ni subestima su valor para las zonas de gran nubosidad. Como BRASIL-SR necesita dichas condiciones extremas para cada pixel de la imagen a lo largo del mes, al no tener la seguridad que ocurrirá al menos una vez, se traduce en una subestimación sistemática de la radiación estimada para aquellos pixeles pertenecientes a lugares con baja presencia de nubosidad, o bien en una sobrestimación en caso contrario.

Después de las observaciones realizadas al analizar en detalle el comportamiento de ambos modelos bajo condiciones de días despejados y nublados, la nueva hipótesis que se plantea es que los resultados de las desviaciones obtenidas deben ser nuevamente validados, ya que están basados en muy pocos días de análisis correspondientes a un sólo lugar del territorio chileno. Sumado a lo anterior, cerca del 80% de los días presentaron condiciones de cielo despejado, situación bajo la que ambos modelos se comportan en forma precisa para la ciudad de Santiago. Por esta razón se cree que al realizar un análisis con un mayor número de muestras para más lugares del territorio chileno, ambos modelos debieran aumentar sus errores producto de una disminución de

cualquier tipo de sesgo por tener condiciones de mayor diversidad. Sin embargo se espera que los errores aumenten en menor medida para CHILE-SR, ya que tiene un comportamiento más estable bajo condiciones extremas como las que se producen en el norte del país.

La metodología mostrada representa los primeros pasos en el desarrollo del modelo de estimación de radiación solar incidente en Chile, por lo que queda bastante camino por recorrer en la mejora continua de la metodología de cálculo del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes y en el modelo de transmitancia.

Uno de los aspectos que queda pendiente es la validación empírica de la fase de clasificación de imágenes, pues a pesar de haber obtenido resultados muy buenos, con un 97,16% en la determinación de los píxeles despejados y un 88,02% de los tipos de nubosidad, estos valores se determinaron utilizando la técnica de validación cruzada, que si bien da un buen acercamiento al desempeño que debiera tener al momento de clasificar los píxeles de las imágenes futuras, existe un grado de incertidumbre al obtenerse a partir de los puntos clasificados en forma manual en la fase de entrenamiento. Por lo tanto, si dichos puntos fueran muy representativos de cada una de las clases a las que pertenecen, conllevaría a una baja varianza entre las muestras del conjunto de entrenamiento, lo que podría provocar una sobrevaloración del desempeño real de la clasificación. Considerando esta situación, sería adecuado implementar alguna metodología a largo plazo para validar y determinar el rendimiento real de la clasificación que realiza el clasificador para las diferentes zonas de Chile. Una opción podría ser el registro gráfico de las nubes presentes en el cielo en todas las estaciones de medición que se instalarán en el marco del proyecto FONDEF, para luego contrastarlas con la clasificación realizada por el modelo. Sin embargo se debe tener la aprensión que al observar la nubosidad desde la superficie terrestre, sólo se verán las capas bajas de las nubes, pudiendo caer en errores de observación. Por ejemplo, si se presentara un tipo de nubosidad del género *Nimbostratus* y en capas superiores se desarrollara una del tipo *Cumulus*, está última no podría ser identificada, mientras que al observarla desde el satélite se podría observar sin inconvenientes.

Otro aspecto a considerar es que el modelo de transmitancia de CHILE-SR al estar basado en el desarrollado en BRASIL-SR, asume que cualquier tipo de nubosidad corresponde a una de la clase *Altostratus*, ya que en Brasil es el tipo de cobertura más común para toda su extensión. A partir de los resultados obtenidos mediante el proceso de clasificación se puede apreciar que esta situación no ocurre en Chile, donde se presentan todos los tipos de nubosidad, predominando las de tipo *Altostratus* en la zona costera del norte del país, y las del tipo *Cumulus* desde de la región metropolitana hacia el sur. Considerando esto, la forma en que se realiza el cálculo del Índice de Cobertura Efectiva de Nubes propuesto en CHILE-SR, en que se lleva a una escala común los espesores de todos los tipos de nubosidad por medio del ponderador de clases, no dialoga de manera adecuada con la forma en que el modelo de transmitancia está aplicado para las condiciones particulares de Chile, debido a que asume que todos los tipos de nubosidad pertenecen a un mismo tipo.

Una posible solución a lo anteriormente expuesto es buscar la manera en que el modelo de transmitancia pueda utilizar la información del tipo de cobertura entregada por el clasificador para simular las condiciones atmosféricas con el tipo de nubosidad que realmente corresponda.

El proyecto en el que se enmarca la investigación contempla la instalación de más estaciones de medición, por lo que se contará con una mayor cantidad de lugares en Chile donde se obtendrán mediciones de radiación válidas, por consiguiente, si todo sigue evolucionando de buena manera, la hipótesis que queda planteada en este trabajo se podrá resolver en un horizonte de 6 a 12 meses, cuando hayan un número mayor de mediciones para varios puntos representativos del país.

GLOSARIO

Φ_0 :	Radiación solar extraterrestre
Φ_g :	Radiación global en superficie
τ_{clear} :	Transmitancia atmosférica para condiciones de cielo completamente despejado
τ_{cloud} :	Transmitancia atmosférica para condiciones de cielo completamente cubierto
$\tau_{\text{cloud-dir}}$:	Transmitancia con presencia de nubosidad
$\tau_{\text{atm-dir}}$:	Transmitancia de la componente directa de la radiación solar para condiciones de cielo despejado
Ac:	Nube del género <i>Alto cumulus</i>
ANS:	Archivo Nacional Solarimétrico
As:	Nube del género <i>Alto stratus</i>
cal:	Nube de especie <i>calvus</i>
cap:	Nube de especie <i>capillatus</i>
cas:	Nube de especie <i>castellanus</i>
Cb:	Nube del género <i>Cumulonimbus</i>
Cc:	Nube del género <i>Cirrocumulus</i>
Cb :	Matriz de covarianza Inter-clase
$CCI_{\text{eff}}(i, j)$:	Valor índice de cobertura efectiva de nubes calculado para el pixel (i, j)
CCI_{eff} :	Matriz de índice de cobertura efectiva de nubes de una imagen completa
CI_CS :	Valores mínimos clasificados como <i>clear sky</i>
CI_CS_pixel :	Valores mínimos para pixeles clasificados como <i>clear sky</i>
CI_O :	Valores de máxima cobertura
Ci:	Nube del género <i>Cirrus</i>
CNE:	Comisión Nacional de Energía
con:	Nube de especie <i>congestus</i>
Cs:	Nube del género <i>Cirrostratus</i>
Cu:	Nube del género <i>Cumulus</i>

Cw:	Matriz de covarianza Intra-clase
d:	Vector de clasificación
d1:	Vector de clasificación luego de ser filtrada por valores de <i>scatter phase</i>
d_tra:	Vector de clasificación a ser utilizado en proceso de validación cruzada
dI:	Imagen de clasificación
DMC:	Dirección Meteorológica de Chile
DNI:	Radiación solar directa en plano horizontal
f:	Matriz de entrenamiento
f1:	Matriz de entrenamiento luego de ser filtrada por valores de <i>scatter phase</i>
f_tes:	Matriz de características a ser clasificada en proceso de validación cruzada
f_tra:	Matriz de entrenamiento a ser utilizado en proceso de validación cruzada
fib:	Nube de especie <i>fibratus</i>
flo:	Nube de especie <i>floccus</i>
fn:	Matriz que almacena el nombre de las características en f
fra:	Nube de especie <i>fractus</i>
GTZ:	<i>Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit</i>
hum:	Nube de especie <i>humilis</i>
I:	Estructura de datos de MATLAB
I.c1:	Imagen del canal 1 almacenada en la estructura de datos de MATLAB
I.c4:	Imagen del canal 4 almacenada en la estructura de datos de MATLAB
len:	Nube de especie <i>lenticularis</i>
M_c:	Número de características a considerar (Número de columnas de f)
MBE:	Error de desviación media
med:	Nube de especie <i>mediocris</i>
neb:	Nube de especie <i>nebulosus</i>
N_m:	Número de muestras clasificadas en la fase de entrenamiento (Número de filas de f)

Ns:	Nube del género <i>Nimbostratus</i>
Pond:	Vector que almacena los ponderadores de cada clase para el cálculo del CCI_{eff}
rMBE:	Error de desviación relativo medio
rRMSE:	Error cuadrático medio relativo
Sc:	Nube del género <i>Stratocumulus</i>
SP:	Valor de <i>scatter phase</i>
SP _{Prom} :	Promedio simple de los valores de SP de una imagen
spi:	Nube de especie <i>spissatus</i>
St:	Nube del género <i>Stratus</i>
str:	Nube de especie <i>stratiformis</i>
unc:	Nube de especie <i>uncinus</i>
UTC:	Tiempo Universal Coordinado (<i>Greenwich Meridian Time</i>)
Xt:	Matriz de características de la imagen a clasificar

BIBLIOGRAFIA

Amato, U., Antoniadis, A., Cuomo, V., Cutillo, L., Franzese, M., Murino, L., y otros. (2008). Statistical cloud detection from SEVIRI multispectral images. *Remote Sensing of Environment* , [750-766].

Anderssen, E., Dyrstad, K., Westad, F., & Martens, H. (2006). Reducing over-optimism in variable selection by cross-model validation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* , [69-74].

Asafu-Adjaye, J. (2000). The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries. *Energy Economics* , 22 (6), [615-625].

Beyer, H. G., Constanzo, C., & Heinemann, D. (1996). Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy* , [207-212].

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

Blaiotta, J., & Delieutraz, P. (2004). *Teorema Central del Límite*. Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Bleeker, W., Alaka, M. A., Beaufils, R., & Bessemoulin, J. (1969). *International Cloud Atlas* (2a ed.). Santiago, Chile: Universidad Católica de Chile.

Bullón Miró, F. (2006). *El Mundo ante el Cenit del Petróleo*. Informe sobre la cúspide de la producción mundial de petróleo. Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos.

