



**REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

**DINÁMICA DE LA COBERTURA NIVAL
ENTRE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS
COPIAPÓ Y PETROHUE UTILIZANDO
IMÁGENES SATELITALES**

REALIZADO POR:

**GEOGRAFÍA UC – PROYECTOS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE**

S.I.T. N° 169

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2008

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Jefe Departamento Unidad de Glaciología y Nieves
Geógrafo Sr. Gonzalo Barcaza S.

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Fernando Escobar C.

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA**

Jefe de Proyecto
Geógrafo Sr. Pablo Osses M.

Profesionales:
Ingeniero Electrónico Sr. Martín Farias S.
Geógrafo Sr. Felipe Herrera U.
Geógrafo Srta. Carmen Miranda C.



TABLA DE CONTENIDOS GENERAL

1. Presentación	7
2. Resumen	9
3. Introducción	11
4. Objetivos	13
5. Metodología	14
5.1 Recopilación y selección de imágenes satelitales MODIS	15
5.2 Preparación y procesamiento de imágenes satelitales	15
5.3 Cuantificación de variables topográficas	18
6. Desarrollo	21
6.1 Selección de imágenes satelitales	21
6.2 Comparación de cobertura nival entre imágenes Landsat y MODIS	22
6.3 Síntesis	23
6.3.1 General	24
6.3.2 Zona Norte	25
6.3.3 Zona Centro	33
6.3.4 Zona Sur	41
7. Conclusiones	44
8. Bibliografía	46
9. ANEXOS	48



TABLA DE CONTENIDOS ESPECÍFICOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de pasos metodológicos: recopilación y selección, preparación, procesamiento y cuantificación de variables topográficas de imágenes satelitales MODIS/Terra	14
Figura 2. Ejemplo de multiplicación de mascara de un ángulo mayor a 45° del cenit del sensor por la banda 2	15
Figura 3. Aplicación del NDSI más otros criterios para discriminar nieve. Ejemplo: cuenca del río Petrohué	16
Figura 5. Delimitación de subcuencas.....	19
Figura 6. Cuenca del río Maule delimitada por la divisoria de aguas y utilizando un umbral de altitud mínima de 400 msnm.	19
Figura 7. Mapa de rangos de exposición de cada rango de altitud sobre los 400 msnm con valores codificados de la cuenca del río Maule.....	20
Figura 8. Mapa de valores de pendiente sobre los 400 m s.n.m. de la cuenca del río Maule....	20
Figura 9. Mapa de exposición de cada rango de elevación con valores codificados de la superficie cubierta por nieve.....	20
Figura 10. Mapa del valor promedio de la pendiente por rango de exposición de cada rango de altitud, de la superficie cubierta por nieve.....	20
Figura 11. Número de veces que se trabajó cada cuenca para los siete años hidrológicos	21
Figura 12. Superficie de cobertura nival promedio mensual entre los años 2000 y 2007.....	25
Figura 13. Variación de superficie de cobertura nival para el período 2000 al 2007 en la Zona Norte (cuencas de los ríos Copiapó al río Ligua).....	26
Figura 14. Mapa de mínimo y máximo de cobertura nival en la Zona Norte	28
Figura 15. Variaciones porcentuales (a) y de superficie (km ²) (b), del promedio mensual de la cobertura nival por rangos de altitud para el periodo 2000 al 2007 en la Zona Norte	30



Figura 16. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de Julio en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Norte.....	31
Figura 17. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de Noviembre en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Norte	32
Figura 18. Variación de superficie de cobertura nival para el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro (cuencas de los ríos Aconcagua al río Itata)	33
Figura 19. Mapa de mínimo y máximo de cobertura nival en la Zona Centro.....	35
Figura 20. Variaciones porcentuales (a) y de superficie (km ²) (b) de promedio mensual de la cobertura nival por rangos de altitud para el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro	38
Figura 21. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de julio en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro	39
Figura 22. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de noviembre en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro.....	40
Figura 23. Mapa de mínimo y máximo de cobertura nival en la Zona Sur.....	43
Figura 24. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Copiapó	49
Figura 25. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y enero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Copiapó	50
Figura 26. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Huasco.....	51
Figura 27. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Huasco	52
Figura 28. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Elqui	53



Figura 29. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Elqui	54
Figura 30. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Limarí.....	55
Figura 31. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Limarí.....	56
Figura 32. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Choapa.....	57
Figura 33. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Choapa.....	58
Figura 34. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Petorca.....	59
Figura 35. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Petorca.....	60
Figura 36. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Ligua	61
Figura 37. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Ligua	62
Figura 38. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Aconcagua.....	63



Figura 39. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Aconcagua.....	64
Figura 40. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maipo	65
Figura 41. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maipo.....	66
Figura 42. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Rapel	67
Figura 43. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Rapel.....	68
Figura 44. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Mataquito	69
Figura 45. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Mataquito	70
Figura 46. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maule.....	71
Figura 47. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maule.....	72
Figura 48. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Itata.....	73



Figura 49. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Itata.....	74
Figura 50. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Biobío.....	75
Figura 51. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Imperial	76
Figura 52. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Toltén	77
Figura 53. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Valdivia	78
Figura 54. Variación de superficie de cobertura nival (a) y superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Bueno	79
Figura 55. Variación de superficie de cobertura nival (a) y superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Petrohué	80



1. PRESENTACIÓN

Gran parte de Chile depende de los glaciares y de la nieve para el suministro de agua, teniendo mayor relevancia en las regiones que presentan menores precipitaciones. Por otro lado, el país está experimentando un aumento en la presión sobre los recursos hídricos y una mayor competencia, porque existe una creciente industrialización, aumento de la agricultura intensiva, necesidades de la minería y crecimiento de la población.

La cobertura nival es reconocida como una importante variable hidrológica en la predicción de escorrentía durante la estación de deshielo, siendo también muy relevante el tiempo que perdura durante la estación seca, porque de eso depende el inicio del régimen glacial en los caudales (Pellicciotti et al., 2007). Cabe destacar que la precipitación en forma de nieve y su permanencia es la principal entrada de masa para el sistema glaciar (Benn y Evans, 1998). Además del rol hidrológico, la cobertura nival afecta fuertemente en el clima local y global (Hall *et al.*, 1995), como también en procesos ecológicos (Bales et al., 2006), erosión de laderas y química del agua (Erickson y Williams, 2005).

La Dirección General de Aguas (DGA) realiza pronósticos de deshielos en base a muestras puntuales de rutas de nieve (equivalente en agua) y estimación de la línea de nieve a través de observaciones visuales. No obstante, se desconoce la dinámica temporal y espacial de la cobertura nival, la que puede ser un complemento para dichos pronósticos.

La variabilidad climática de las últimas décadas ha tenido implicancia en el retroceso de la mayoría de los glaciares del país, entre ellos los de los Andes Centrales (Bown *et al.*, 2008; Bown *et al.*, 2007; Rivera et al., 2001; Rivera et al., 2000), siendo un motivo para que la DGA estructurara como línea de acción la Unidad de Glaciología y Nieves, con el objetivo de analizar el comportamiento de las masas de hielo. Estas son grandes reservorios de agua dulce que proveen el consumo durante el deshielo estival. Los glaciares se alimentan por la precipitación de nieve y se mantienen aislados de las condiciones atmosféricas por el manto nival, siendo un motivo importante para conocer su distribución espacial y temporal (Benn y Evans, 1998).



La Unidad de Glaciología y Nieves requiere de un estudio de la dinámica de la cobertura nival para la mayor parte del territorio nacional en que la nieve tenga un rol hidrológico importante, motivo por el que solicita una base de datos que tenga la mayor resolución temporal y espacial del manto de nieve, además de cuantificar su distribución por factores topográficos. El área de trabajo corresponde a las 19 grandes cuencas entre los ríos Copiapó y Petrohue, lo que permitirá contar con un conocimiento cuantificado, tanto de la distribución espacial (altitudinal y latitudinal) como temporal (estacional e interanual).



2. RESUMEN

En este informe se presenta la dinámica de la cobertura nival entre las cuencas de los ríos Copiapó y Petrohue, para siete años hidrológicos, desde el 1 de abril del año 2000 hasta el 31 de marzo del año 2007. La teledetección de la cobertura nival se realizó con el sensor MODIS, trabajando a una resolución de 500 m y distintas bandas espectrales que permitieran diferenciar entre presencia de nieve, nubes y espejos de agua. La relación de la nieve con variables topográficas se realizó mediante el modelo digital de elevación (DEM) Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de una resolución de 90 m, lo que permitió con un posterior análisis estadístico descriptivo, cuantificar nieve por rangos de altitud y exposición.

La selección de imágenes consistió en eliminar todas aquellas con fallas de origen, cubiertas por nubes, pixeles deformado por el ángulo cenital y posterior a nevadas recientes. De eso modo, se pudo obtener datos de cobertura nival un promedio de 17,9 veces entre las cuencas de los ríos Copiapó e Itata, mientras que del Biobio al sur baja considerablemente, debido principalmente a la constante presencia de nubes.

Las 19 cuencas trabajadas fueron zonificadas como zonas norte, centro y sur, según el comportamiento de sus curvas de aumento y disminución de cobertura nival a lo largo del año hidrológico. En este sentido latitudinal, resulta que hacia el norte la estación de deshielo tiene menor duración, alcanzado el mínimo de superficie de nieve en el mes de octubre para la cuenca del río Copiapó, mientras que a partir de la cuenca del río Aconcagua hacia el sur, se produce en el mes de febrero. A la vez, existe una gran variación interanual en todas las cuencas, aunque de mayor magnitud en el norte, donde simplemente casi no se produce deshielos importantes en años secos, perdurando la nieve por pocos días.

En toda la zona de estudio el mes de máxima cobertura nival es julio. Para este mes, en el norte existe un 50 % cubierto de nieve a partir de los 3.400 msnm, lo que se incrementa a mayor altitud. Entre septiembre y octubre, sobre dicha altitud la cobertura de nieve aún está sobre un 40%, pero se produce una disminución fuerte en octubre, sin sobrepasar el 20%.



Además, comienza el deshielo sobre los 5.000 msnm, donde existe presencia de glaciares descubiertos. En la zona centro durante los meses invernales suele haber presencia de nieve desde el rango entre los 1.000 – 1.500 msnm, existiendo sobre un 90 % arriba de los 3.000 msnm. A esa altitud, disminuye a un 70 % en noviembre, mientras que en diciembre se produce el cambio fuerte, bajando a un 40 %. En las cuencas de la zona sur hasta septiembre las curvas de aumento y disminución de cobertura nival son casi iguales, y a partir de octubre hasta marzo el deshielo es constante, sin cambios fuertes durante el periodo, presentando una conducta lineal en todos los rangos de altitud.

Durante los meses de máxima cobertura nival las diferencias entre exposiciones son bajas y se acrecienta durante los meses de deshielo, concentrándose en las vertientes de carácter sur. La velocidad en que se dan las diferencias de distribución es más alta en la zona norte y a altitudes bajas, o sea donde el espesor de nieve debe ser menor. En cuencas con cordones transversales como la de los ríos Elqui y Choapa se produce una excepción, permaneciendo mayor tiempo la nieve en la exposición oeste.



3. INTRODUCCIÓN

En Chile se han realizado estudios de cobertura nival en Campos de Hielo Norte en el periodo 2000 – 2006 usando imágenes MODIS (Lopez et al., 2008) y para América del Sur con satélites de microondas pasivas, tanto Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) como el Special Sensor Microwave Imagers (SSM/I), incluyendo los Andes Centrales de Chile entre mayo y septiembre, para el periodo 1979 y 2006 (Foster et al., 2009). Este último trabajo tiene la característica de haber trabajado toda el área de interés del presente estudio y un largo periodo de tiempo, sin embargo tiene el inconveniente que trabajan con pixeles muy grandes 60 x 40 km (18 GHz) y 69 x 43 km (19.4 GHz) en el caso de SMMR y 30 x 20 km (37GHz) y 37 x 29 km (37 GHz) en SSM/I.

El sensor MODIS tiene las características de tener una resolución temporal de 1-2 días, una resolución espacial de 500 m y 36 canales espectrales. Estos tres motivos lo convierten en el ideal para realizar un monitoreo de la cobertura nival en la actualidad. Si bien Landsat ETM+, ASTER y SPOT son adecuados para discriminar cobertura nival y tienen mejor resolución espacial que MODIS, son inadecuados tanto por su resolución temporal y espectral. El sensor es necesario que tenga una resolución casi diaria, debido a que no todos los días están despejados y en el caso particular de Chile, mientras más al sur existe mayor presencia de cobertura de nube, por lo que disminuye la disponibilidad de imágenes. Además, es necesario contar con distintas bandas espectrales que permitan discriminar distintos tipos de nubes y espejos de agua.

Podría suponerse que para conocer la cobertura nival de una determinada cuenca es necesario con conocer la altitud de la línea de nieve, esto con el fin de apoyar la predicción de caudales y saber si los glaciares estarían cubiertos por el manto de nieve. Sin embargo, para conocer correctamente la distribución espacial de la cobertura nival es necesario saber la hipsometría, las exposiciones predominantes y pendientes de cada cuenca. Por ejemplo, si una cuenca es predominantemente de exposición norte, lo más probable es que tenga menor superficie



cubierta por nieve que otra cuenca de similar hipsometría y de la misma latitud, por el hecho de tener mayor radiación solar.

El presente trabajo tiene como finalidad tener un conocimiento de la dinámica temporal, tanto estacional como interanual para cada cuenca. La metodología usada es la comúnmente aplicada en todas las publicaciones internacionales de revistas ISI, en las que se considera el algoritmo de Hall et al., (1998) como el apropiado para detectar nieve. Debido a las características de los Andes de Chile, se ejercita con distintos canales del infrarojo para detectar distintos tipos de nube que puedan afectar la determinación de nieve. La cuantificación de la nieve por rangos topográficos es con el modelo digital de elevación (DEM) Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), el cual es el más utilizado en todos los estudios de este tipo cuando se trabaja con MODIS.