- Ceballos, J. C., Bottino, M. J., & Souza, J. M. (2004). A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *Journal of Geophysical Research* .
- Dagestad, K.-F., & Olseth, J. A. (2007). A modified algorithm for calculating de cloud index. *Solar Energy* , [280-289].
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and data analysis in geology* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Delgado, G., Redaño, A., Lorente, J., Nieto, R., Gimeno, L., Ribera, P., y otros. (2007). Cloud cover analysis associated to cutt-off low-pressure systems over Europe using Meteosat Imagery. *Meteorology and Atmospheric Physics* , [141-157].
- Dorian, J. P., Franssen, H. T., & Simbeck, D. R. (2006). *Global challenges in energy. Energy Policy* .
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes* (3rd ed.). New Jersey: Willey.
- Galli, C., Nardino, M., Levizzani, V., Rizzi, R., & Georgiadis, T. (2004). Radiative energy partition and cloud radiative forcing at a Po valley site. *Atmospheric Research* , [329-351].
- Gambi, W. (1998). *Avaliacao de um modelo físico estimador de irradiancia solar baseado em satélites geoestacionarios. Dissertacao de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.*
- Ghosh, A., Pal, N. R., & Das, J. (2006). A fuzzy rule based approach to cloud cover estimation. *Remote Sensing of Environment* , [531-549].
- Goodman, A. H., & Henderson-Sellers, A. (1987). *Cloud detection and analysis: A review of recent progress. Atmospheric Research* .

Goswami, D. Y., Vijayaraghavan, S. L., & Tamm, G. (2004). New and emerging developments in solar energy. *Solar Energy* , [33-43].

Goswami, Y., Kreith, F., & Kreider, F. (2004). *Introduction to solar energy engineering* (1st ed.). USA: Taylor & Francis.

Hartmann, D. L., Ockert-Bell, M. E., & Michelsen, M. L. (1992). *The Effect of Cloud Type on Earth's Energy Balance: Global Analysis*. Department of Atmospheric Sciences, University of Washington .

Lenoble, J. (1985). *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*. Virginia: A. Deepak Publishing .

Martins, F. R. (Agosto de 2001). *Influencia do processo de determinacao da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiacao BRASIL-SR*. Tese de Doutorado apresentada no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais .

Martins, F. R., Silva, S. A., Pereira, E. B., & Abreu, S. L. (2007). The influence of cloud cover index on the accuracy of solar irradiance model estimates. *Meteorology and Atmospheric Physics* .

Massons, J., Domingo, D., Codina, B., & Lorente, J. (1997). Análisis de Nubosidad a partir de Imágenes METEOSAT. VII Congreso Nacional de Teledetección , [507-512].

Nardino, M., & Georgiadis, T. (2003). Cloud type and cloud cover effects on the surface radiative balance at several Polar sites. *Theoretical and Applied Climatology* , [203-215].

Ortega, A., Escobar, R., & Colle, S. (2008). *Solar Energy Resource Assessment for Chile*. Energy Sustainability .

Ortega, A., Escobar, R., Colle, S., & de Abreu, S. L. (2010). The state of solar energy resource assessment in Chile. *Renewable Energy* , 2514-2524.

Park, C. H., & Park, H. (2008). A comparison of generalized linear discriminant analysis algorithms. *Pattern Recognition* , [1083-1097].

Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Couto, P., Stuhlmann, R., & Colle, S. (2000). Effects of Burning of Biomass on Satellite Estimations of Solar Irradiation in Brazil. *Solar Energy* , [91-97].

Pereira, E. B., Martins, F. R., De Abreu, S. L., & Rüther, R. (2006). Atlas Brasileiro de Energia Solar. Sao José dos Campos, Brasil: INPE.

Perez, R. (2008). Renewable Energies - Our Solar Future. *Daylight & Architecture* .

Perez, R. (June de 2006). Solar Energy: A Realistic Solution to Our Energy Future. *The Journal of County Administration* .

Perez, R., & Perez, M. (2009). A fundamental look at energy reserves for the planet. *IEA/SHC Solar Update* .

Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., y otros. (2002). A new operational model for satellites irradiances: description and validation. *Solar Energy* , 75(5), [307 - 317].

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

Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., & Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the Perez Diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy* , [221-232].

Pitz-Paal, R., Geuder, N., Hoyer-Klick, C., & Schillings, C. (2007). How to get bankable meteo data? DLR Solar Resource Assessment , In: NREL 2007 parabolic trough technologyworkshop, March 8-9, 2007, Golden, Colorado; http://www.nrel.gov/csp/troughnet/wkshp_2007.html; 2007 [accesed 21.02.11].

Ricciardelli, E., Romano, F., & Cuomo, V. (2008). Physical and Statistical Approaches for Cloud Identification using Meteosat Second Generation-Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager Data. *Remote Sensing of Environment* , [2741-2760].

Rigollier, C., Lefreve, M., & Wal, L. (2004). The method HELIOSAT-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy* , 77: [159-169].

Ruprecht, E. (2002). Statistical approaches to cloud classification. Institut fur Geophysik und Meteorologie .

Stuhlmann, F. R., Rieland, M., & Raschke, E. (1990). An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *J. Applied Meteorology* , [586 - 603].

Tiba, C., Fraidenraich, N., Grossi Gallegos, H., & Lyra, F. (2002). Solar energy resource assessment - Brazil. *Renewable Energy* , [383-400].

Tokman, M. R., & Huepe M, C. (2008). Política Energética: Nuevos Lineamientos. Comisión Nacional de Energía.

Tselioudis, G., Rossow, W. B., & Rind, D. (1992). Global Patterns of Cloud Optical Thickness Variation with Temperature. *Journal of Climate* .

Vignola, F., Harlan, P., Perez, R., & Kmiecik, R. (2007). Analysis of Satellite Derived Beam and Global Radiation Data. *Solar Energy* , 81, [768 - 772].

Warren, S.G., Hahn, C. J., London, J., Chervin, R.M., Jenn, E. R. (1986). Global distribution of total cloud cover and cloud types amount over land. DOE/ER/60085-H1, NCAR/TN-273, NCAR Technical Notes.

ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS DE SCATTER PHASE

Tabla A- 1: Scatter Phase por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 12:40 UTC (Parte 1)

Nro Dia	Nro Dia	Año	Mes	Dia	Hora_UTC	Min_UTC	Is_Var	San Pedro	Santiago	P. Montt
1	157	2011	1	2	12	40	1	70,48	70,24	70,04
2	158	2011	1	3	12	40	1	70,55	70,31	70,1
3	159	2011	1	4	12	40	1	70,63	70,38	70,17
4	160	2011	1	5	12	40	1	70,7	70,45	70,24
5	161	2011	1	6	12	40	1	70,79	70,53	70,31
6	162	2011	1	7	12	40	1	70,85	70,59	70,37
7	163	2011	1	8	12	40	1	70,92	70,65	70,43
8	164	2011	1	9	12	40	1	70,97	70,7	70,48
9	165	2011	1	10	12	40	1	71,03	70,75	70,52
10	166	2011	1	11	12	40	1	71,09	70,81	70,57
11	167	2011	1	12	12	40	1	71,14	70,85	70,62
13	169	2011	1	14	12	40	1	71,24	70,94	70,69
14	170	2011	1	15	12	40	1	71,28	70,97	70,73
16	172	2011	1	17	12	40	1	71,37	71,05	70,8
17	173	2011	1	18	12	40	1	71,4	71,08	70,82
18	174	2011	1	19	12	40	1	71,44	71,1	70,84
19	175	2011	1	20	12	40	1	71,46	71,12	70,85
20	176	2011	1	21	12	40	1	71,49	71,14	70,87
21	177	2011	1	22	12	40	1	71,5	71,15	70,87
22	178	2011	1	23	12	40	1	71,53	71,16	70,88
23	179	2011	1	24	12	40	1	71,54	71,17	70,88
24	180	2011	1	25	12	40	1	71,55	71,17	70,88
25	181	2011	1	26	12	40	1	71,58	71,19	70,89
26	182	2011	1	27	12	40	1	71,56	71,16	70,86
27	183	2011	1	28	12	40	1	71,58	71,18	70,87
28	184	2011	1	29	12	40	1	71,58	71,17	70,85
29	185	2011	1	30	12	40	1	71,57	71,15	70,83
30	186	2011	1	31	12	40	1	71,56	71,14	70,81
31	187	2011	2	1	12	40	1	71,55	71,12	70,78
32	188	2011	2	2	12	40	1	71,54	71,09	70,75
33	189	2011	2	3	12	40	1	71,52	71,06	70,72

Tabla A- 2: Scatter Phase por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 12:40 UTC (Parte 2)

Nro Día	Nro Día	Año	Mes	Día	Hora_UTC	Min_UTC	Is_Var	San Pedro	Santiago	P. Montt
34	190	2011	2	4	12	40	1	71,49	71,03	70,68
36	192	2011	2	6	12	40	1	71,44	70,96	70,59
37	193	2011	2	7	12	40	1	71,41	70,91	70,54
40	196	2011	2	10	12	40	1	71,31	70,79	70,4
41	197	2011	2	11	12	40	1	71,27	70,74	70,34
42	198	2011	2	12	12	40	1	71,22	70,67	70,27
43	199	2011	2	13	12	40	1	71,17	70,61	70,2
44	200	2011	2	14	12	40	1	71,12	70,55	70,13
46	202	2011	2	16	12	40	1	71	70,41	69,98
47	203	2011	2	17	12	40	1	70,93	70,33	69,9
48	204	2011	2	18	12	40	1	70,87	70,27	69,82
49	205	2011	2	19	12	40	1	70,8	70,18	69,73
50	206	2011	2	20	12	40	1	70,75	70,12	69,66
51	207	2011	2	21	12	40	1	70,67	70,02	69,56
52	208	2011	2	22	12	40	1	70,58	69,93	69,46
53	209	2011	2	23	12	40	1	70,52	69,85	69,37
54	210	2011	2	24	12	40	1	70,44	69,76	69,28
55	211	2011	2	25	12	40	1	70,36	69,67	69,17
57	213	2011	2	27	12	40	1	70,18	69,47	68,96
62	218	2011	3	1	12	40	1	70	69,27	68,75
63	219	2011	3	2	12	40	1	69,91	69,16	68,63
64	220	2011	3	3	12	40	1	69,82	69,06	68,52
65	221	2011	3	4	12	40	1	69,71	68,94	68,39
66	222	2011	3	5	12	40	1	69,61	68,83	68,28
67	223	2011	3	6	12	40	1	69,52	68,73	68,17

Tabla A- 3: Scatter Phase por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 16:40 UTC (Parte 1)