Existe dificultad de mostrar la cantidad de datos generados para cada una de las 19 cuencas trabajadas, por lo que se agrupan en tres grandes zonas, las que presentan la misma forma de curva de aumento y disminución de cobertura nival. Entre las cuenca de los ríos Copiapó y Ligua se denomina Zona Norte, de los ríos Aconcagua al Itata, Zona Centro, y del Biobio al Rapel, Zona Sur. Se grafican los mínimos, máximos y promedios mensuales de cobertura nival, como también por rangos de altitud y exposición. Además de esta síntesis, se presentan los resultados detallados para cada cuenca de la manera explicada anteriormente y se muestran todos los datos brutos extraído de las imágenes. Finalmente, se concluye respecto a la selección de imágenes, variación latitudinal, altitudinal y por exposición del manto nival.



4. OBJETIVOS

Objetivo General

Conocer la variabilidad temporal e interanual de la cobertura nival en la zona comprendida entre las regiones de Atacama y de los Lagos, durante el período 2000 y 2007, utilizando imágenes MODIS.

Objetivos Específicos

Determinar la superficie de la cobertura nival a nivel semanal durante 7 años hidrológicos en base a diferentes bandas espectrales

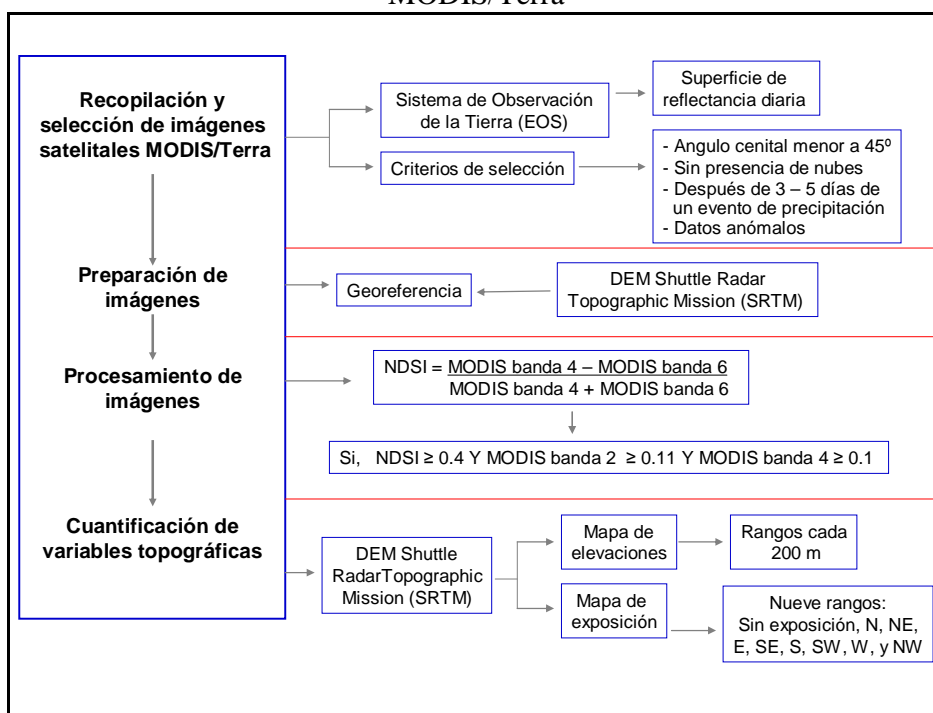
Determinar la superficie de cobertura nival por rangos de altitud, exposición y pendiente para cada cuenca.



5. METODOLOGÍA

La metodología está dividida en cuatro pasos metodológicos: recopilación y selección de imágenes satelitales, preparación de imágenes, procesamiento de imágenes y cuantificación de variables topográficas. Esto está descrito en el siguiente diagrama (Figura 1).

Figura 1. Diagrama de pasos metodológicos: recopilación y selección, preparación, procesamiento y cuantificación de variables topográficas de imágenes satelitales MODIS/Terra



Los datos generados fueron tratados en años hidrológicos, éste es a partir del 1 de abril de cada año (1^{er} día hidrológico) al 31 de marzo del año siguiente (día n° 365 del año hidrológico), debido a que es la forma en que se trabajan los caudales. Al exponerlo de ese modo, la secuencia es: fases de alimentación, deshielo y mínimo nival.



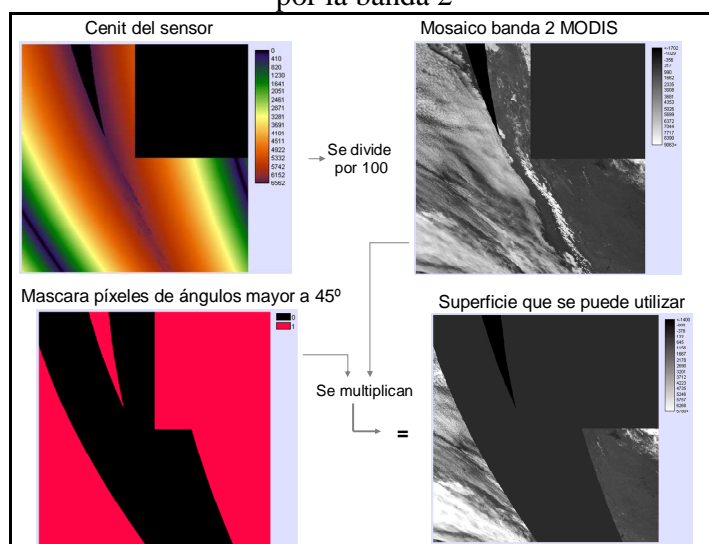
5.1 Recopilación y selección de imágenes satelitales MODIS

Como primera etapa, se recopilaron imágenes MODIS/Terra de reflectancia diaria con una resolución espacial de 500 m, a través del Sistema de Observación de la Tierra (EOS). Mediante un “quicklook”, se preseleccionaron las imágenes del día que no presentara cobertura de nube sobre la Cordillera de los Andes, y con las cuales se pudiera construir un mosaico que cubriera la mayor parte del área de estudio. Para llevar a cabo esto se revisó 2.557 imágenes de distintas fechas de la Zona Central para los siete años hidrológicos, y si estas se encontraban despejadas se revisaban las imágenes de las otras zonas del área de estudio para ver cuántas era conveniente adquirir.

5.2 Preparación y procesamiento de imágenes satelitales

Con las imágenes satelitales recopiladas se construyeron mosaicos para cada una de las bandas espectrales a trabajar y para la capa del ángulo cenital del sensor. Esta capa se utilizó para eliminar todas las zonas con un ángulo mayor a 45° , ya que se generan deformaciones en la geometría del píxel (**Figura 2**).

Figura 2. Ejemplo de multiplicación de máscara de un ángulo mayor a 45° del cenit del sensor por la banda 2

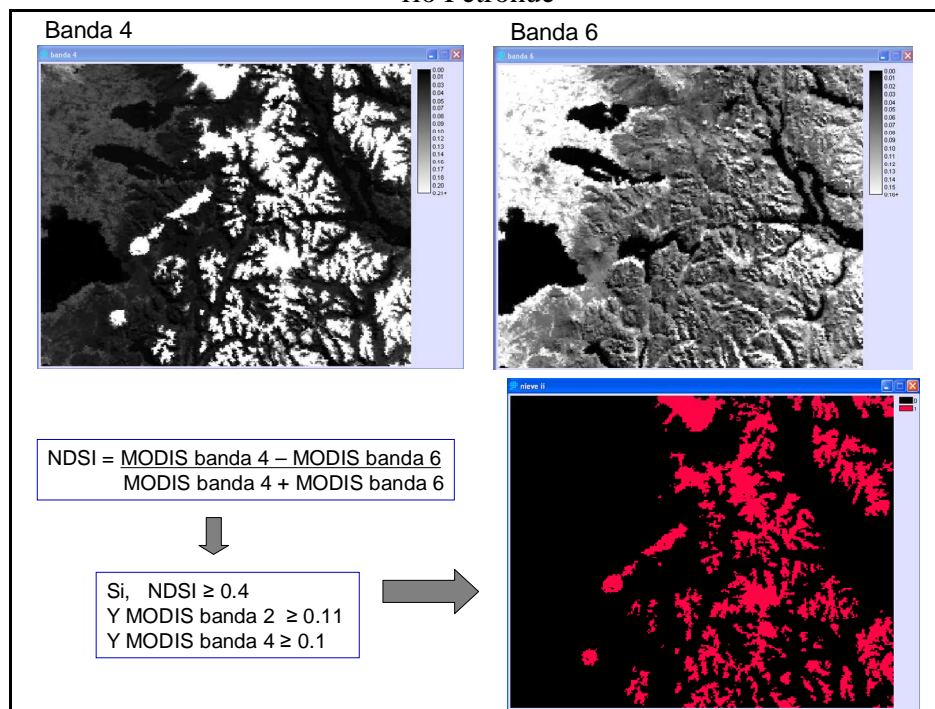




Teniendo ya los mosaicos seleccionados, se procedió a calcular el NDSI mediante el algoritmo: $(\text{NDSI}) = (\text{MODIS banda 4} - \text{MODIS banda 6}) / (\text{MODIS banda 4} + \text{MODIS banda 6})$. Se definió como nieve cuando el NDSI fuera $\geq 0,4$, sin embargo existen distorsiones como los espejos de agua, los que pueden ser tomados como nieve. Para evitar este problema se utilizó la banda 2, la que si es $\geq 0,11$ discrimina agua con nieve. Por otro lado, se consideró que si la banda 4 es $\geq 0,1$, es nieve, ya que de esta manera se eliminaron aquellas zonas muy oscuras de la imagen, cómo océano, algunos cuerpos de agua, sombras, etc. Por consiguiente, el algoritmo para determinar píxeles con presencia de nieve quedó determinado de la siguiente manera (**Figura 3**):

$$\text{NIEVE} = \text{SI} [\text{NDSI} \geq 0.4] \text{ Y } [\text{banda 2} \geq 0.11] \text{ Y } [\text{banda 4} \geq 0.1]$$

Figura 3. Aplicación del NDSI más otros criterios para discriminar nieve. Ejemplo: cuenca del río Petrohué

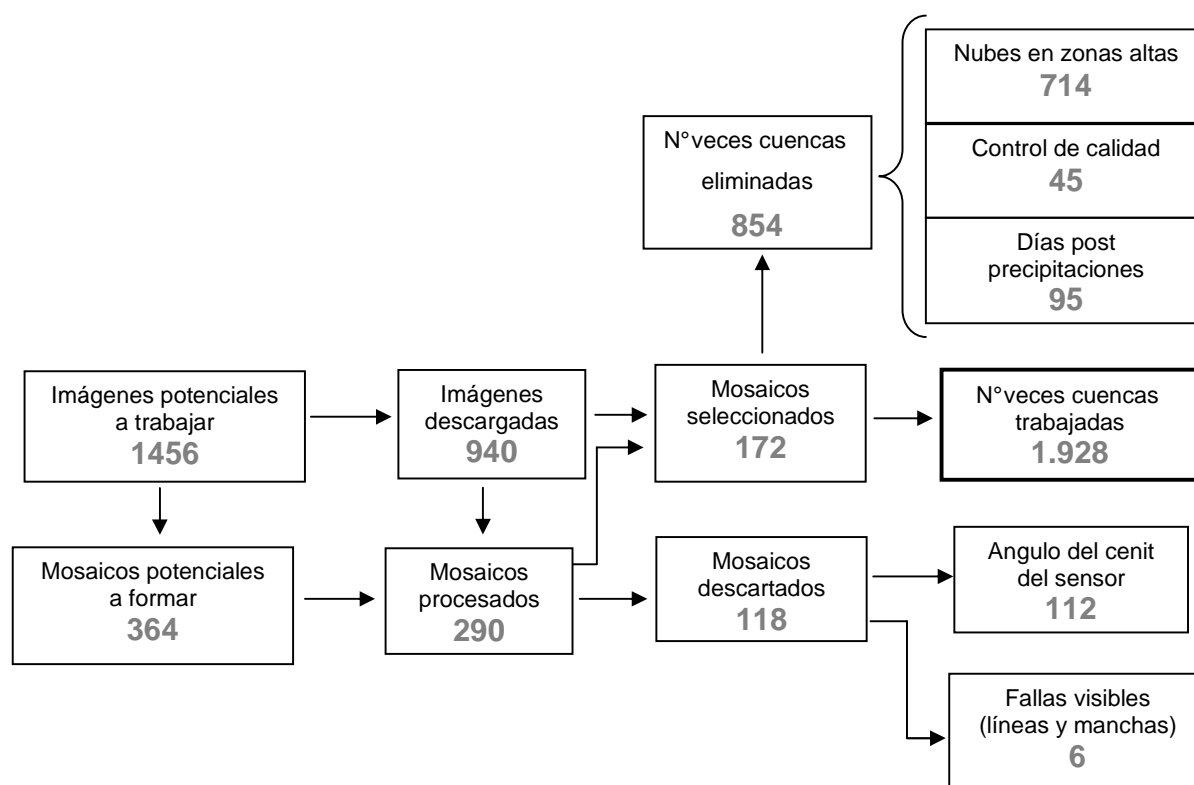




Posteriormente, se llevó a cabo la georreferenciación de las bandas 2, 7 y la cobertura de nieve para cada una de las 19 cuencas en base a la Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y datum WGS84 en el huso 19.

Finalmente se realizó una última revisión para eliminar imágenes con fallas visibles (de origen), cubiertas con nubes o que hayan perdido información por tener píxeles con un ángulo cenital del sensor mayor a 45°, especialmente en la parte alta de las cuencas. A continuación se muestra un esquema con las distintas etapas de selección realizadas, desde el total de imágenes obtenidas del servidor, hasta el total de imágenes óptimas desglosadas por cuencas, para los siete años hidrológicos (**Figura 4**).

Figura 4. Criterios de selección de imágenes satelitales MODIS Terra



Para los siete años hidrológicos se realizó un “quicklook” diario, lo que equivale a 2.557 vistas para la imagen central del mosaico del área de estudio. Si se encontraba despejada se realizaba



otro “quicklook” a la imagen del norte y del sur. En el caso teórico de que para todas las semanas hubiese existido un día completamente despejado para toda el área de estudio, se hubiera tenido que descargar un total de 1.456 imágenes, formando un total de 364 mosaicos potenciales.

Solamente por el hecho de presentar nubes al realizar el “quicklook”, se descargaron 940 de 1.456 imágenes, formando de esa manera 290 mosaicos para fechas distintas. De estos se descartaron 118 al aplicarle la capa de ángulos de cenit mayor a 45° , quedando 172 para poder trabajar, lo que equivale a 1.928 veces que se obtendrán datos de las cuencas.

De un universo de trabajar 3.268 veces las cuencas del área de estudio, se eliminan 854. De estas no sirven 714 al observar con una banda en el infrarrojo, la que debido a su alta reflectancia con la humedad permitió distinguir con facilidad si había nubes en la zona cordillerana, siendo especialmente útil en primavera y la época estival. Por otro lado se revisó si la imagen control de calidad tenía valores anómalos en cada cuenca, específicamente en la zona con cubierta nival, con lo que se descartaron otras 45 cuencas para todo el periodo de estudio. Finalmente se eliminaron 96 veces las cuencas por corresponder a tres días después de un evento de precipitación, debido a que esto puede mostrar valores engañosos, por el hecho que la cobertura nival puede variar muy rápido después de una nevada, si es que esta no fue de importancia.

5.3 Cuantificación de variables topográficas

Para conocer la distribución espacial de la cobertura nival según rangos de altitud, exposición y pendiente, se realizó un mapa para cada una de estas variables topográficas, a partir del modelo digital de elevación (DEM) Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de una resolución de 90 m. Debido a que las imágenes satelitales tienen una resolución de 500 m, el DEM debe tener el mismo tamaño de píxel, por lo que fue transformado mediante una georreferenciación con el método bilinear.



El mapa de altitud fue elaborado con rangos cada 200 metros, el de exposición en nueve rangos (sin exposición, NE, E, SE, S, SW, W, NW y N) y el de pendiente no fue reclasificado, ya que interesa su valor promedio como valor indicativo.

Las 19 cuencas a trabajar fueron delimitadas siguiendo la divisoria de aguas de todas las subcuencas de montaña mediante el modelo digital de elevación (DEM), las que fueron reclasificadas con el fin de delimitar las cuencas principales (**Figura 5**). Debido a que solo interesa tener información de las zonas que potencialmente puede precipitar nieve, se utilizó una altitud umbral de 400 m para toda el área de estudio (**Figura 6**).

Figura 5. Delimitación de subcuencas

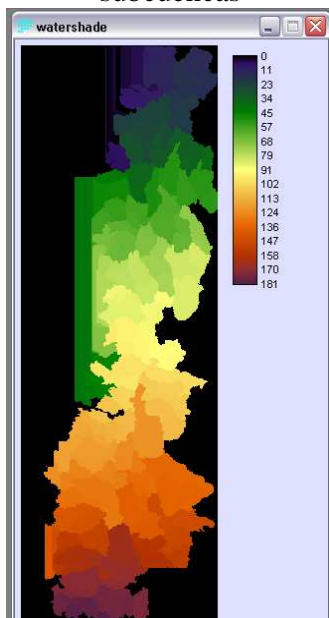
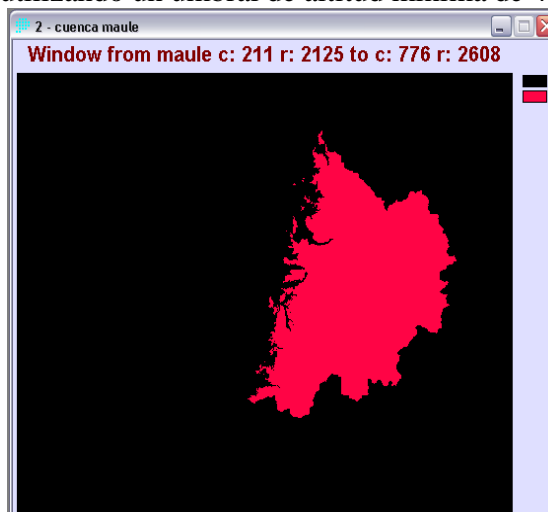


Figura 6. Cuenca del río Maule delimitada por la divisoria de aguas y utilizando un umbral de altitud mínima de 400 msnm.



Respecto a la relación de la nieve con la topografía, lo que interesa es lo siguiente (ver **Figura 7**, **Figura 8**, **Figura 9**, **Figura 10**):

La variación de la nieve con los rangos de altitud cada 200 m. Se calcularon las superficies de nieve parcial y porcentajes para cada rango de elevación.



La variación de la nieve por rango de exposición de cada rango de altitud. Se calculó en kilómetros cuadrados y porcentaje.

La variación del valor promedio de la pendiente de la nieve por rango de exposición de cada rango de altitud. Se compara con el valor promedio de la pendiente del rango topográfico, con el fin de indicar la importancia de esta variable.

Figura 7. Mapa de rangos de exposición de cada rango de altitud sobre los 400 msnm con valores codificados de la cuenca del río Maule

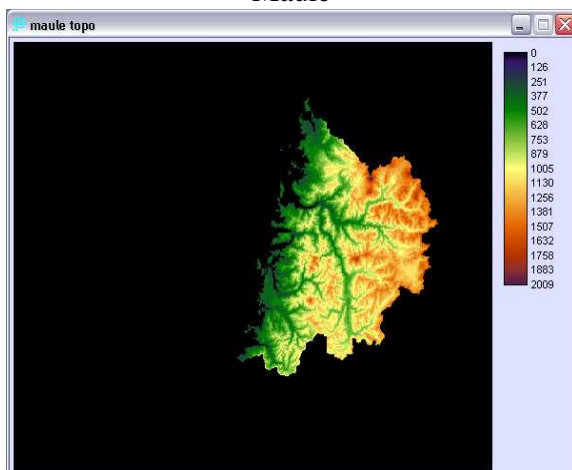


Figura 8. Mapa de valores de pendiente sobre los 400 m s.n.m. de la cuenca del río Maule

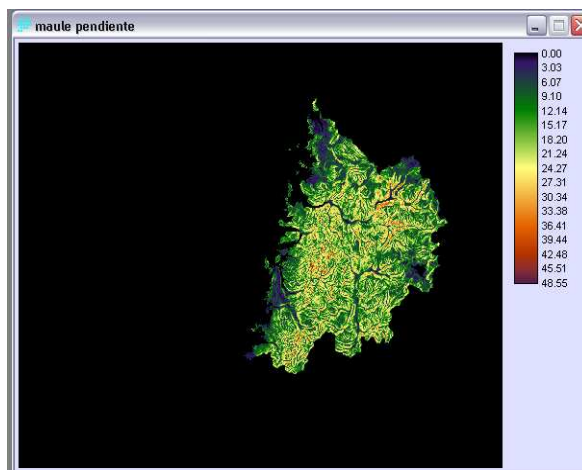


Figura 9. Mapa de exposición de cada rango de elevación con valores codificados de la superficie cubierta por nieve

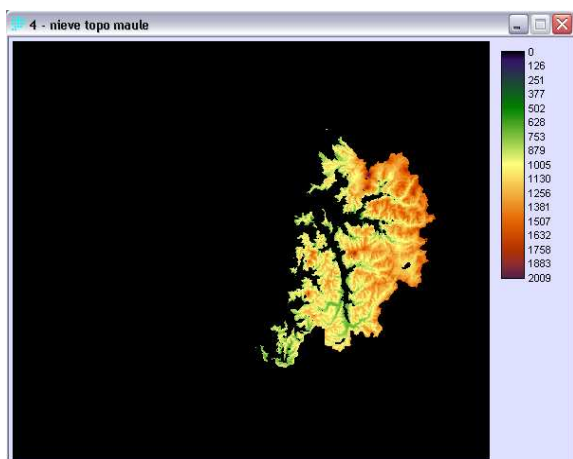
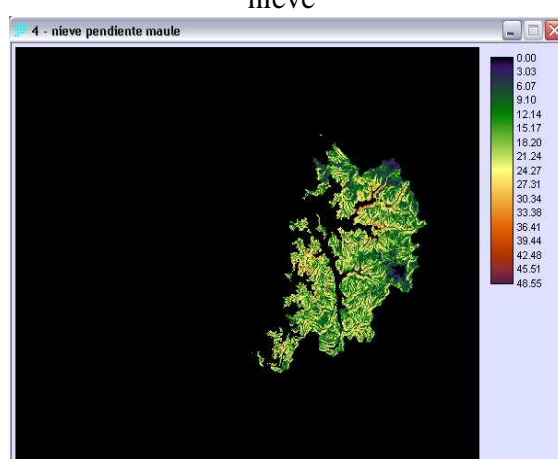


Figura 10. Mapa del valor promedio de la pendiente por rango de exposición de cada rango de altitud, de la superficie cubierta por nieve





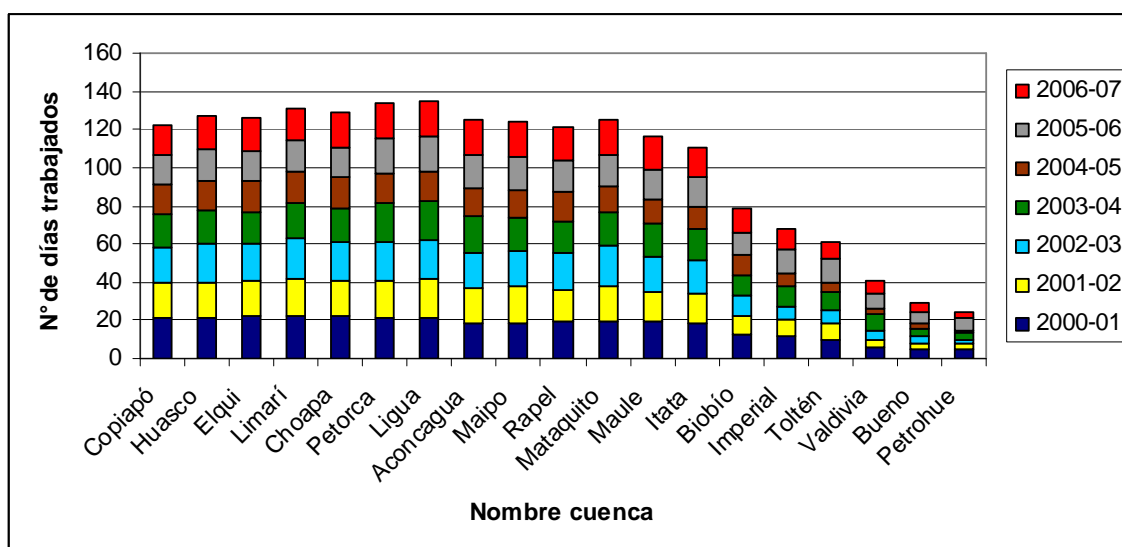
6. DESARROLLO

6.1 Selección de imágenes satelitales

Para el periodo entre el 1 de abril de 2000 al 31 de marzo de 2007, correspondiente a siete años hidrológicos, se obtuvo un total de 1.390 cuencas que contaron con los criterios de selección para ser procesadas y obtener así la superficie nival según rangos topográficos.

Entre las cuencas de los ríos Copiapó e Itata se pudo trabajar en cada cuenca un promedio total de 17,9 veces por año, mientras que desde la cuenca del río BíoBío hacia el sur hay permanentemente presencia de nubes, bajando considerablemente el número de imágenes adecuadas para trabajar (**Figura 11**).

Figura 11. Número de veces que se trabajó cada cuenca para los siete años hidrológicos



El producto de este proyecto consiste en una base de datos para cada uno de los siete años hidrológicos administrada en un archivo Excel. Cada archivo tiene 5 hojas:

Hoja 1: Superficie en kilómetros cuadrados de cobertura nival para cada cuenca, indicando el día hidrológico, día juliano y semana correspondiente.



Hoja 2: Nieve por rango de altitud para cada cuenca. Número de píxeles, superficies en kilómetros cuadrados y porcentaje de cobertura nival parcial.

Hoja 3: Nieve por rango de exposición y pendiente de esa exposición por cada rango de altitud. Número de píxeles, superficie en kilómetros cuadrados y porcentaje de cobertura nival de la exposición de cada rango de altitud y valor promedio de la pendiente de la superficie con nieve.

Hoja 4: Número de píxeles y superficie de cada rango altitudinal de cada cuenca.

Hoja 5: Número de píxeles y superficie de cada rango de exposición por rango altitudinal de cada cuenca. Además los valores promedios de pendiente de ese rango.

6.2 Comparación de cobertura nival entre imágenes Landsat y MODIS

Como se ha comentado anteriormente el resultado de cobertura nival obtenido por MODIS es de una resolución de 500 m, motivo por el que es conveniente realizar una comparación con imágenes de mayor resolución espacial. Se sigue la recomendación de los estudios de Hall et al., (1998) y Hall et al., (2000) que testea la exactitud el NDSI de MODIS con Landsat.

Se seleccionaron dos muestras de una fecha y sector aleatorio del área de estudio que abarcara un área de 3.600 km². La primera muestra corresponde a los ríos Colorado y Mapocho, mientras que la segunda al Limarí. En la primera se obtuvo una cobertura nival de 2.600,30 km² con Landsat y 2.664,25 km² con MODIS. En la segunda 1.664,90 km² y 1.705,25 km² con los mismos sensores respectivos. Si bien el NDSI de ambos sensores funciona con los mismos canales espectrales, uno en el verde y otro en el infrarrojo medio, MODIS presenta un poco más de superficie cubierta por nieve, lo que podría deberse a su mayor tamaño de pixel. No obstante hay que destacar que las diferencias no son relevantes si se considera que la escala del trabajo es de grandes cuencas, las que tienen una superficie promedio de 6.569 km².