Nro Dia	Nro Dia	Año	Mes	Dia	Hora_UTC	Min_UTC	Is_Var	San Pedro	Stgo	P Montt
1	157	2011	1	2	16	40	1	27,69	28,97	29,81
2	158	2011	1	3	16	40	1	27,64	28,91	29,74
3	159	2011	1	4	16	40	1	27,57	28,84	29,67
4	160	2011	1	5	16	40	1	27,5	28,76	29,59
5	161	2011	1	6	16	40	1	27,42	28,68	29,5
6	162	2011	1	7	16	40	1	27,34	28,59	29,41
7	163	2011	1	8	16	40	1	27,25	28,49	29,31
8	164	2011	1	9	16	40	1	27,15	28,39	29,2
9	165	2011	1	10	16	40	1	27,05	28,28	29,09
10	166	2011	1	11	16	40	1	26,94	28,16	28,97
11	167	2011	1	12	16	40	1	26,82	28,04	28,84
13	169	2011	1	14	16	40	1	26,57	27,78	28,57
14	170	2011	1	15	16	40	1	26,44	27,64	28,43
15	171	2011	1	16	16	40	1	26,31	27,49	28,28
16	172	2011	1	17	16	40	1	26,16	27,34	28,12
17	173	2011	1	18	16	40	1	26,01	27,18	27,96
18	174	2011	1	19	16	40	1	25,85	27,02	27,79
19	175	2011	1	20	16	40	1	25,69	26,85	27,62
20	176	2011	1	21	16	40	1	25,52	26,67	27,44
21	177	2011	1	22	16	40	1	25,35	26,49	27,25
22	178	2011	1	23	16	40	1	25,17	26,3	27,06
25	181	2011	1	26	16	40	1	24,6	25,71	26,45
26	182	2011	1	27	16	40	1	24,39	25,5	26,23
27	183	2011	1	28	16	40	1	24,19	25,28	26,02
28	184	2011	1	29	16	40	1	23,98	25,06	25,79
29	185	2011	1	30	16	40	1	23,76	24,84	25,56
30	186	2011	1	31	16	40	1	23,53	24,6	25,32

Tabla A- 4: Scatter Phase por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 16:40 UTC (Parte 2)

Nro Dia	Nro Dia	Año	Mes	Dia	Hora.UTC	Min.UTC	Is_Var	San Pedro	Stgo	P Montt
31	187	2011	2	1	16	40	1	23,3	24,37	25,08
32	188	2011	2	2	16	40	1	23,07	24,12	24,83
33	189	2011	2	3	16	40	1	22,83	23,88	24,58
36	192	2011	2	6	16	40	1	22,09	23,1	23,79
37	193	2011	2	7	16	40	1	21,83	22,83	23,51
40	196	2011	2	10	16	40	1	21,03	22,01	22,67
41	197	2011	2	11	16	40	1	20,76	21,72	22,38
42	198	2011	2	12	16	40	1	20,48	21,43	22,08
43	199	2011	2	13	16	40	1	20,19	21,13	21,78
44	200	2011	2	14	16	40	1	19,9	20,83	21,47
45	201	2011	2	15	16	40	1	19,62	20,53	21,16
46	202	2011	2	16	16	40	1	19,32	20,23	20,85
47	203	2011	2	17	16	40	1	19,02	19,91	20,53
48	204	2011	2	18	16	40	1	18,72	19,6	20,21
49	205	2011	2	19	16	40	1	18,41	19,28	19,88
51	207	2011	2	21	16	40	1	17,8	18,64	19,23
52	208	2011	2	22	16	40	1	17,48	18,31	18,89
53	209	2011	2	23	16	40	1	17,16	17,98	18,55
55	211	2011	2	25	16	40	1	16,52	17,3	17,86
57	213	2011	2	27	16	40	1	15,87	16,62	17,16
62	218	2011	3	1	16	40	1	15,21	15,92	16,44
63	219	2011	3	2	16	40	1	14,88	15,57	16,08
64	220	2011	3	3	16	40	1	14,55	15,22	15,72
65	221	2011	3	4	16	40	1	14,22	14,87	15,36
66	222	2011	3	5	16	40	1	13,89	14,52	14,99

Tabla A- 5: Scatter Phase por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 20:40 UTC (Parte 1)

Nro Dia	Nro Dia	Año	Mes	Día	Hora_UTC	Min_UTC	Is_Var	San Pedro	Stgo	P Montt
1	157	2011	1	2	20	40	1	58,34	60,01	61,14
2	158	2011	1	3	20	40	1	58,22	59,89	61,03
3	159	2011	1	4	20	40	1	58,1	59,77	60,9
4	160	2011	1	5	20	40	1	57,95	59,62	60,75
5	161	2011	1	6	20	40	1	57,83	59,49	60,63
6	162	2011	1	7	20	40	1	57,7	59,37	60,5
7	163	2011	1	8	20	40	1	57,58	59,24	60,37
8	164	2011	1	9	20	40	1	57,45	59,11	60,24
9	165	2011	1	10	20	40	1	57,32	58,98	60,11
10	166	2011	1	11	20	40	1	57,18	58,84	59,96
11	167	2011	1	12	20	40	1	57,05	58,71	59,83
13	169	2011	1	14	20	40	1	56,79	58,44	59,57
14	170	2011	1	15	20	40	1	56,64	58,29	59,41
15	171	2011	1	16	20	40	1	56,51	58,16	59,28
17	173	2011	1	18	20	40	1	56,24	57,88	59
18	174	2011	1	19	20	40	1	56,12	57,76	58,87
19	175	2011	1	20	20	40	1	55,98	57,62	58,73
20	176	2011	1	21	20	40	1	55,85	57,48	58,6
22	178	2011	1	23	20	40	1	55,59	57,22	58,33
23	179	2011	1	24	20	40	1	55,44	57,06	58,17
24	180	2011	1	25	20	40	1	55,32	56,94	58,04
25	181	2011	1	26	20	40	1	55,19	56,8	57,91
26	182	2011	1	27	20	40	1	55,06	56,67	57,77
27	183	2011	1	28	20	40	1	54,94	56,54	57,64
28	184	2011	1	29	20	40	1	54,81	56,41	57,51
29	185	2011	1	30	20	40	1	54,69	56,29	57,38
30	186	2011	1	31	20	40	1	54,57	56,16	57,25
31	187	2011	2	1	20	40	1	54,44	56,03	57,12
32	188	2011	2	2	20	40	1	54,32	55,91	56,99
33	189	2011	2	3	20	40	1	54,22	55,8	56,88

Tabla A- 6: Scatter Phase por Día para Zona Norte, Centro y Sur. Hora: 20:40 UTC (Parte 2)

Nro Dia	Nro Dia	Año	Mes	Dia	Hora.UTC	Min.UTC	Is_Var	San Pedro	Stgo	P Montt
34	190	2011	2	4	20	40	1	54,08	55,66	56,74
36	192	2011	2	6	20	40	1	53,86	55,43	56,5
37	193	2011	2	7	20	40	1	53,76	55,32	56,39
38	194	2011	2	8	20	40	1	53,66	55,21	56,28
40	196	2011	2	10	20	40	1	53,46	55	56,06
41	197	2011	2	11	20	40	1	53,36	54,9	55,95
42	198	2011	2	12	20	40	1	53,27	54,8	55,85
43	199	2011	2	13	20	40	1	53,18	54,7	55,74
44	200	2011	2	14	20	40	1	53,09	54,6	55,65
45	201	2011	2	15	20	40	1	53,01	54,51	55,55
46	202	2011	2	16	20	40	1	52,91	54,41	55,44
47	203	2011	2	17	20	40	1	52,86	54,34	55,37
48	204	2011	2	18	20	40	1	52,76	54,24	55,26
49	205	2011	2	19	20	40	1	52,7	54,17	55,19
51	207	2011	2	21	20	40	1	52,57	54,02	55,03
52	208	2011	2	22	20	40	1	52,5	53,95	54,95
53	209	2011	2	23	20	40	1	52,44	53,88	54,88
55	211	2011	2	25	20	40	1	52,34	53,76	54,75
62	218	2011	3	1	20	40	1	52,19	53,57	54,53
63	219	2011	3	2	20	40	1	52,16	53,53	54,48
64	220	2011	3	3	20	40	1	52,14	53,5	54,45
65	221	2011	3	4	20	40	1	52,12	53,46	54,4
66	222	2011	3	5	20	40	1	52,09	53,43	54,36
67	223	2011	3	6	20	40	1	52,06	53,39	54,31

ANEXO B: RESULTADOS CHILE-SR

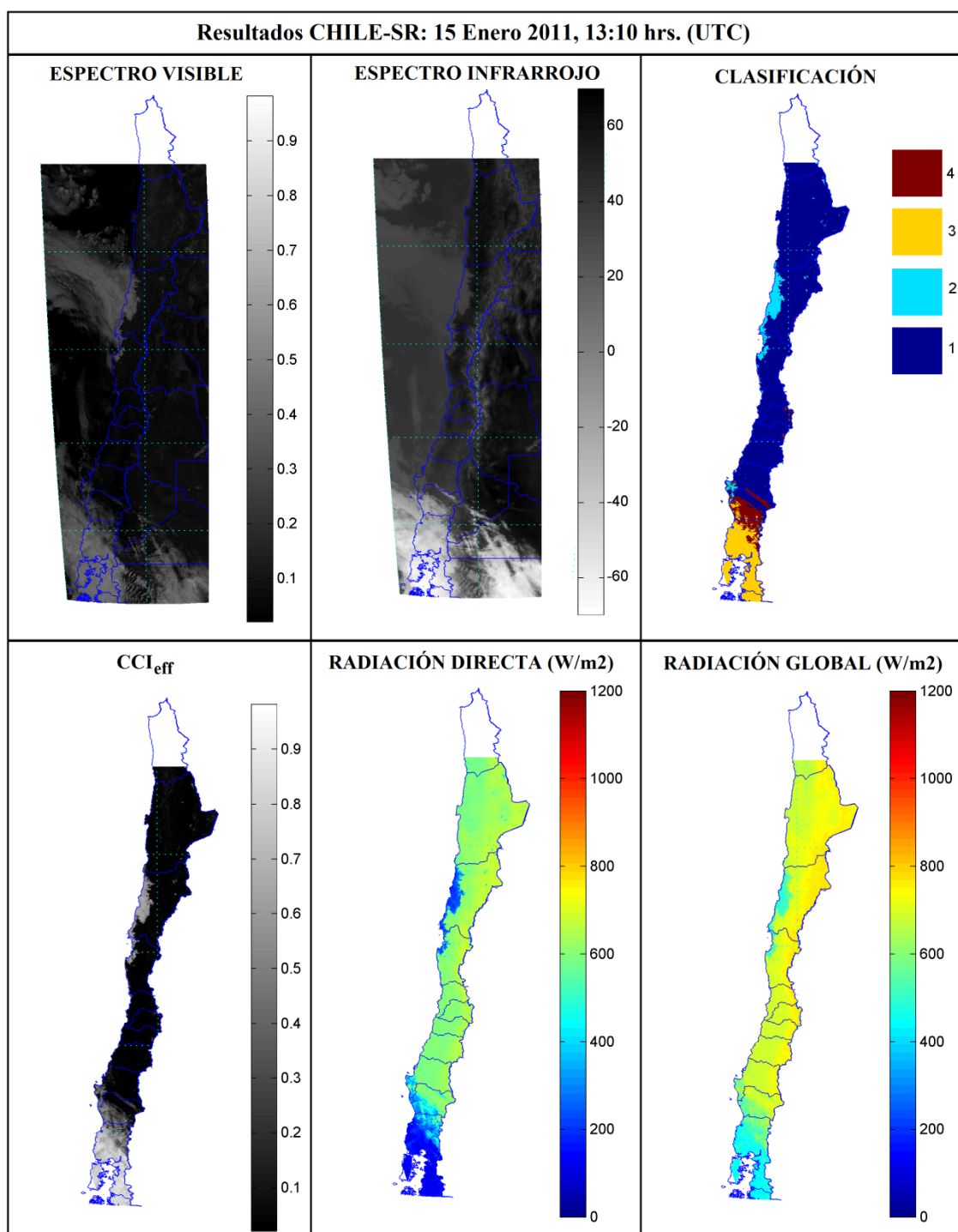


Figura B- 1: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 13:10 hrs. (UTC)