Figura 12. Cobertura nival Landsat ETM+ en el sector de los ríos Mapocho y Colorado, 12-10-2001

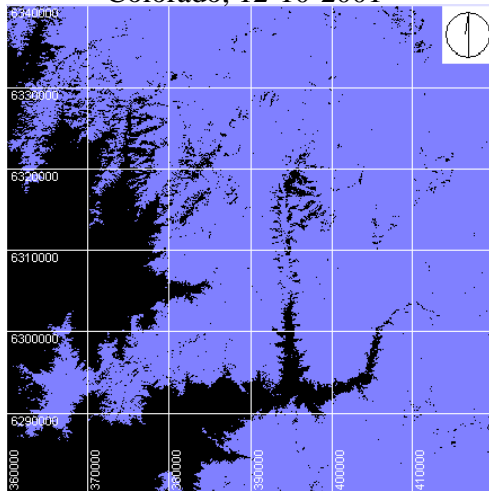


Figura 13. Cobertura nival MODIS en el sector de los ríos Mapocho y Colorado, 12-10-2001

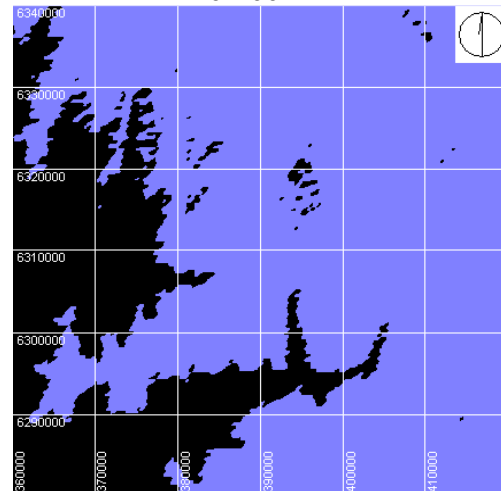


Figura 14. Cobertura nival ETM+ en un sector de la cuenca del río Limarí, 12-10-2001

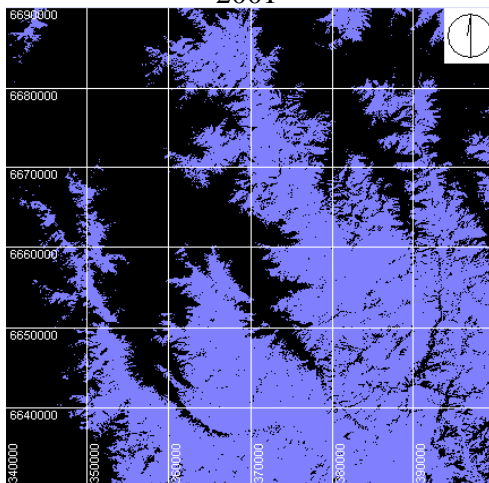
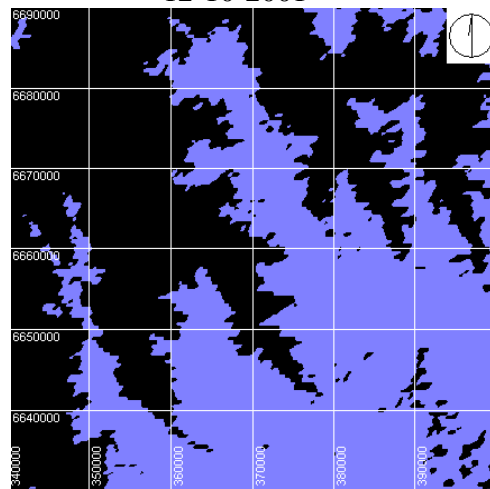


Figura 15. Cobertura nival MODIS en un sector de la cuenca del río Limarí, 12-10-2001



6.3 Síntesis

El tipo de variables, la cantidad de datos resultantes y el número de cuencas trabajadas hace difícil representar de manera sencilla los resultados de los objetivos, por lo que se realizará una síntesis, con el fin de conocer las características básicas del comportamiento de la cobertura nival a escala mensual, estacional y interanual.



Se ha dividido el área de estudio en tres zonas, Norte, Centro y Sur, abarcando cada una las siguientes cuencas:

Zona Norte: Copiapó, Huasco, Elqui, Limarí, Choapa, Petorca y Ligua.

Zona Centro: Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito, Maule y Itata.

Zona Sur: Bio Bio, Imperial, Toltén, Valdivia, Bueno y Petrohué.

La clasificación presentada se basa en el comportamiento de las curvas promedio de cada cuenca para los siete años hidrológicos trabajados, las que tienen una forma característica que permite hacer esta clasificación.

6.3.1 General

Las tres zonas definidas muestran distintos inicios y términos en sus fases de acumulación, deshielo y superficie mínima nival al calcular los valores promedios mensuales de la cobertura de nieve para los siete años hidrológicos, entre los años 2000 y 2007 (**Figura 12**).

Zona Norte: alcanza su máxima cobertura nival en el mes de julio, comenzando su deshielo de manera importante en agosto, lo que se mantiene hasta octubre, cuando se acerca al mínimo de nieve de la cuenca.

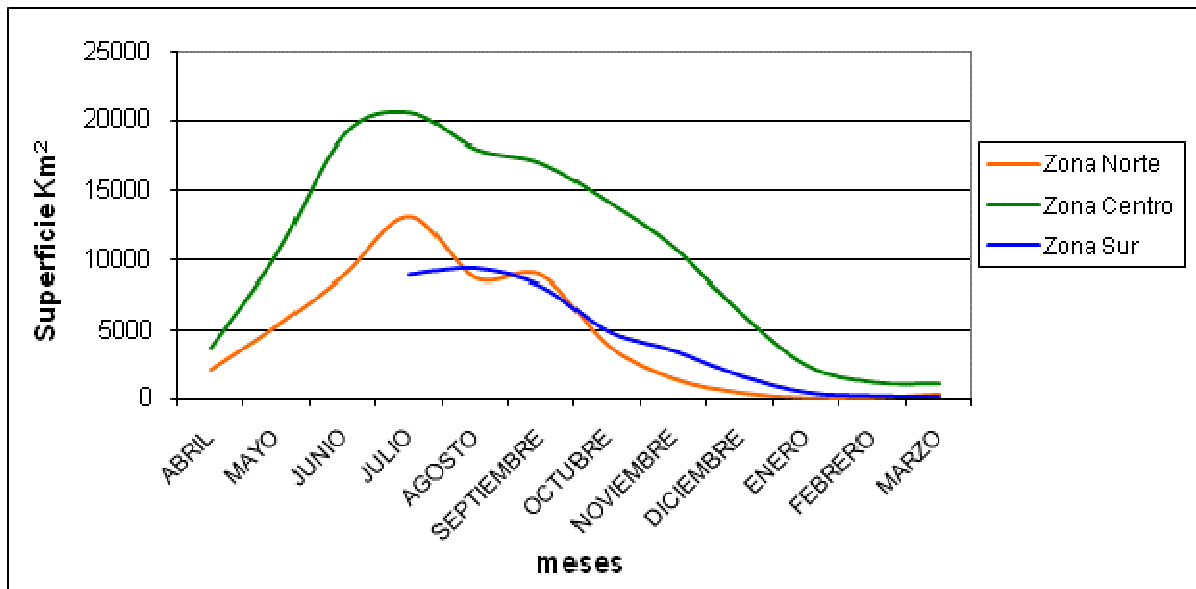
Zona Centro: alcanza su máxima cobertura nival en el mes de julio, permaneciendo con valores altos hasta fines de agosto. El deshielo importante se produce a partir de septiembre y se mantiene hasta enero, pero con tasas de variación menores que en la zona norte. En febrero y marzo se acerca o llega al mínimo de superficie de nieve, el que debe corresponder al área total de glaciares expuestos.

Zona Sur: alcanza su máxima de cobertura nival en el mes de agosto y a partir de septiembre inicia el deshielo con tasas de variación menores que las otras dos zonas. El mínimo nival es en febrero y se mantiene hasta abril del año hidrológico siguiente. Cabe destacar que esta zona a pesar de tener mayores precipitaciones posee menor superficie cubierta por nieve por el



hecho de tener altitudes considerablemente menores, por lo general no superando los 3.000 m de altitud.

Figura 12. Superficie de cobertura nival promedio mensual entre los años 2000 y 2007

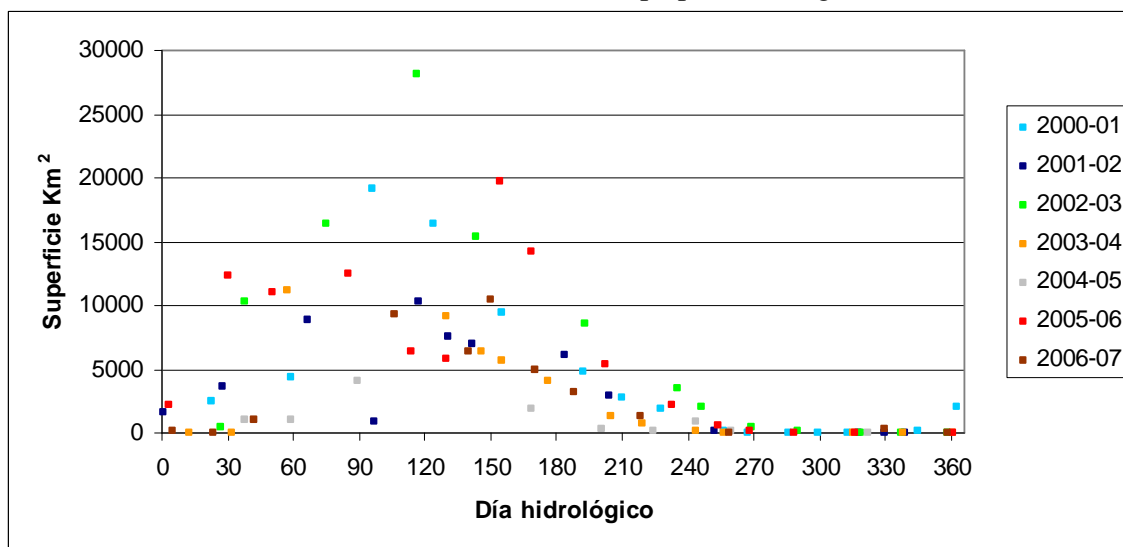


6.3.2 Zona Norte

La zona norte presenta gran variación de superficie de cobertura nival en las fases de acumulación y deshielo entre distintos años. Cabe destacar que a partir de fines de octubre hasta abril todos los años presentan superficies cubiertas por nieve de poca extensión, presentando muy pocas y leves variaciones (**Figura 13**).



Figura 13. Variación de superficie de cobertura nival para el período 2000 al 2007 en la Zona Norte (cuencas de los ríos Copiapó al río Ligua)



En agosto comienza el deshielo nival de manera importante, sin embargo en septiembre se ve un freno. Esto está sesgado por dos años que presentaron el fenómeno de “El Niño”, correspondiendo al 2002 y 2005, los que presentaron eventos de precipitación de importancia durante septiembre en todas las estaciones meteorológicas.

La curva de deshielo destaca por su forma cóncava, la que va desacelerando su tasa de variación hacia noviembre, debido a que se acerca al mínimo de superficie nival. De ese mes en adelante prácticamente no hay nieve, independiente de haber tenido un gran monto durante el invierno. En años secos, en octubre ya casi no queda nieve y en las cuencas de más al norte como la del Copiapó, en el año 2004 prácticamente no hubo fase de acumulación, solo pequeños eventos de precipitación en los que la nieve desapareció a los pocos días. Los años en los que la cobertura nival duró pocos meses o prácticamente no hubo, los glaciares por tanto estuvieron descubiertos y casi sin alimentación.

En el siguiente mapa se pretende demostrar espacialmente la variación de la cobertura nival, entre una fecha en septiembre que corresponde a una de las con mayor superficie y otro día en febrero que demuestre cuanta es la nieve presente durante la época estival. Como se observa, el mínimo nival es casi nulo, existiendo solamente en la parte sur del Copiapó y algunas zonas

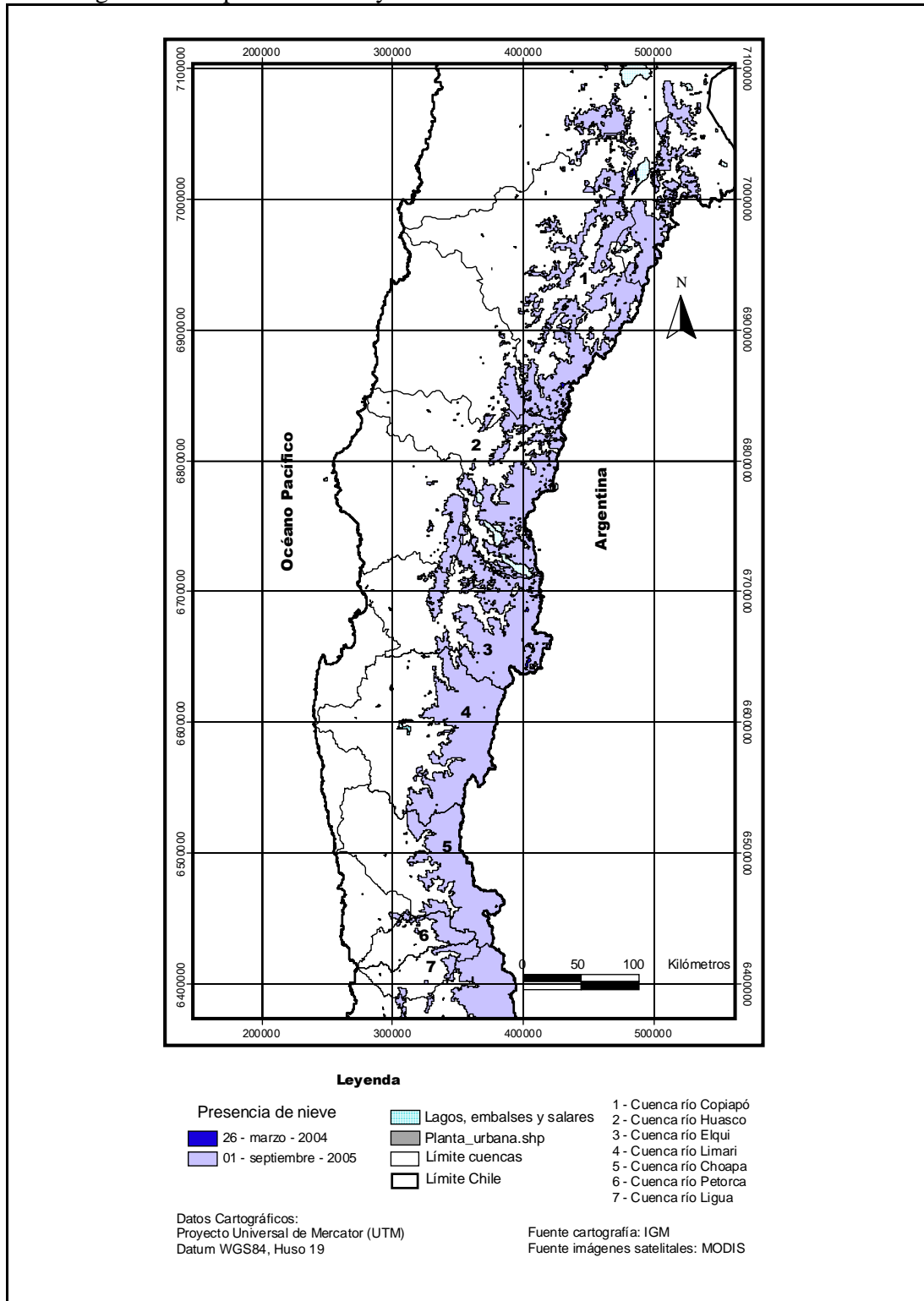


muy limitadas del Huasco y Elqui, las que prácticamente no alcanzan a verse reflejadas en la escala de la carta. Las cuencas de más al sur, Limarí, Choapa, Petorca y Ligua es muy frecuente que no tengan presencia de nieve entre fines de noviembre y principios de abril (**Figura 14**).