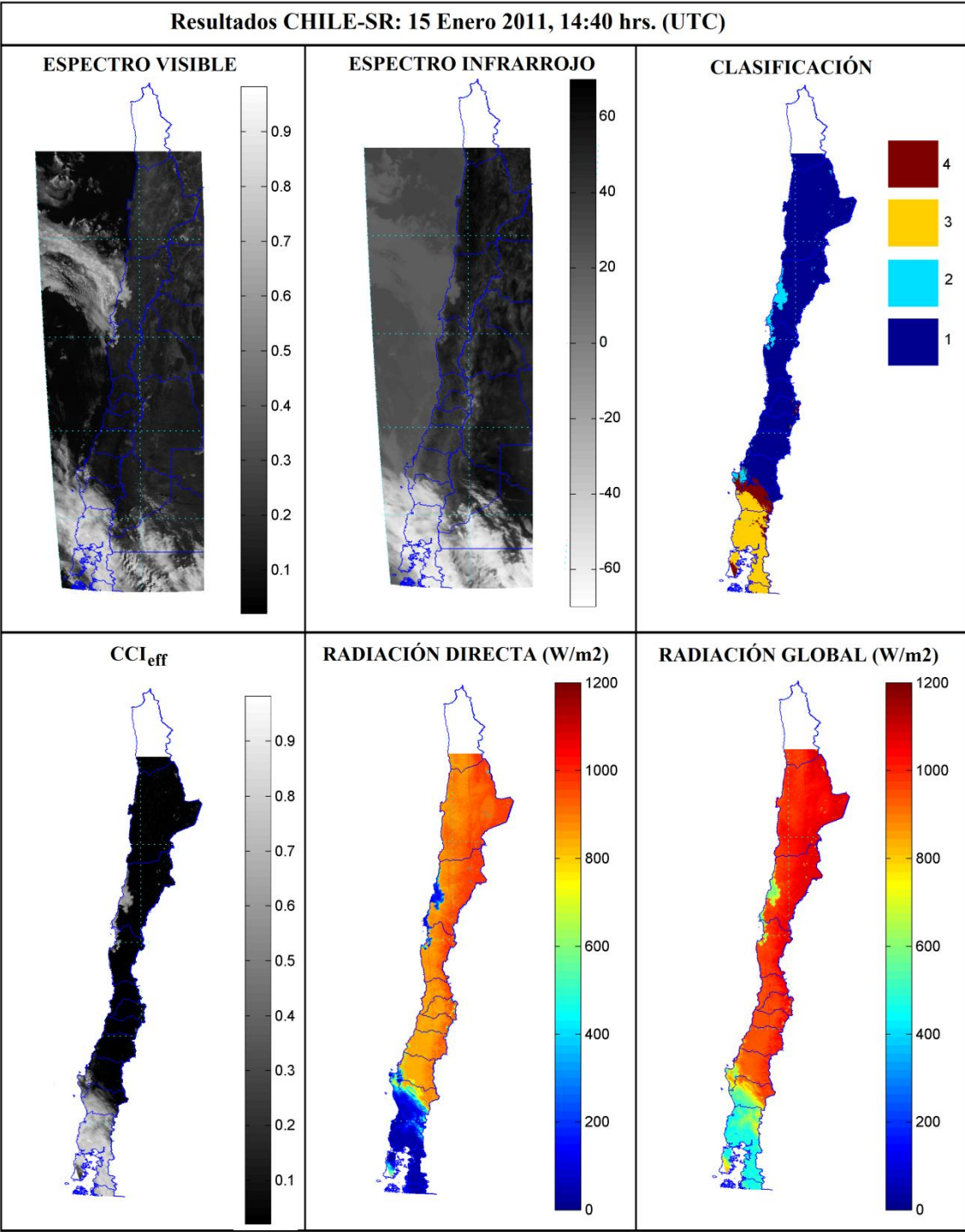


Figura B- 2: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 14:40 hrs. (UTC)

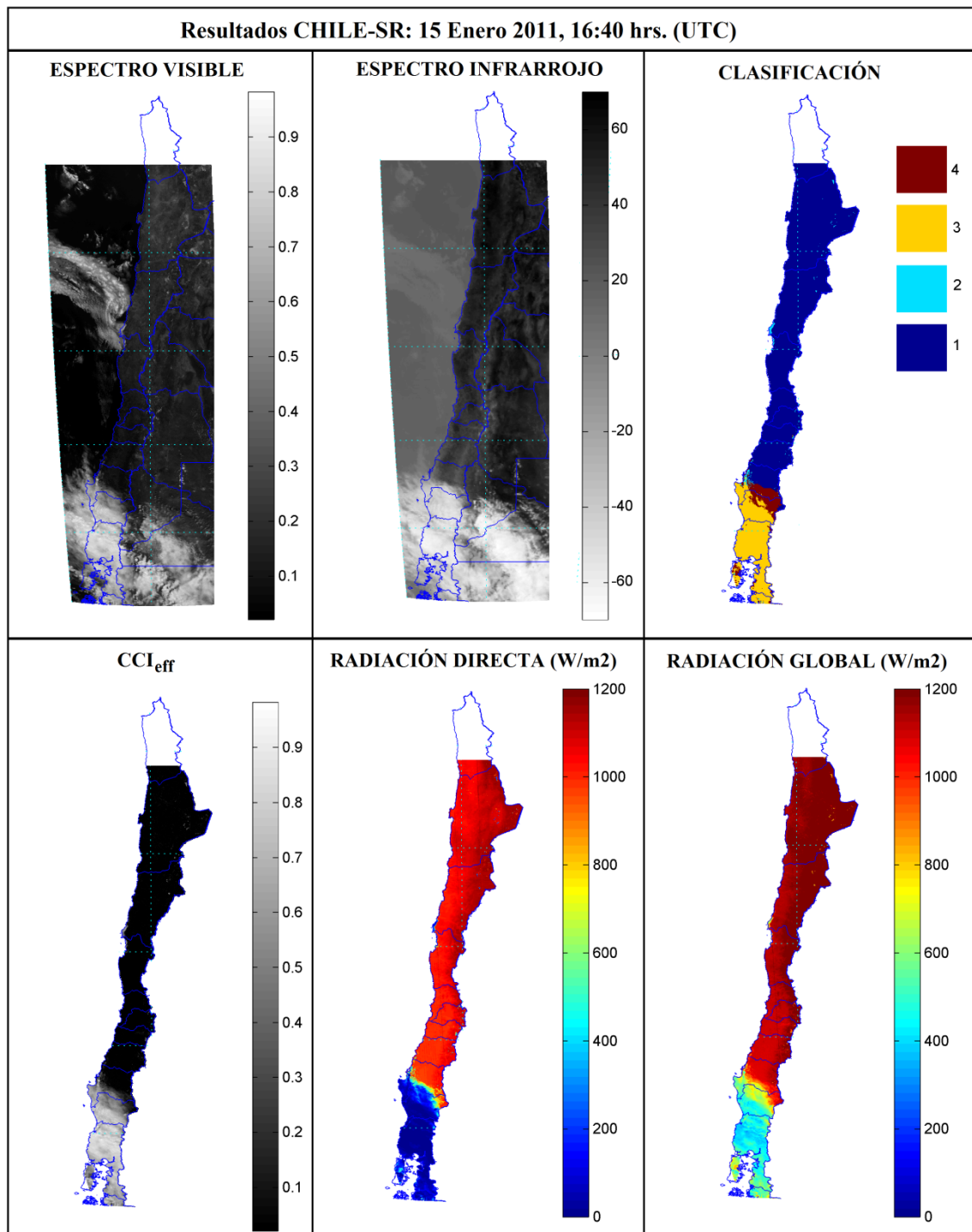


Figura B- 3: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 16:40 hrs. (UTC)