En la representación cartográfica se utilizó un umbral de 400 m de altitud como el mínimo potencial que podría precipitar nieve a lo largo de toda el área de estudio. Se prefirió definir ese valor para todas las cuencas, a pesar de las casi nulas posibilidades de que en el norte nieve a esa altitud, para así tener un límite homogéneo que permita desarrollar más fácil todos los procedimientos de la base de datos.



Figura 14. Mapa de mínimo y máximo de cobertura nival en la Zona Norte



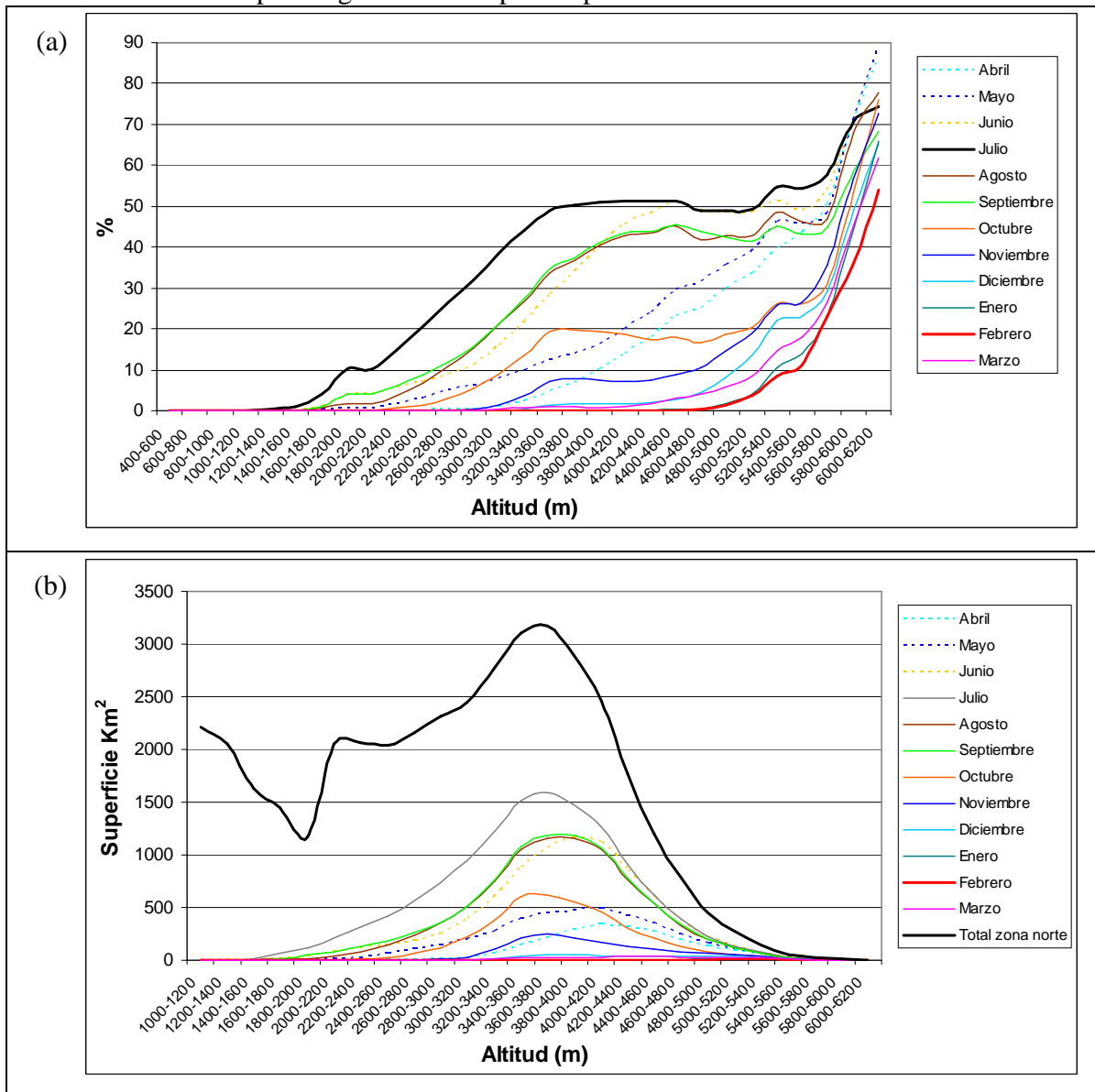


El mes de julio corresponde al de mayor superficie nival, lo que es explicado por tener presencia de nieve a menor altitud, alcanzando un 10% a los 2.000 msnm. Desde esa altitud hasta los 3.400 msnm hay un aumento porcentual lineal para llegar a cubrir el 50 % de la superficie con nieve, valor que se mantiene hasta los 5.200 msnm, donde se produce un quiebre que indica un fuerte aumento porcentual que llega a cubrir sobre el 70 % de la superficie cerca del los 6.000 msnm (**Figura 15(a)**).

Cabe destacar el tamaño de superficie de cada rango altitudinal, debido a que si bien las zonas con mayor porcentaje cubierto por nieve se encuentran en las más altas altitudes, éstas tienen muy poca superficie, por lo que su cantidad es escasa, pero de mayor permanencia (**Figura 15 (b)**).



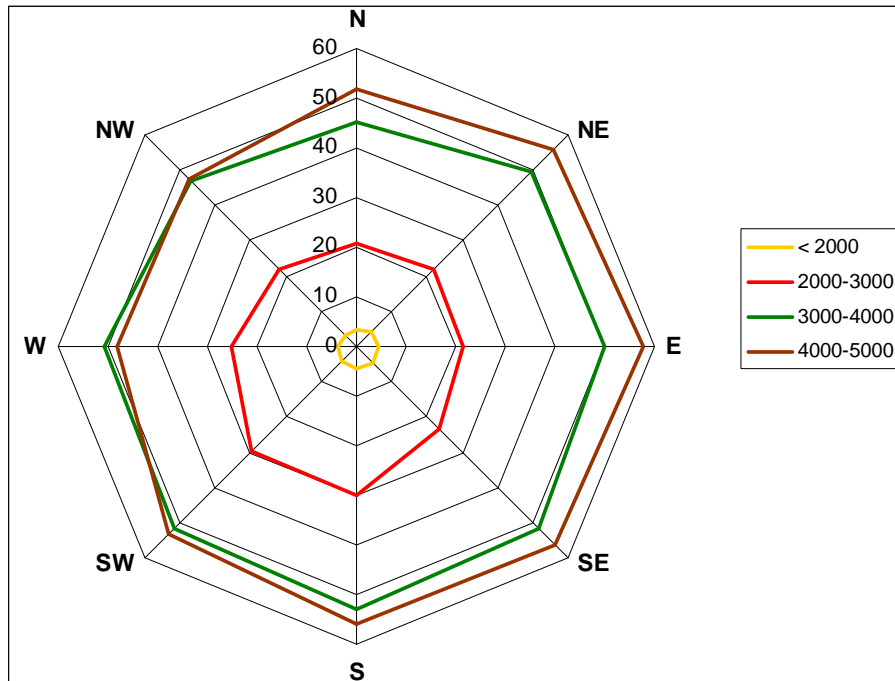
Figura 15. Variaciones porcentuales (a) y de superficie (km²) (b), del promedio mensual de la cobertura nival por rangos de altitud para el periodo 2000 al 2007 en la Zona Norte



En cuanto a los resultados de cobertura nival por exposiciones se tiene que en el mes de máxima cobertura nival, correspondiente a julio, bajo los 3.000 msnm la nieve se ubica principalmente en las exposiciones sur y suroeste, mientras que en los rangos sobre esa altitud su distribución no obedece a una exposición predominante (**Figura 16**).



Figura 16. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de Julio en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Norte

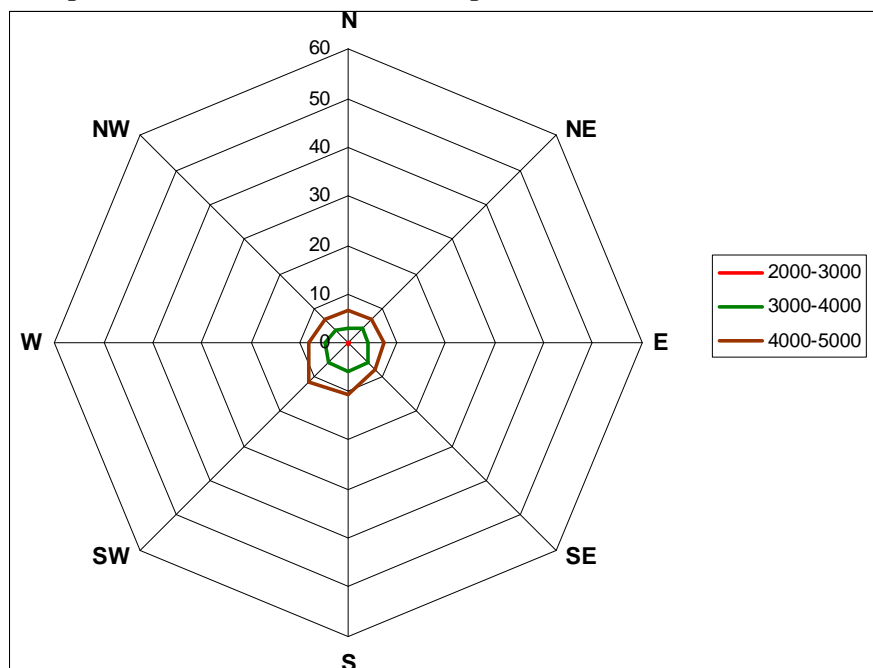


En el mes de Noviembre queda un 11% de la cobertura nival que había en Julio, lo que trae consigo cambios en su distribución espacial. Prácticamente no queda nieve bajo los 3.000 msnm y lo que hay sobre esa altitud ahora si tiene exposiciones predominantes, ubicándose principalmente en las vertientes sur y suroeste (**Figura 17**).

No se muestra un gráfico de exposición en el mes de mínima cobertura nival, debido a que entre las cuencas de los ríos Limarí y La Ligua no hay presencia de nieve. Además, por otro lado las cuencas de los ríos Copiapó, Huasco y Elqui tienen formas muy distintas, lo que no los hace posible generalizar como una gran zona. Ésto se debe a que no están respondiendo a un mínimo de superficie cubierta por nieve, sino que a la presencia de glaciares descubiertos (ver gráficos en Anexos).



Figura 17. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de Noviembre en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Norte



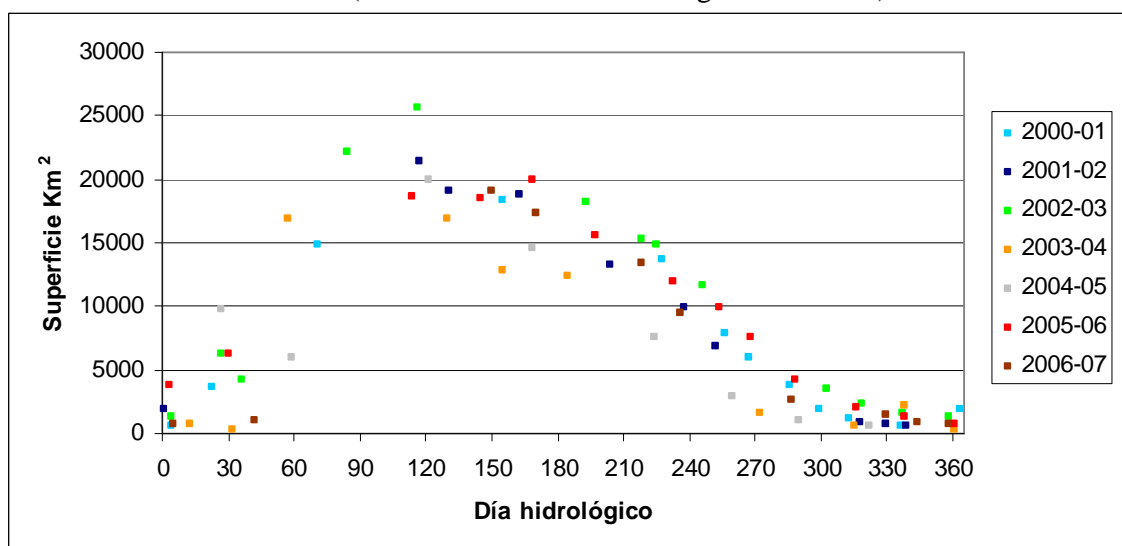
Al revisar el comportamiento de la nieve por cuencas, se destaca que el rango de mayor altitud muchas veces no entrega una exposición definida, lo que puede deberse por la presencia de glaciares, dirección e intensidad del viento de esas altitudes, topografías regulares sin obstáculos para depositar nieve, por nombrar algunos motivos que puedan explicar ese comportamiento. Por tal motivo, es más recomendable utilizar los rangos bajos los 5.000 msnm para entender la distribución espacial de la nieve por exposiciones. Por otro lado, las cuencas de los ríos Elqui y Choapa no obedecen a la lógica de que las exposiciones sur tengan mayor cobertura nival por el hecho de tener menor radiación solar, sus porcentajes son muy similares entre vertientes norte y sur, tanto en julio como en noviembre. Éste hecho hace necesario buscar otras explicaciones.



6.3.3 Zona Centro

En esta zona existe una curva bien definida de la estacionalidad de la nieve, observándose máximos de superficie nival similares entre distintos años, sin embargo la diferencia se acrecienta durante el deshielo y disminuye durante los meses estivales, pero no se igualan. En los años de mayores precipitaciones en la fase de acumulación se da que durante febrero e inclusive en marzo puede seguir existiendo deshielo nival.

Figura 18. Variación de superficie de cobertura nival para el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro (cuencas de los ríos Aconcagua al río Itata)



Las curvas de superficie de cobertura nival promedio presentan diferencias importantes con los años de máxima y mínima superficie para cada mes, pero no al nivel de la zona norte. Si bien en julio se alcanzan los valores más altos de superficie cubierta por nieve, la fase de acumulación dura más tiempo, hasta septiembre se puede observar en la curva una forma de meseta, en especial en las cuencas de más al sur. La curva de deshielo varía entre una forma convexa y lineal, en oposición a la forma cóncava del norte.

Los años hidrológicos 2003-04 y 2004-05 corresponden a los de menor cobertura nival, lo que se ve reflejado durante el deshielo y a que alcanzan valores cercanos al mínimo comenzando el mes de enero, mientras que años como el 2002-03 y 2005-06 alcanzan esos mismos valores

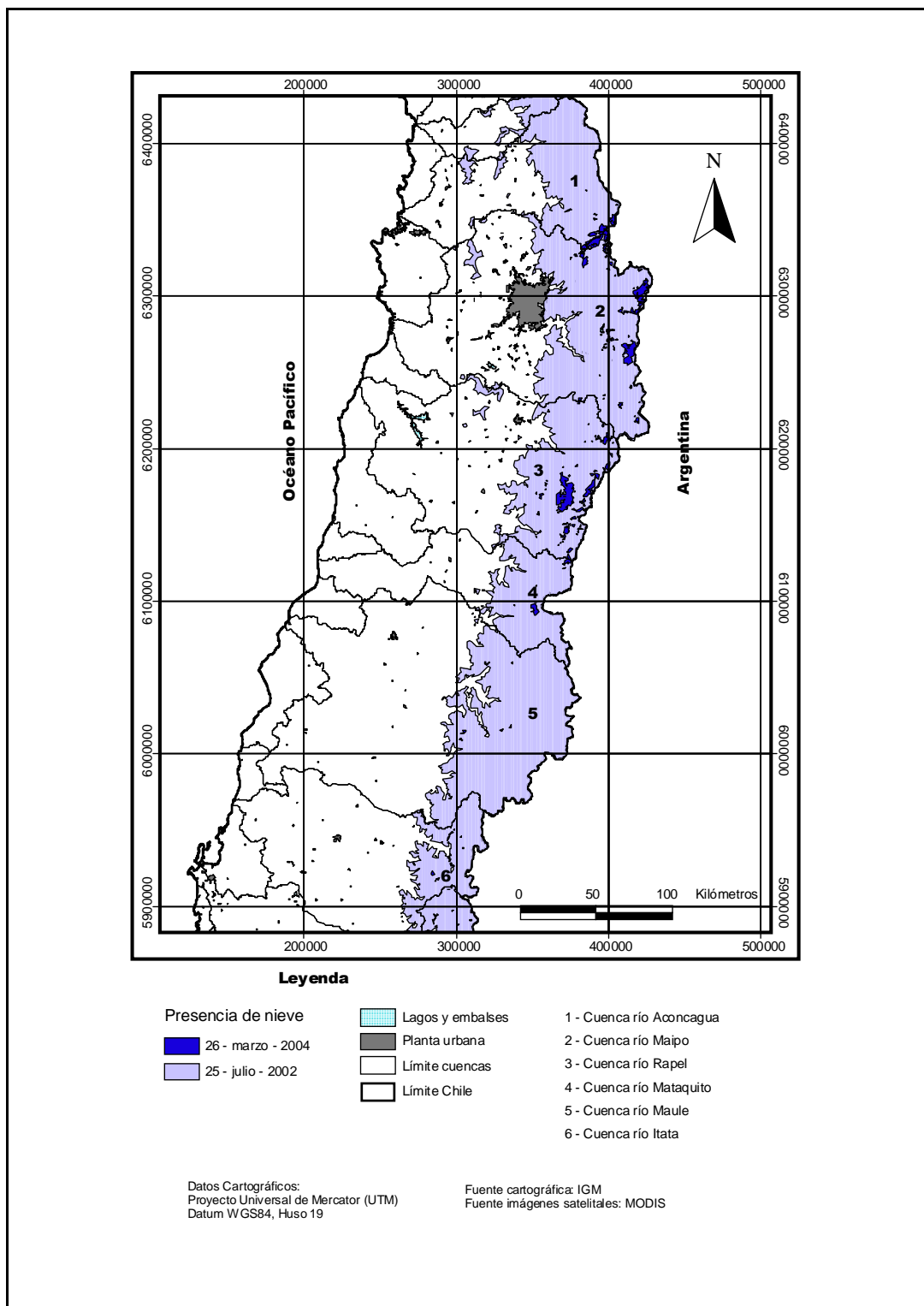


en el mes de marzo, o sea una diferencia de dos meses que corresponden a los de mayor temperatura. Éste hecho afecta directamente en las tasas de ablación de los glaciares.

A continuación se presenta una cartografía para mostrar un ejemplo de donde se localiza la nieve en fechas de máxima y mínima cobertura nival en la zona centro. Generalmente en el mes de febrero todo lo que sale como nieve corresponde a glaciares descubiertos.



Figura 19. Mapa de mínimo y máximo de cobertura nival en la Zona Centro





Si bien es julio el mes de mayor cobertura nival, a partir de los 2.000 msnm de altitud, de abril hasta agosto-septiembre hay un creciente aumento del porcentaje de nieve, el que llega casi al 100 % en altitudes sobre los 3.000 msnm y que se mantienen en ese porcentaje hasta noviembre sobre los 4.000 msnm (**Figura 20a**).

A los 1.000 msnm de altitud existe una presencia cercana al 3 % de nieve entre mayo y julio. Este valor se da por las cuencas de los ríos Maule e Itata, más al norte rara vez hay nieve que perdure por muchos días a esa altitud.

A los 2.000 msnm de altitud hay un 25% de nieve en mayo y entre junio y agosto ese valor supera el 60%, volviendo a bajar en septiembre, para alcanzar otra vez el 25% en noviembre. Hay que destacar que estos valores son promediando todas las cuencas correspondientes a la zona centro, las que si bien tienen tendencias muy similares como muestran sus curvas expresadas en los gráficos (ver Anexos), los montos varían rápidamente mientras más al sur se ubiquen. Por ejemplo a los 2.000 msnm en el mes de julio las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito, Maule e Itata, tienen los siguientes porcentajes cubiertos por nieve 44%, 47%, 65%, 67%, 69% y 72%.

A los 3.000 msnm de altitud, ya en abril hay un 20% cubierto por nieve, mientras que en mayo llega a los 47% y así progresivamente en aumento hasta agosto, alcanzando un 94%. En Septiembre empieza a disminuir, pero solo baja al 90%, el descenso fuerte a esta altitud se da entre noviembre y diciembre, que pasa de un 65% al 38% cubierto por nieve. Si se desglosan los valores por cuenca en el mes de julio, se tiene a los 3.000 msnm los siguientes valores: Aconcagua (87%), Maipo (95%), Rapel (97%), Mataquito (99%), Maule (99%) y Itata (100%). La variación latitudinal es menor que a los 2.000 msnm.

Al referirse a altitudes sobre los 4.000 msnm de la zona centro, en realidad se están considerando las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel, ya que las otras cuencas se encuentran bajo los 4.000 msnm. En abril ya está cubierto sobre el 50%, lo que es destacable, debido que sobre esta altitud se ubica la mayor parte de la superficie de los glaciares. En mayo



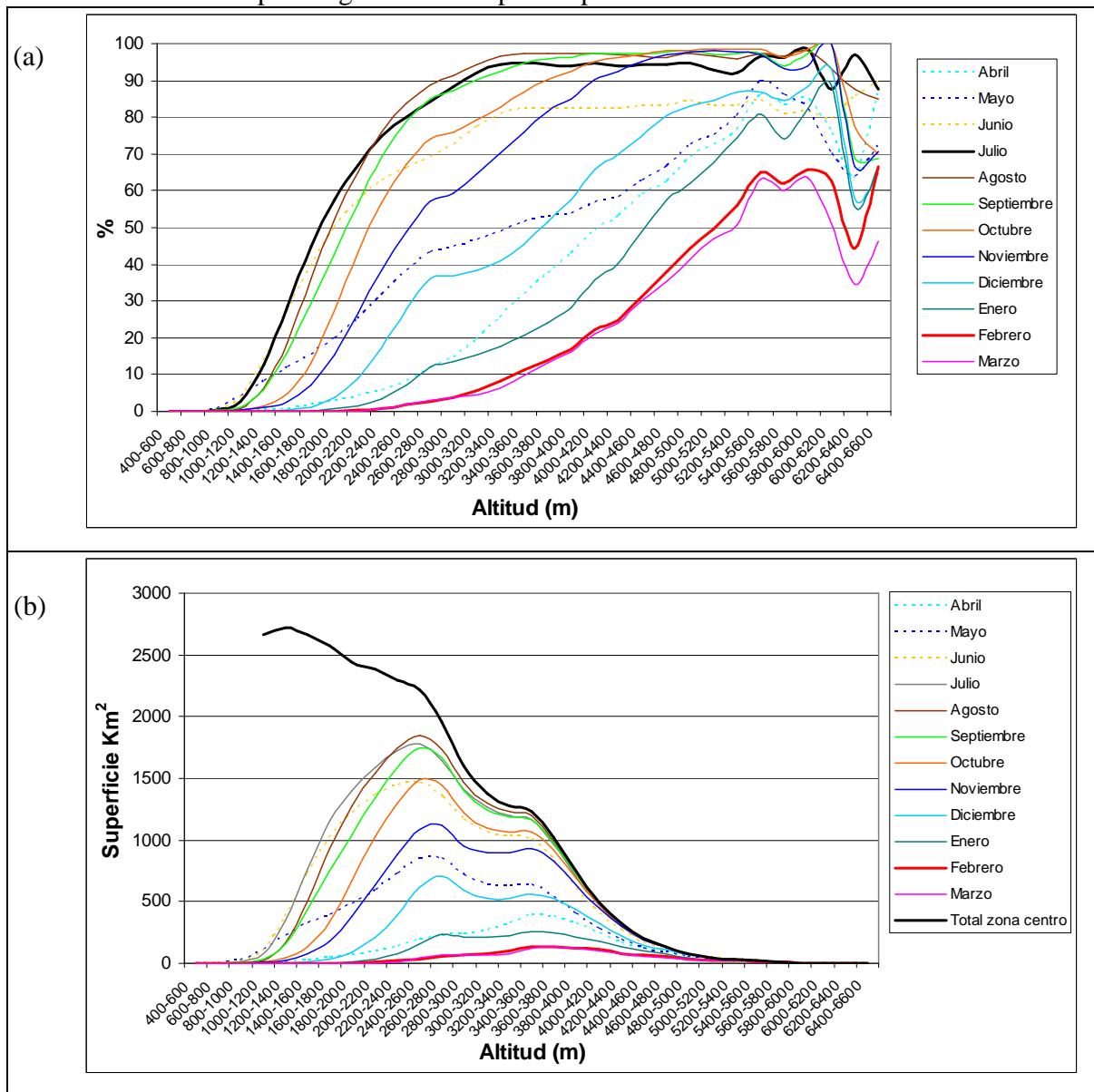
hay un 57%, en junio un 82%, julio un 95%, agosto y septiembre un 97%. En este mes empieza a disminuir, sin embargo con tasas de disminución bajas, teniendo en noviembre aún un 90% cubierto por nieve. A partir de diciembre se viene el deshielo importante sobre esta altitud, bajando a un 66% y ya en febrero llega al mínimo con un 22%. Las tres cuencas mencionadas tienen casi los mismos valores a los 4.000 msnm.

A los 5.000 msnm las variaciones estacionales son menores, empezando abril con un 73% y llegando a la máxima superficie cubierta por nieve en octubre y noviembre con el 98%. Durante los mismos meses se alcanza el máximo a los 6.000 msnm, lo que corresponde solo a la cuenca del río Maipo, ya que es la única que supera esa altitud. A partir de diciembre se presenta deshielo sobre los 5.000 msnm, alcanzando los valores mínimos en marzo.

Lo que puede concluirse es que a mayor altitud, el máximo de cobertura nival se alcanza con un desfase respecto a altitudes más bajas. A la vez, el mínimo de cobertura nival se obtiene más tarde en altitudes mayores.



Figura 20. Variaciones porcentuales (a) y de superficie (km²) (b) de promedio mensual de la cobertura nival por rangos de altitud para el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro



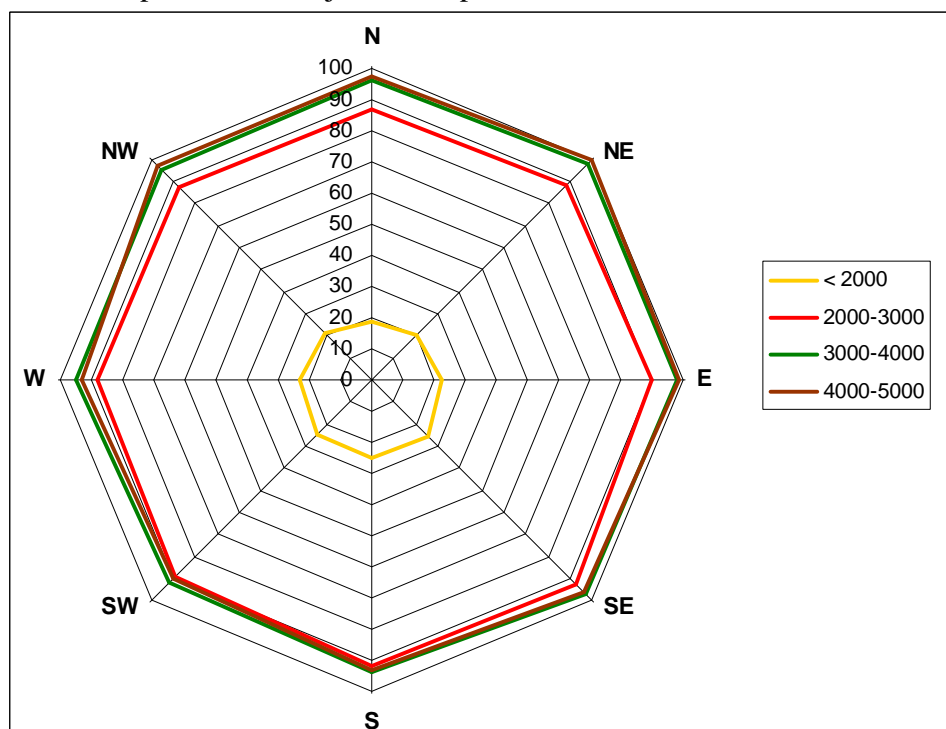
Si se considera la superficie potencial que puede estar cubierta por nieve, sobre los 4.000 msnm parece ser menos importante, ya que es muy poco el territorio, solo cubre el 3.4 % de la zona centro, y a nivel de cuencas, el 5.5 % del Aconcagua, 8.6% del Maipo y 2.3% del Rapel. Sin embargo, la existencia de nieve sobre esta altitud influye en que los caudales no alcancen



su nivel de estiaje y que los glaciares estén protegidos de la radiación solar por el manto nival (**Figura 20b**).