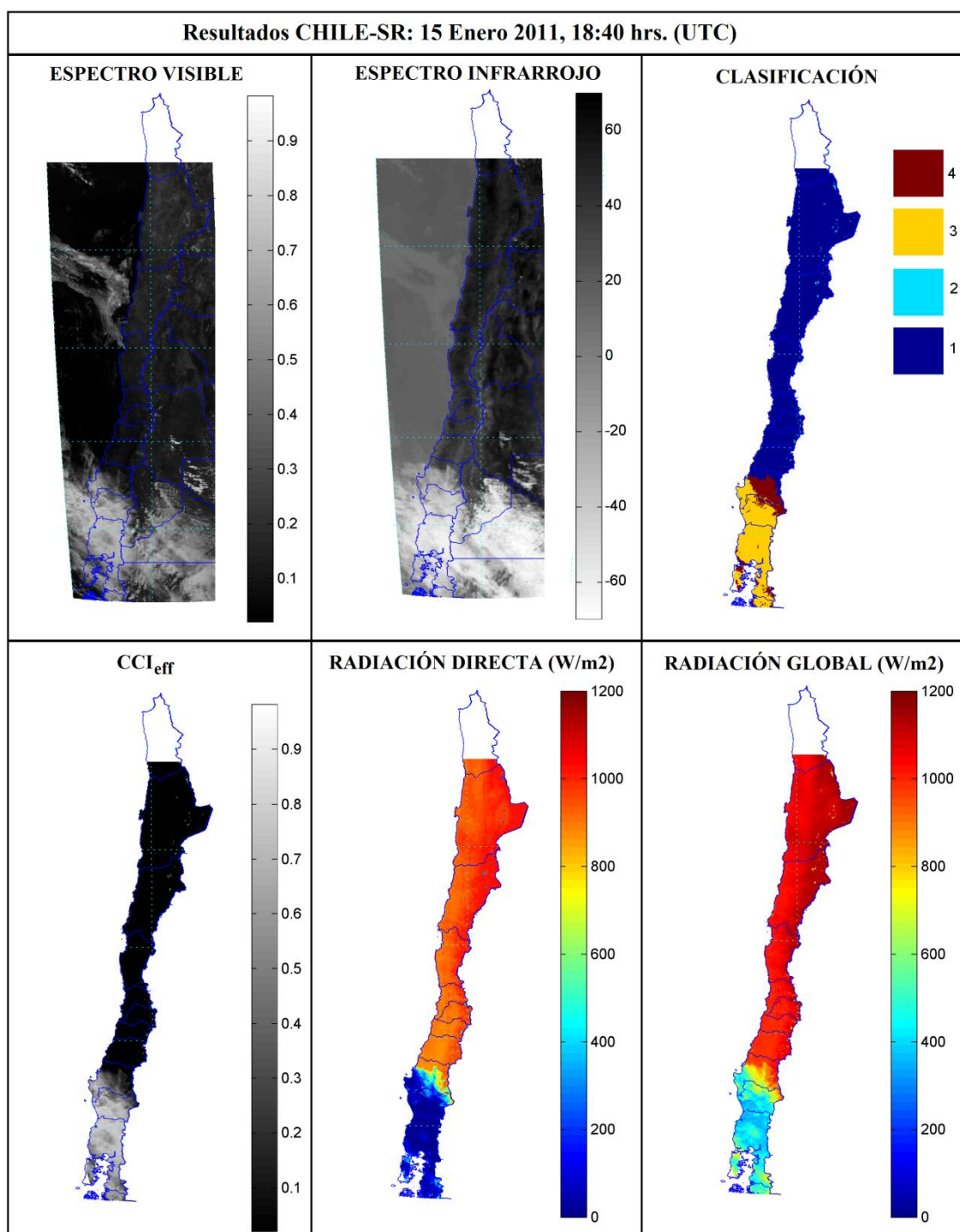


Figura B- 4: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 18:40 hrs. (UTC)

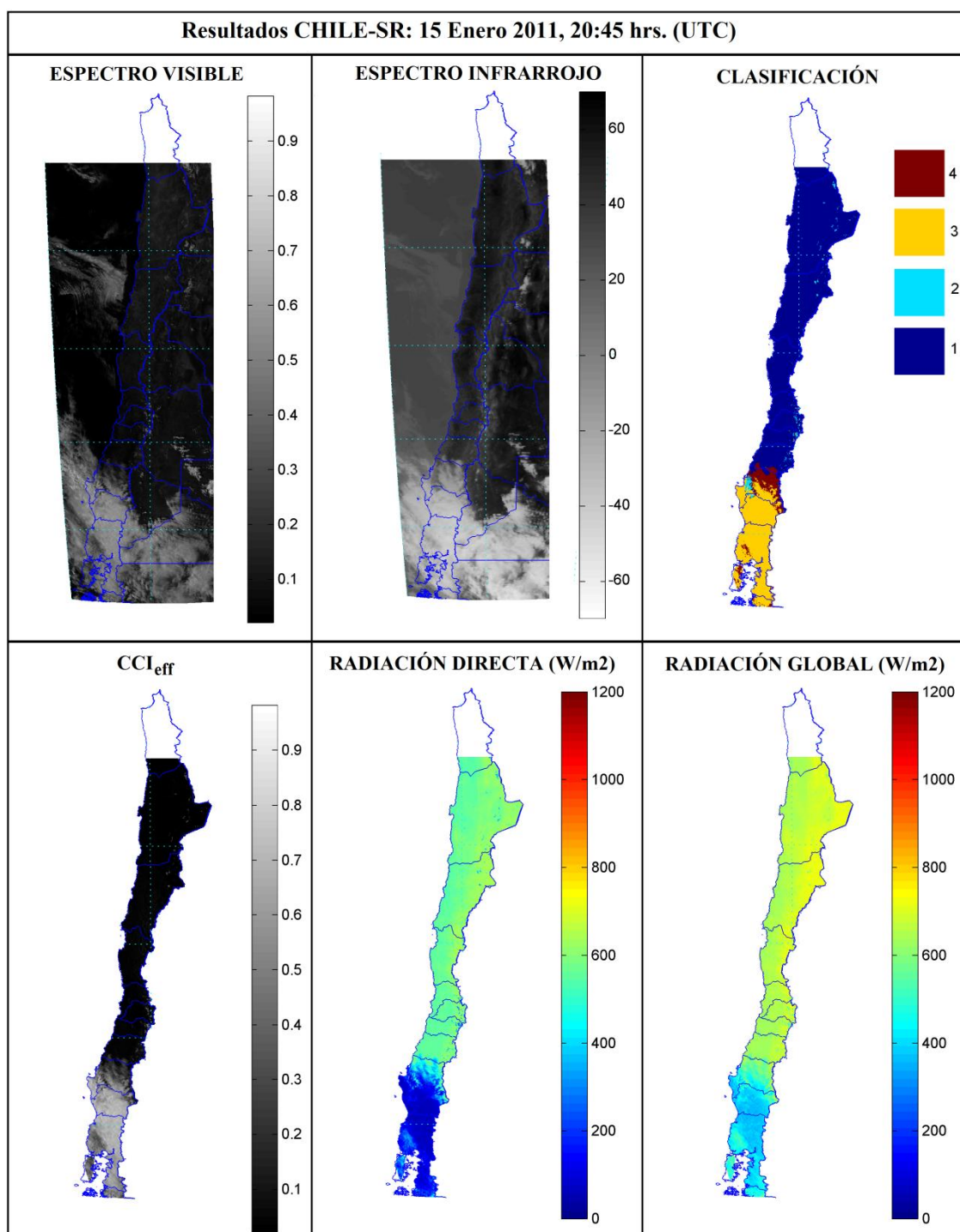


Figura B- 5: Resultados CHILE-SR. 15 Enero 2011, 20:45 hrs. (UTC)

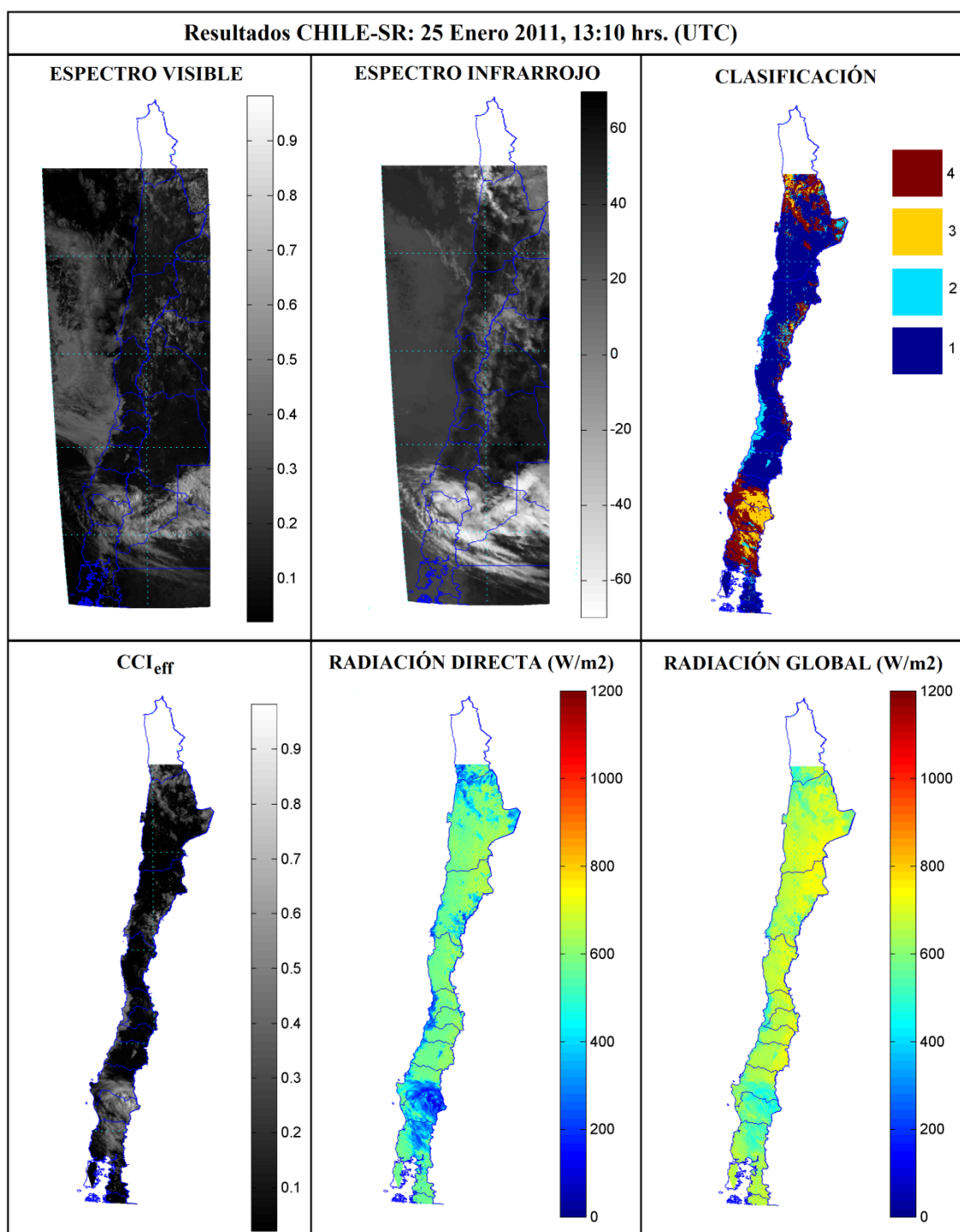


Figura B- 6: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 13:10 hrs. (UTC)