En cuanto a la distribución de la nieve por exposiciones, se tiene que para el mes de julio bajo los 2.000 msnm, cerca de un 25% esta cubierto por nieve en las exposiciones sureste, sur y suroeste, mientras que en las exposiciones noroeste, norte y noreste tienen un 20%. Las exposiciones oeste y este tienen valores cercanos al 22%. Si bien hay diferencias, éstas no son considerables. Entre los 2.000 msnm y 3.000 msnm la situación es bien similar, con pequeño predominio para con las exposiciones de carácter sur, mientras que sobre los 3.000 msnm todas las vertientes tienen valores que se acercan y superan el 90% (**Figura 21**).

Figura 21. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de julio en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro

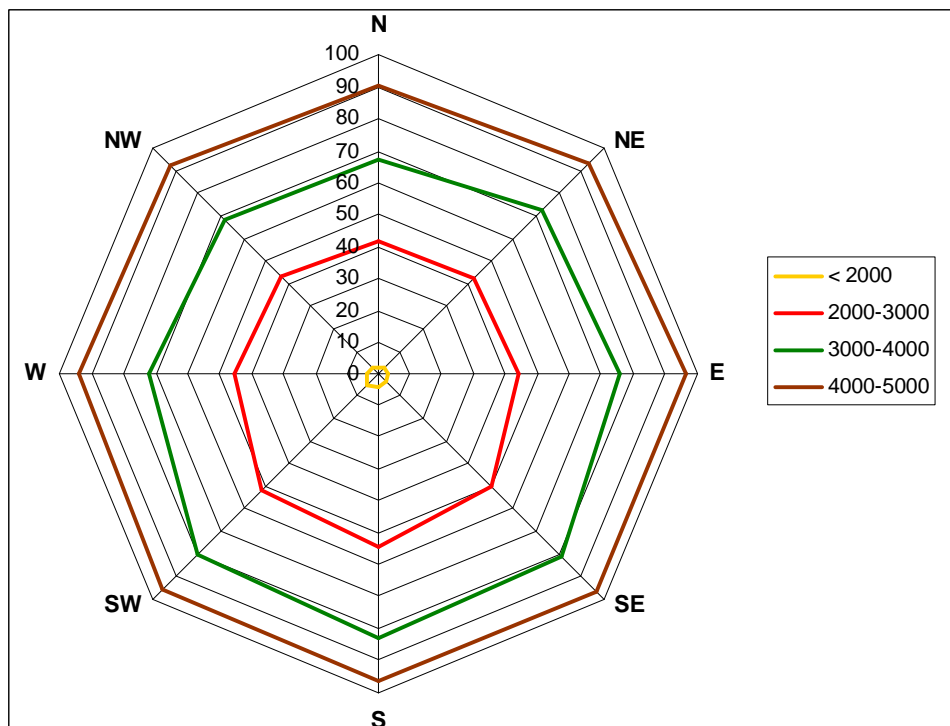


En el mes de noviembre (**Figura 22**), todos los rangos de altitud presentan diferencias, siendo estas más importantes en los rangos de menor altitud. Por ejemplo, entre las exposiciones norte y sur, en el rango entre los 3.000 msnm y 4.000 msnm, la diferencia es de un 14,3% y entre los 4000 msnm y 5000 msnm es de 6,2%.



Al revisar las variaciones de cobertura nival desglosado por cuenca, al igual que en la zona norte hay que tener precaución con los rangos de mayor altitud, debido a que una exposición norte puede mostrar mayor porcentaje cubierto con nieve que una de vertiente sur. Ésto puede deberse a como se explicó anteriormente a la presencia de glaciares, condiciones de viento, como muchos otros posibles factores. Además hay que considerar que las zonas más altas de las cuencas presentan menor superficie, siendo en muchos casos menores a 2 km^2 (8 píxeles), lo que puede sesgar un análisis. Por tal motivo, se prefirió colocar en los gráficos de síntesis de exposiciones los rangos de altitud sobre los 5.000 msnm.

Figura 22. Porcentaje de cobertura nival promedio mensual por exposición cada 1.000 metros de altitud para el mes de noviembre en el periodo 2000 al 2007 en la Zona Centro



Si bien la **Figura 22** muestra que la exposición sur es en la que predomina mayor cobertura nival, mientras que la este y oeste están por igual en un nivel intermedio y que la norte es la que presenta menor permanencia de la nieve, observándose como un modelo casi perfecto, ésto no sucede igual al observar las cuencas de manera separada, sólo se dio al agruparlas en una gran zona (ver Anexos). Cada cuenca muestra una forma distinta con mayores y menores



variaciones entre exposiciones, aunque siempre hay un predominio en que la nieve permanezca más en las exposiciones sur. Las diferencias principales se dan entre exposiciones oeste y este, para lo cual habría que buscar variables que expliquen dichas diferencias.

6.3.4 Zona Sur

La zona sur presenta menos datos de superficie de cobertura nival debido a la alta presencia de cobertura de nube, por lo que es muy difícil encontrar para la misma fecha todas las cuencas despejadas. Por tal motivo, no se realizaron gráficos de síntesis de la zona sur, sino que sólo se realizaron para cada una de las cuencas. Además, ninguno de los gráficos de esta zona son confiables, como sí lo eran en las zonas norte y centro, por el hecho de que el número de datos obtenidos no permiten calcular promedios representativos a nivel mensual, en especial para los meses de mayo y junio.

El deshielo comienza fuertemente en septiembre en todas las cuencas, mostrando las curvas pendientes más pronunciadas que en la zona centro. Sin embargo, entre octubre y noviembre se desacelera la tasa de variación de deshielo y sigue con tasas menores, pero continúa hasta marzo, mes en el que se obtienen los mínimos de coberturas nival para toda la zona sur, no así como se observaba en la zona centro, donde era más frecuente que las cuencas alcanzarán el mínimo en febrero.

Las superficies de cobertura nival son menores que en las zonas anteriores, debido principalmente a las altitudes más bajas. El mínimo nival corresponde a los lugares donde se localizan los volcanes que tienen presencia de glaciares, mientras que las superficies promedio y de máximo nival se encuentran en los mismos volcanes y en zonas como Alto Biobio y el Cordón del Caulle (**Figura 23**).

En los meses de junio – julio a los 1.000 msnm hay superficies cercanas al 5% cubierto por nieve en las cuencas de los ríos Imperial, Toltén y Valdivia, mientras que la cuenca del río Biobio tiene un 18%, a pesar de encontrarse más al norte. En el mes de agosto, se mantiene el porcentaje en el Biobio y suben los valores cercanos al 10% en las otras cuencas. En



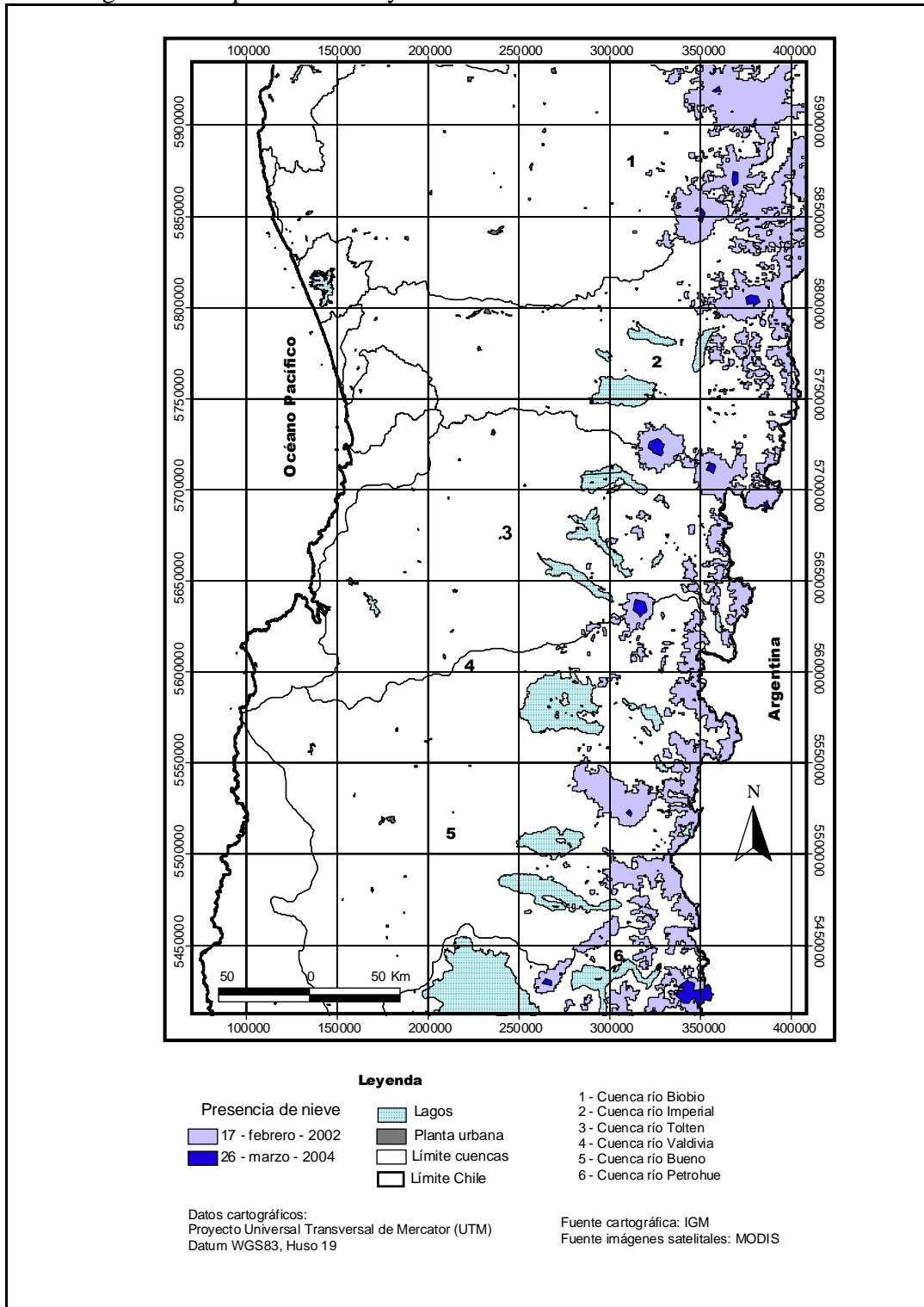
septiembre se reducen los porcentajes en todas las cuencas y en octubre ya no hay presencia de nieve a los 1.000 msnm.

Se alcanza el 100% cubierto por nieve sobre los 1.800-2.000 msnm en julio y se mantiene así hasta diciembre, para recién empezar a disminuir en enero, por tal motivo esta zona presenta deshielo hasta marzo. Por lo tanto, los fuertes deshielos que se producen a partir de septiembre, corresponde a la nieve depositada bajo los 2.000 msnm.

Cabe destacar que estas observaciones no consideraron las cuencas de los ríos Bueno y Petrohué, ya que si bien las cuencas señaladas presentan escasez de datos, éstas dos tienen aún una menor cantidad, lo que se prestaría para posibles análisis errados.



Figura 23. Mapa de mínimo y máximo de cobertura nival en la Zona Sur





7. CONCLUSIONES

Como se demostró a lo largo del documento no fue posible desarrollar una base de datos de la dinámica de la cobertura nival a escala semanal con el sensor MODIS, si se tiene como objetivo presentar datos confiables. Ésto debido a que las nubes, fallas de la imagen, valores anómalos, ángulos de cenit que deforman los píxeles y las precipitaciones recientes van acotando significativamente las imágenes apropiadas para trabajar.

En cuanto a la variación latitudinal, las cuencas ubicadas más al norte presentan una menor estación de deshielo y mayor tiempo con casi nula superficie cubierta por nieve, lo que va cambiando a medida que se avanza hacia el sur, extendiéndose los periodos de acumulación, deshielo y disminuyendo el tiempo en el que no hay presencia de nieve.

En cuanto a la variación altitudinal, a mayor altitud se produce un desfase en obtener el máximo de cobertura nival, respecto a altitudes menores. El deshielo importante empieza por lo general en el mes de septiembre e incluso en agosto para la zona norte, afectando primero los sectores más bajos y a medida que transcurre la primavera va subiendo de altitud. Se destaca la importancia de la nieve que permanece a mayor altitud, a pesar de tener menor superficie comparada con el tamaño de las cuencas, por el hecho que el deshielo de esa nieve indica el fin del régimen nival para iniciar el glacial. Si el año fue seco, las zonas altas quedarán más tempranamente sin nieve y los glaciares mayor tiempo expuesto a la radiación solar y las temperaturas estivales.