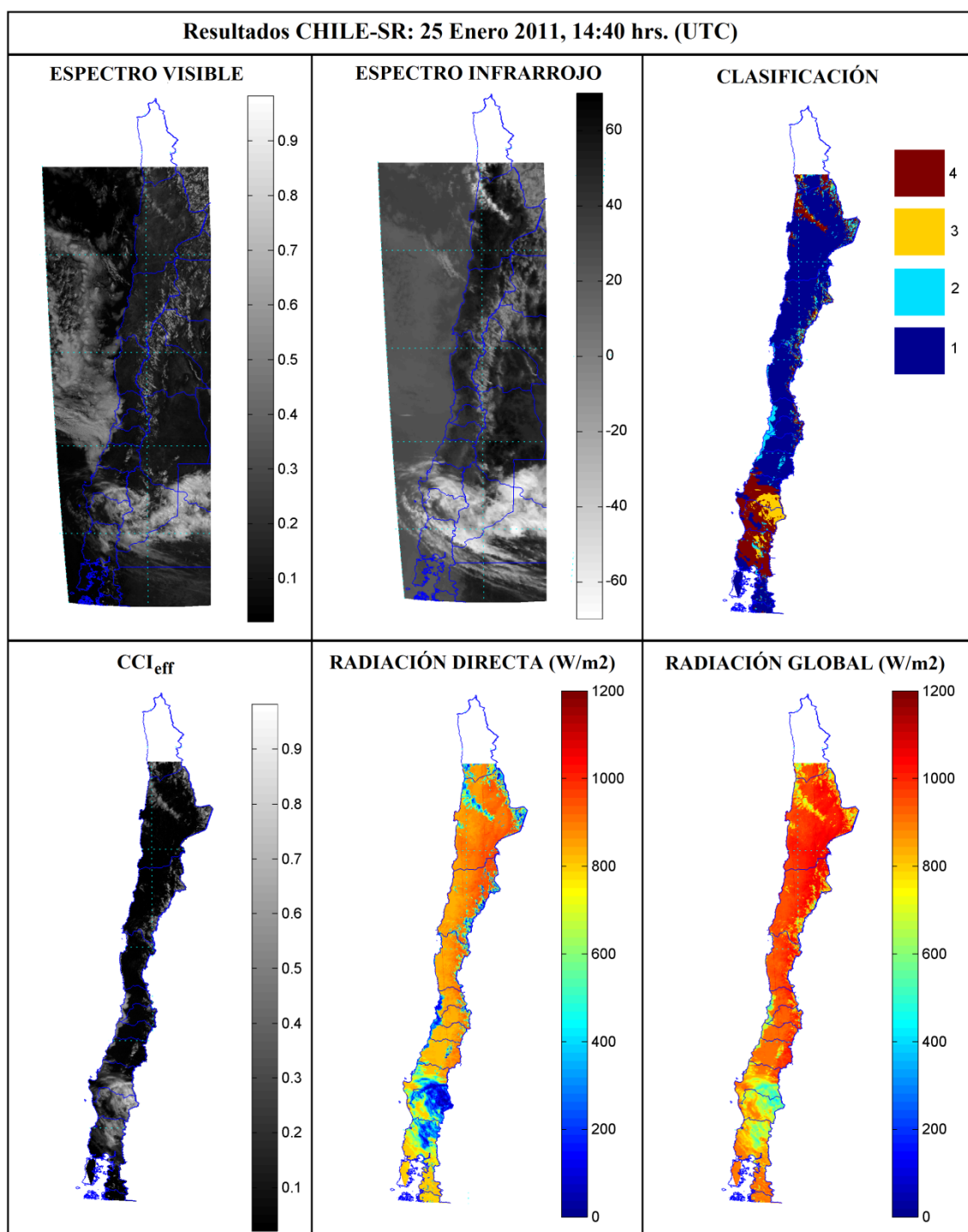


Figura B- 7: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 14:40 hrs. (UTC)

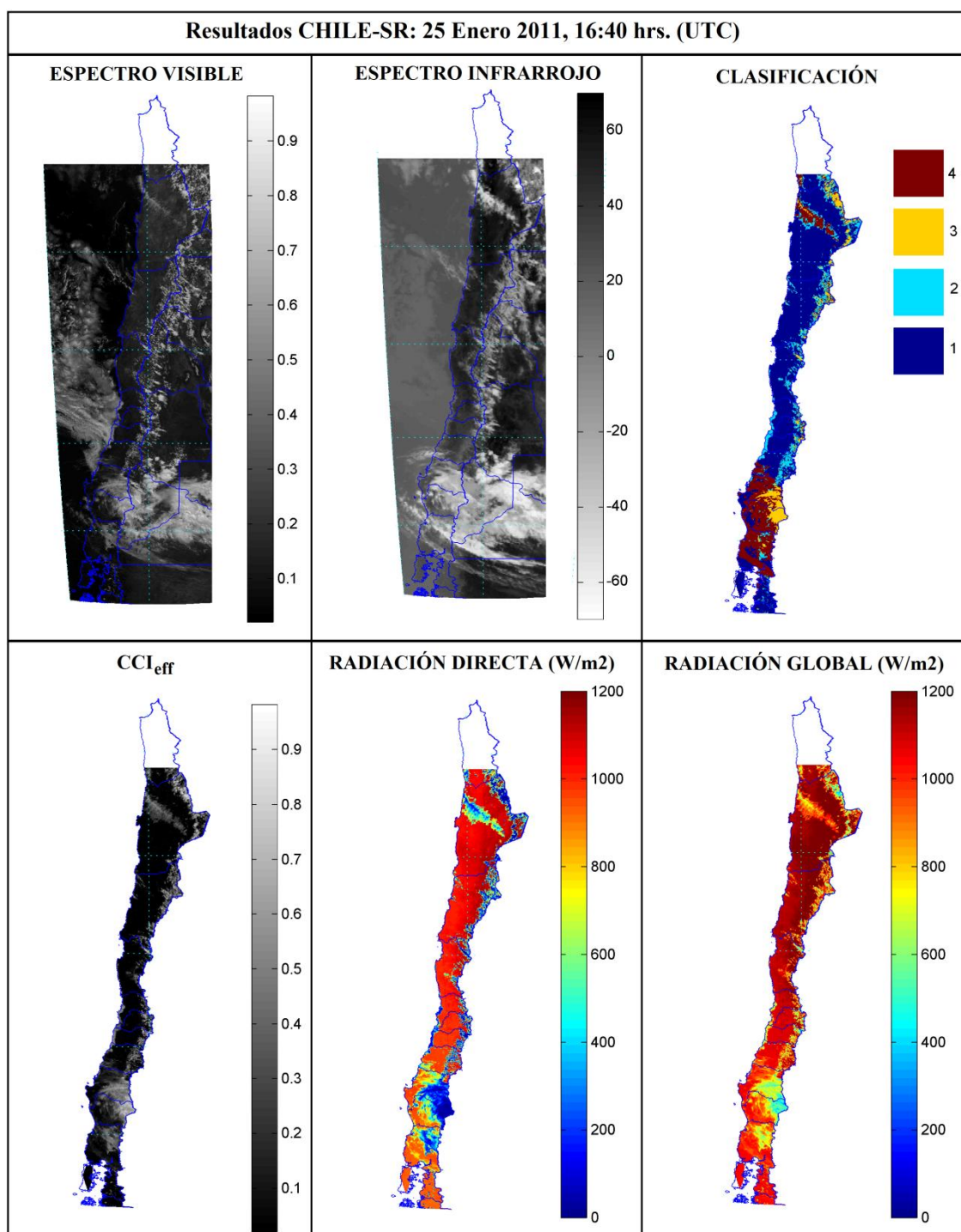


Figura B- 8: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 16:40 hrs. (UTC)

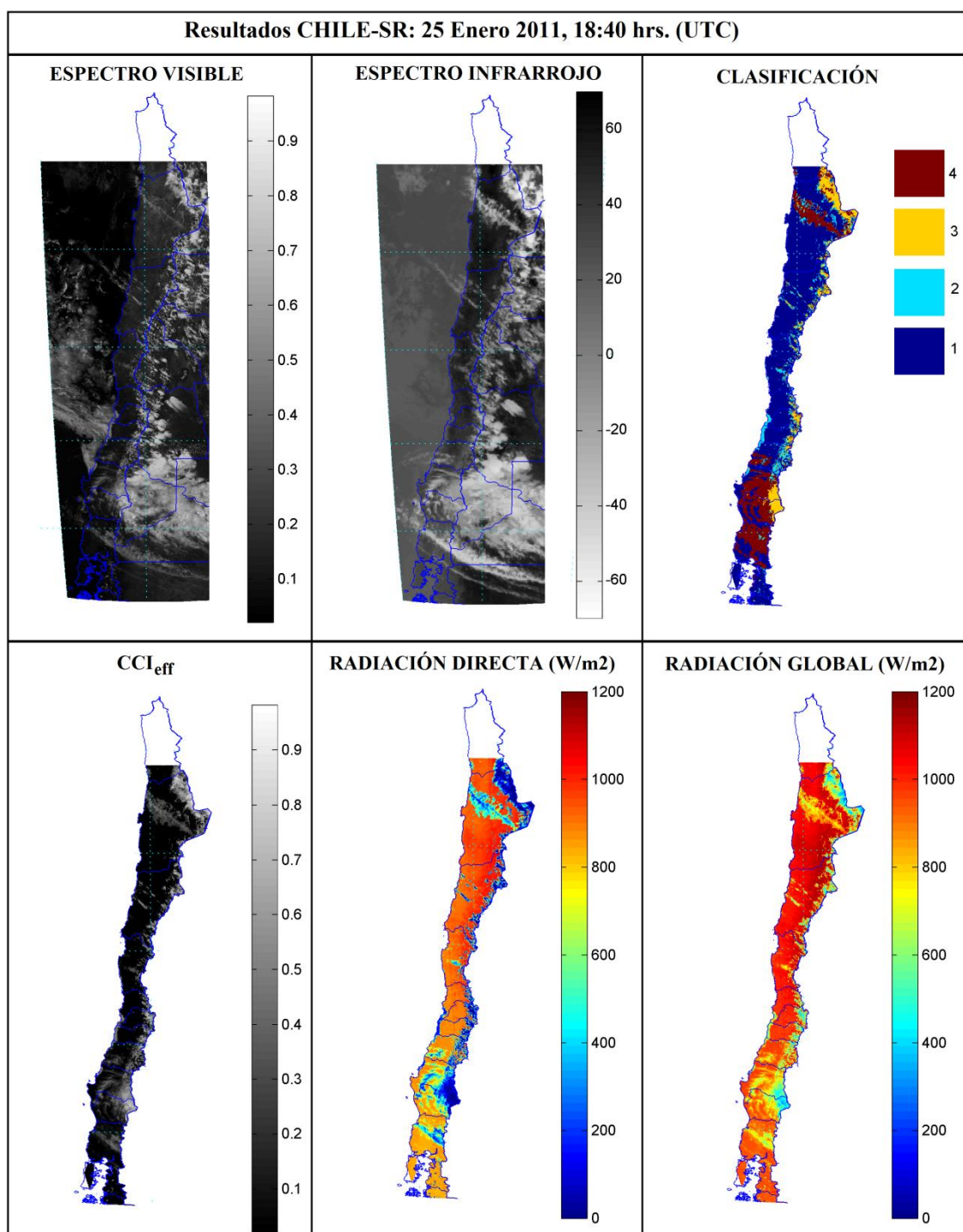


Figura B- 9: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 18:40 hrs. (UTC)

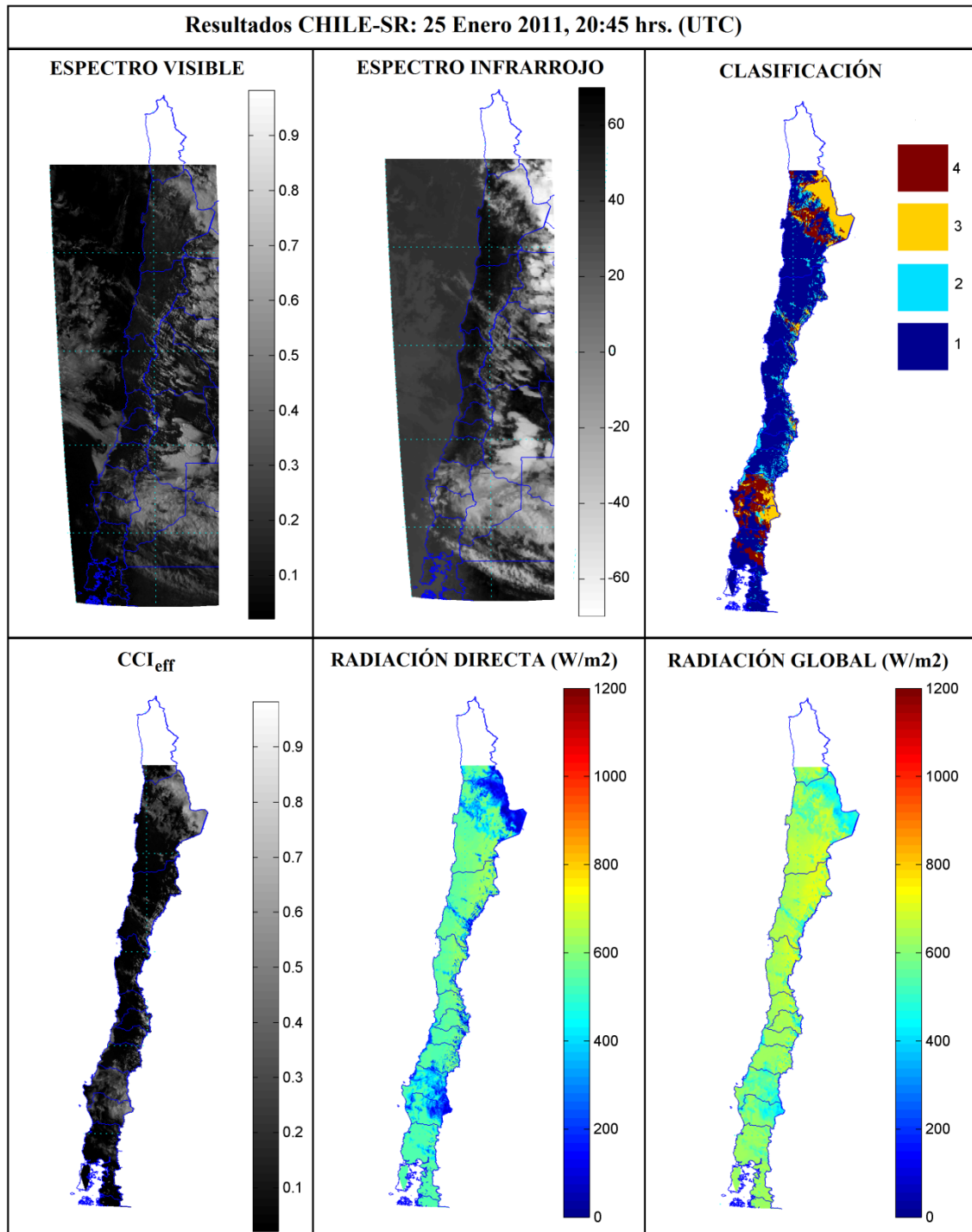


Figura B- 10: Resultados CHILE-SR. 25 Enero 2011, 20:45 hrs. (UTC)

ANEXO C: CÁLCULO DE DESVIACIONES CHILE-SR Y BRASIL-SR

Tabla C- 1: Irradiación Diaria de las Mediciones de la Estación Terrestre en Santiago y de las Estimaciones Realizadas por CHILE-SR y BRASIL-SR (Parte 1)

Año	Mes	Día	Estacion		CHILE-SR		BRASIL-SR	
			Global	DNI	Global	DNI	Global	DNI
			Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2
2011	1	1	8.869,22	9.467,51	9.512,01	9.006,57	9.276,7	8.374,73
2011	1	2	8.707,1	8.495,11	8.694,96	7.611,3	8.640,79	7.197,39
2011	1	3	8.794,53	8.832,09	9.394,96	8.537,1	9.424,44	8.438,39
2011	1	4	5.721,29	3.932,85	5.840,17	2.374,06	4.225,13	2.377,76
2011	1	5	9.024,47	10.503,77	8.970,87	8.300,34	9.484,4	8.556,58
2011	1	6	8.678,32	9.263,65	8.877,22	8.217,85	9.274,69	8.425,38
2011	1	7	8.783,97	9.022,75	9.318,5	8.458,96	9.202,19	8.146,86
2011	1	8	8.689,84	9.066,31	9.344,17	8.522,72	9.365,29	8.367,76
2011	1	9	8.344,91	8.068,71	9.180,4	8.265,89	9.037,23	7.855,03
2011	1	10	8.737,16	9.274,49	9.312,34	8.535,1	9.273,59	8.320,98
2011	1	11	8.740,7	9.487,76	9.330,1	8.568,79	9.308,75	8.114,17
2011	1	12	8.700,39	9.454,12	9.284,87	8.483,42	9.268,78	8.088,45
2011	1	14	8.606,31	9.456,	9.228,34	8.422,68	9.178,17	8.074,27
2011	1	15	8.760,35	9.925,99	9.266,82	8.480,06	9.199,69	8.053,58
2011	1	16	8.927,34	10.378,78	9.274,	8.487,83	9.116,57	8.018,76
2011	1	17	8.802,17	10.305,32	9.433,58	10.178,21	9.332,49	9.918,88
2011	1	18	8.794,54	9.862,73	9.163,5	8.407,1	9.160,46	8.071,92
2011	1	19	8.811,72	9.996,41	9.145,33	8.398,9	9.115,19	8.007,69
2011	1	20	8.573,08	9.411,49	8.831,93	8.107,89	9.130,08	8.031,28
2011	1	21	8.561,31	9.386,82	8.421,43	7.683,44	9.106,8	7.984,1
2011	1	22	8.479,17	9.325,34	8.856,14	7.921,98	8.870,46	8.311,02
2011	1	23	8.463,76	8.631,98	8.907,14	7.931,94	8.926,61	7.816,13
2011	1	24	8.349,6	8.643,82	8.955,24	8.184,95	8.908,3	7.815,09
2011	1	25	8.127,84	7.831,27	8.835,78	8.171,45	8.672,	7.860,58
2011	2	13	8.123,6	9.892,11	8.483,62	7.377,25	8.427,5	7.363,82
2011	2	14	7.965,59	9.810,95	7.838,92	6.810,49	8.381,38	7.327,29
2011	2	15	7.553,29	8.063,47	8.308,88	7.581,84	8.161,4	7.553,63
2011	2	16	6.205,9	4.004,77	7.702,27	5.902,83	6.787,73	4.928,99
2011	2	17	7.880,83	9.309,24	8.288,04	7.217,44	8.262,87	7.190,39

Tabla C- 2: Irradiación Diaria de las Mediciones de la Estación Terrestre en Santiago y de las Estimaciones Realizadas por CHILE-SR y BRASIL-SR (Parte 2)

Año	Mes	Día	Estacion		CHILE-SR		BRASIL-SR	
			Global	DNI	Global	DNI	Global	DNI
			Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2
2011	2	18	7.695,81	9.024,07	7.785,47	6.826,67	8.164,12	7.216,28
2011	2	19	7.495,	8.215,03	8.129,35	7.124,96	7.990,44	7.069,51
2011	2	21	7.489,82	8.061,94	7.431,75	6.474,5	7.976,23	7.004,95
2011	2	22	7.405,23	8.212,36	7.810,92	6.753,31		
2011	2	23	7.283,51	7.760,58	7.558,66	6.570,24		
2011	2	24	7.331,46	7.975,93	7.959,71	7.773,85		
2011	2	25	7.315,66	8.118,77	7.575,54	6.571,77		
2011	3	1	7.040,	8.001,76	7.679,95	6.693,74	7.492,93	6.609,92
2011	3	2	6.898,14	7.647,9	7.462,14	5.930,98	7.403,64	6.541,98
2011	3	3	6.836,08	7.608,88	7.554,38	6.615,58	7.393,18	6.553,51
2011	3	4	6.053,48	5.435,44	6.436,77	5.013,87	6.348,35	4.861,83
2011	3	5	5.476,53	4.528,4	5.921,43	4.707,93	6.596,93	5.331,25
2011	3	6	5.730,56	4.280,56	5.895,91	4.532,09	6.578,03	5.120,16
2011	3	7	6.551,04	6.655,82	7.349,96	6.380,12	7.166,59	6.300,7
2011	3	10	6.304,76	6.444,97	6.745,49	5.842,46	6.999,93	6.137,53
2011	3	13	6.689,97	8.326,34	6.692,15	5.817,12	6.919,81	6.069,85
2011	3	16	6.088,79	6.932,98	6.910,1	5.940,45	6.816,79	5.927,59
2011	3	17	6.274,47	7.517,62	6.521,55	5.579,22	6.739,11	5.849,83
2011	3	18	6.180,97	7.434,53	6.835,8	5.904,57	6.796,4	5.878,6
2011	3	19	6.146,25	7.293,	6.734,46	5.803,78	6.647,42	5.770,91
2011	3	20	6.021,73	6.958,9	6.704,95	5.803,9	6.587,72	5.782,96
2011	3	21	5.811,94	6.467,87	6.643,18	5.744,23	6.599,5	5.743,18
2011	3	22	5.895,46	6.825,75	6.309,39	5.194,36	6.378,75	5.869,07
2011	3	23	6.064,78	7.609,48	5.900,83	4.778,49	6.413,04	5.683,43
2011	3	24	5.971,51	7.772,26	6.475,93	5.560,75	6.415,07	5.538,63
2011	3	25	5.770,98	6.641,54	5.939,21	5.079,36	6.285,78	5.385,29
2011	3	26	5.985,99	8.116,84	6.126,94	5.070,58	6.212,2	5.795,87
2011	3	27	4.800,	4.735,57	5.728,39	4.349,36	5.150,54	3.846,05

**Tabla C- 3: Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación CHILE-SR en Base Horaria para
Día: 4 Enero 2011**

4 ENERO 2011: Radiación en Base Horaria											
Estacion		CHILE-SR		Radiación Global				Radiación Directa Normal			
Global	DNI	Global	DNI	MBE	rMBE	rRMSE	Fact	MBE	rMBE	rRMSE	Fact
W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	%	%	Corr	W/m2	%	%	Corr
,99	,	3,14	,	-2,15	-216,7%	469,7%	,32	,	0,0%	0,0%	,
9,43	,	29,86	,	-20,43	-216,7%	469,7%	,32	,	0,0%	0,0%	,
52,6	,	166,59	,	-113,99	-216,7%	469,7%	,32	,	0,0%	0,0%	,
134,28	,	425,3	150,2	-291,02	-216,7%	469,7%	,32	-150,2	0,0%	0,0%	,
142,98	,	161,61	36,13	-18,63	-13,0%	1,7%	,88	-36,13	0,0%	0,0%	,
494,47	210,09	581,12	131,78	-86,65	-17,5%	3,1%	,85	78,31	37,3%	13,9%	1,59
1.033,21	755,57	862,16	193,09	171,05	16,6%	2,7%	1,2	562,47	74,4%	55,4%	3,91
768,57	415,68	641,33	106,23	127,24	16,6%	2,7%	1,2	309,45	74,4%	55,4%	3,91
811,31	486,21	505,06	360,64	306,25	37,7%	14,2%	1,61	125,57	25,8%	6,7%	1,35
457,07	168,12	599,2	117,9	-142,13	-31,1%	9,7%	,76	50,22	29,9%	8,9%	1,43
569,9	284,8	764,2	579,47	-194,3	-34,1%	11,6%	,75	-294,67	-103,5%	107,0%	,49
457,6	277,89	589,8	386,96	-132,2	-28,9%	8,3%	,78	-109,06	-39,2%	15,4%	,72
493,14	562,21	319,3	131,3	173,84	35,3%	12,4%	1,54	430,91	76,6%	58,7%	4,28
239,45	539,55	155,04	126,01	84,41	35,3%	12,4%	1,54	413,54	76,6%	58,7%	4,28
56,3	232,72	36,45	54,35	19,85	35,3%	12,4%	1,54	178,37	76,6%	58,7%	4,28
				-7,92	-54,3%	114,6%	,93	103,92	21,9%	54,1%	1,75

**Tabla C- 4: Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación BRASIL-SR en Base Horaria para
Día: 4 Enero 2011**

4 ENERO 2011: Radiación en Base Horaria											
Estacion		BRASIL-SR		Radiación Global				Radiación Directa Normal			
Global	DNI	Global	DNI	MBE	rMBE	rRMSE	Fact	MBE	rMBE	rRMSE	Fact
W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	%	%	Corr	W/m2	%	%	Corr
,99	,	4,57	,	-3,57	-360,8%	1301,5%	,22	,	0,0%	0,0%	,
9,43	,	43,44	,	-34,01	-360,8%	1301,5%	,22	,	0,0%	0,0%	,
52,6	,	242,34	,	-189,74	-360,8%	1301,5%	,22	,	0,0%	0,0%	,
134,28	,	618,7	524,	-484,42	-360,8%	1301,5%	,22	-524,	0,0%	0,0%	,
142,98	,	55,66	,	87,32	61,1%	37,3%	2,57	,	0,0%	0,0%	,
494,47	210,09	217,36	15,03	277,12	56,0%	31,4%	2,27	195,06	92,8%	86,2%	13,98
1.033,21	755,57	454,17	54,07	579,04	56,0%	31,4%	2,27	701,5	92,8%	86,2%	13,98
768,57	415,68	96,3	,	672,27	87,5%	76,5%	7,98	415,68	100,0%	100,0%	,
811,31	486,21	328,45	120,91	482,86	59,5%	35,4%	2,47	365,3	75,1%	56,4%	4,02
457,07	168,12	83,1	,	373,97	81,8%	66,9%	5,5	168,12	100,0%	100,0%	,
569,9	284,8	917,6	810,97	-347,7	-61,0%	37,2%	,62	-526,17	-184,7%	341,3%	,35
457,6	277,89	334,02	209,44	123,58	27,0%	7,3%	1,37	68,45	24,6%	6,1%	1,33
493,14	562,21	441,4	361,8	51,74	10,5%	1,1%	1,12	200,41	35,6%	12,7%	1,55
239,45	539,55	285,83	219,93	-46,39	-19,4%	3,8%	,84	319,62	59,2%	35,1%	2,45
56,3	232,72	102,2	61,6	-45,9	-81,5%	66,5%	,55	171,12	73,5%	54,1%	3,78
				99,74	-77,7%	193,2%	1,9	103,67	31,3%	76,5%	2,76

**Tabla C- 5: : Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación CHILE-SR en Base Horaria para
Día: 7 Enero 2011**

7 ENERO 2011: Radiación en Base Horaria											
Estacion		CHILE-SR		Radiación Global				Radiación Directa Normal			
Global	DNI	Global	DNI	MBE	rMBE	rRMSE	Fact	MBE	rMBE	rRMSE	Fact
W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	%	%	Corr	W/m2	%	%	Corr
4,72	,	5,47	,	-,75	-16,0%	2,5%	,86	,	0,0%	0,0%	,
69,24	100,08	80,28	86,11	-11,05	-16,0%	2,5%	,86	13,97	14,0%	1,9%	1,16
301,03	393,33	349,07	338,43	-48,03	-16,0%	2,5%	,86	54,9	14,0%	1,9%	1,16
519,25	607,03	602,1	522,3	-82,85	-16,0%	2,5%	,86	84,73	14,0%	1,9%	1,16
708,21	674,34	742,17	654,37	-33,96	-4,8%	0,2%	,95	19,97	3,0%	0,1%	1,03
864,9	734,45	934,83	843,11	-69,93	-8,1%	0,7%	,93	-108,67	-14,8%	2,2%	,87
991,06	824,88	1.061,69	957,81	-70,62	-7,1%	0,5%	,93	-132,93	-16,1%	2,6%	,86
1.037,91	866,13	1.111,87	1.005,7	-73,96	-7,1%	0,5%	,93	-139,57	-16,1%	2,6%	,86
1.032,32	881,27	1.103,23	997,14	-70,92	-6,9%	0,5%	,94	-115,87	-13,1%	1,7%	,88
977,31	887,81	1.009,2	903,1	-31,89	-3,3%	0,1%	,97	-15,29	-1,7%	0,0%	,98
853,65	861,31	905,2	812,37	-51,55	-6,0%	0,4%	,94	48,94	5,7%	0,3%	1,06
680,61	796,44	703,38	611,45	-22,77	-3,3%	0,1%	,97	184,99	23,2%	5,4%	1,3
461,86	698,17	440,9	363,7	20,96	4,5%	0,2%	1,05	334,47	47,9%	23,0%	1,92
232,65	524,23	222,09	273,09	10,56	4,5%	0,2%	1,05	251,14	47,9%	23,0%	1,92
49,26	173,29	47,03	90,27	2,24	4,5%	0,2%	1,05	83,02	47,9%	23,0%	1,92
				-35,64	-6,5%	9,6%	,94	37,59	10,4%	24,4%	1,14

**Tabla C- 6: Mediciones Estación y Estimaciones de Radiación BRASIL-SR en Base Horaria para
Día: 7 Enero 2011**

7 ENERO 2011: Radiación en Base Horaria											
Estacion		BRASIL-SR		Radiación Global				Radiación Directa Normal			
Global	DNI	Global	DNI	MBE	rMBE	rRMSE	Fact	MBE	rMBE	rRMSE	Fact
W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	W/m2	%	%	Corr	W/m2	%	%	Corr
4,72	,	5,55	,	-,84	-17,7%	3,1%	,85	,	0,0%	0,0%	,
69,24	100,08	81,51	85,25	-12,27	-17,7%	3,1%	,85	14,83	14,8%	2,2%	1,17
301,03	393,33	354,4	335,06	-53,37	-17,7%	3,1%	,85	58,27	14,8%	2,2%	1,17
519,25	607,03	611,3	517,1	-92,05	-17,7%	3,1%	,85	89,93	14,8%	2,2%	1,17
708,21	674,34	711,63	635,17	-3,42	-0,5%	0,0%	1,	39,17	5,8%	0,3%	1,06
864,9	734,45	889,72	789,59	-24,82	-2,9%	0,1%	,97	-55,14	-7,5%	0,6%	,93
991,06	824,88	1.015,85	938,13	-24,79	-2,5%	0,1%	,98	-113,24	-13,7%	1,9%	,88
1.037,91	866,13	1.063,87	985,03	-25,96	-2,5%	0,1%	,98	-118,91	-13,7%	1,9%	,88
1.032,32	881,27	1.071,68	986,16	-39,36	-3,8%	0,1%	,96	-104,89	-11,9%	1,4%	,89
977,31	887,81	997,5	897,2	-20,19	-2,1%	0,0%	,98	-9,39	-1,1%	0,0%	,99
853,65	861,31	917,47	806,63	-63,82	-7,5%	0,6%	,93	54,67	6,3%	0,4%	1,07
680,61	796,44	652,01	534,68	28,6	4,2%	0,2%	1,04	261,77	32,9%	10,8%	1,49
461,86	698,17	441,6	359,	20,26	4,4%	0,2%	1,05	339,17	48,6%	23,6%	1,94
232,65	524,23	285,9	217,67	-53,25	-22,9%	5,2%	,81	306,57	58,5%	34,2%	2,41
49,26	173,29	102,2	60,2	-52,94	-107,5%	115,5%	,48	113,09	65,3%	42,6%	2,88
				-27,88	-14,3%	30,0%	,91	58,39	14,3%	28,8%	1,26