En cuanto a la variación por exposición, se concluye que hay mayores diferencias entre las vertientes norte y sur a menores altitudes y cuando existe menor superficie nival, pero no cuando se alcanza la mínima, ya que ahí no indica distribución de la nieve, sino que por lo general de glaciares. Por otro lado, tampoco se considera apropiado basarse en las distribución por exposición en el rango de mayor altitud, debido a que hay varios factores que pueden sesgar el análisis, siendo común que una exposición norte muestre más nieve que una de exposición sur, mientras que a altitudes más bajas era lo contrario. Además, cabe destacar que



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

hay excepciones como las cuencas de los ríos Elqui y Choapa, en las que la exposición sur no representa la de mayor permanencia nival, lo que debe obedecer a otras variables.



8. BIBLIOGRAFÍA

1. BALES, Roger.; MOLOTCH, Noah.; PAINTER, Thomas.; DETTINGER, Robert.; DOZIER, J. Mountain hydrology of the western United States. En: **Water Resources Research**. Agosto, 2006. vol. 42.
2. BENN, Douglas.; EVANS, David. Glaciers and Glaciation. London, 1998. 734 p.
3. BOWN, Francisca.; RIVERA, Andrés.; ACUÑA, Cesar. Recent glaciers variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. **En: Annals of Glaciology**. 2008. vol 48, p. 43-48.
4. BOWN, Francisca y RIVERA, Andrés. Climate changes and glacier responses during recent decades in the Chilean Lake District. **En: Global and Planetary Change**. 2007. vol 59, p. 79-86.
5. ERICKSON, Tyler y WILLIAMS, Mark. Persistence of topographic controls on the spatial distribution of snow in rugged mountain terrain, Colorado, United States. **En: Water Resources Research**. Abril, 2005. vol. 41.
6. FOSTER, J.; HALL, D.; KELLY, R.; CHIU, L. Seasonal snow extent and snow mass in South America using SMMR and SSM/I passive microwave data (1979–2006). **En: Remote Sensing of Environment**. 2009. vol. 113, p. 291 – 305.
7. HALL, D.; RIGGS, H. y SALOMONSON, V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. **En: Remote Sensing of Environment**. 1998. vol 54, p. 127-140.
8. HALL, F.; FOSTER, J.; VERBYLA, D.; KLEIN, A.; BENSON, C. Assessment of snow-cover mapping accuracy in a variety of vegetation-cover densities in central Alaska. **En: Remote Sensing of Environment**. 1998. Vol 66, p. 129-137.
9. LOPEZ, P.; SIRGUEY, Pascal.; ARNAUD, Yves; POUYAUD, Bernard y CHEVALLIER, Pierre. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006). **En: Global and Planetary Change**. Abril, 2008. Vol. 61, p. 103-116.



10. PELLICCIOTTI, Francesca.; BURLANDO, Paolo.; VAN VLIET, Karin. Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River basin, central Chile. **En: International Association of Hydrological Sciences**. Foz do Iguaçu , Brasil, 2005. Publ. 318 p.
11. RIVERA, Andrés y ACUÑA, Cesar. Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur. **En: Revista Investigaciones Geográficas**. Santiago, 2001. vol 35, p. 67-100.
12. RIVERA, Andrés, CASASSA, Gino, ACUÑA, Cesar y LANGE, Heiner. Variaciones recientes de glaciares en Chile. **En: Revista Investigaciones Geográficas**. Santiago, 2000. vol 34, p. 25-52.



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

9. ANEXOS



Figura 24. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Copiapó

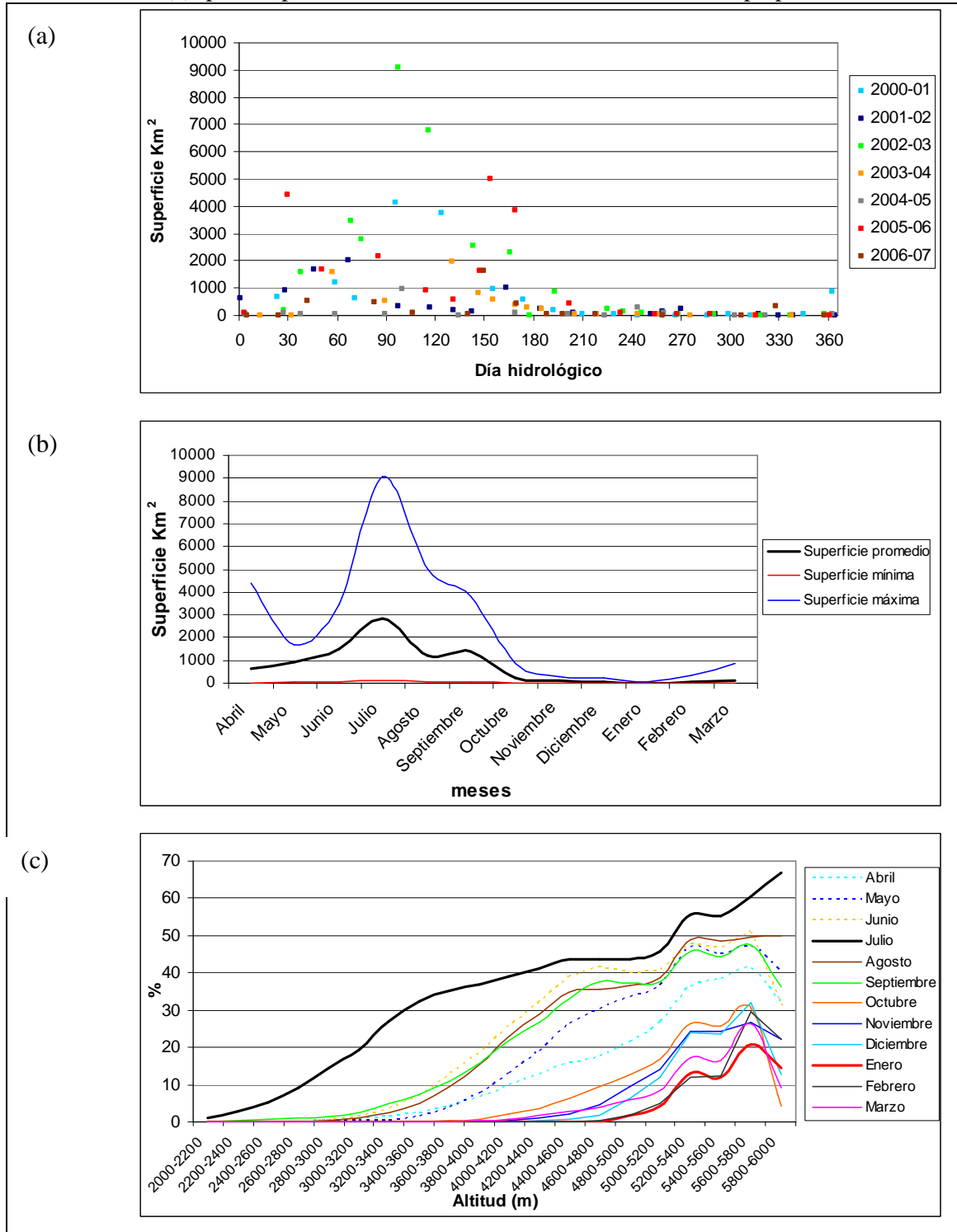




Figura 25. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y enero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Copiapó

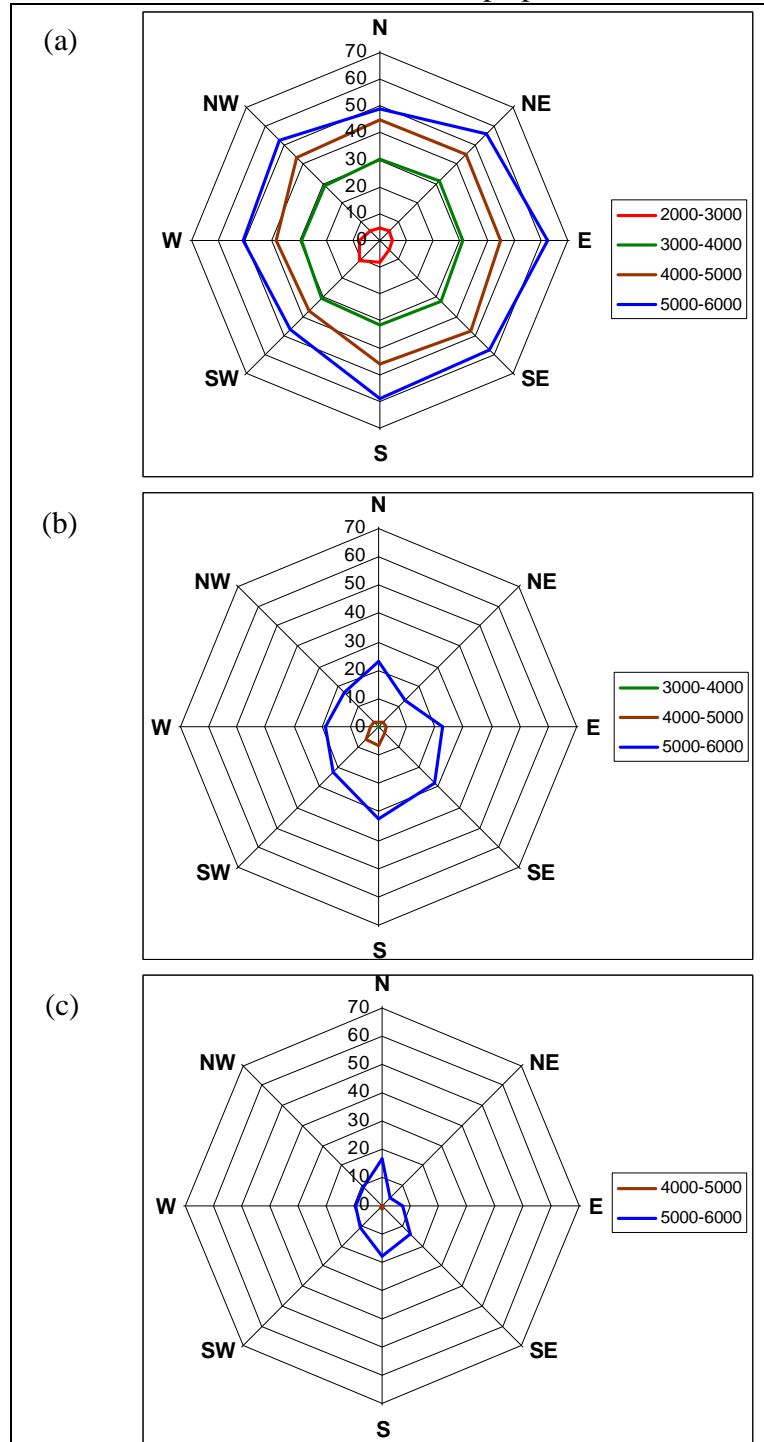




Figura 26. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Huasco

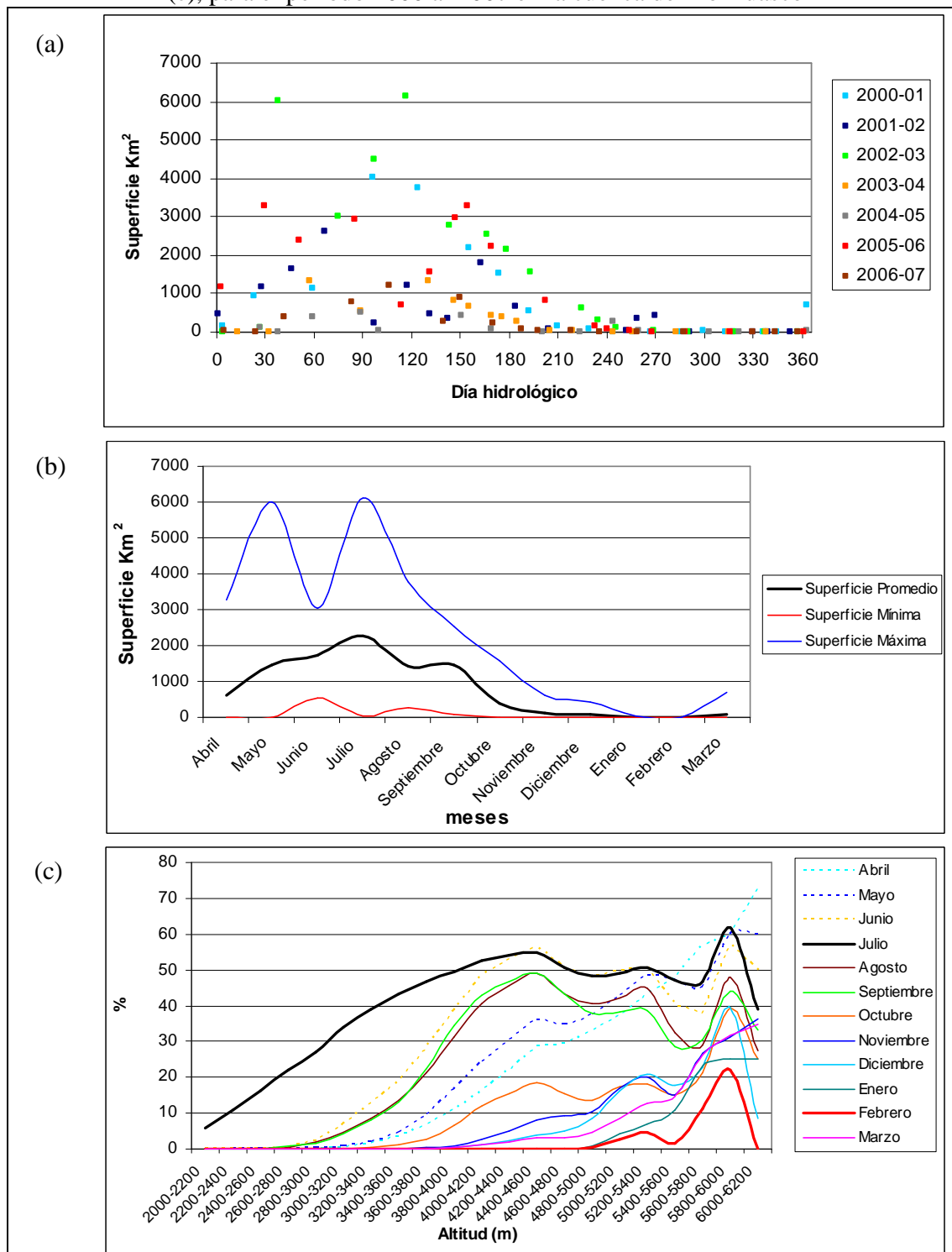




Figura 27. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Huasco

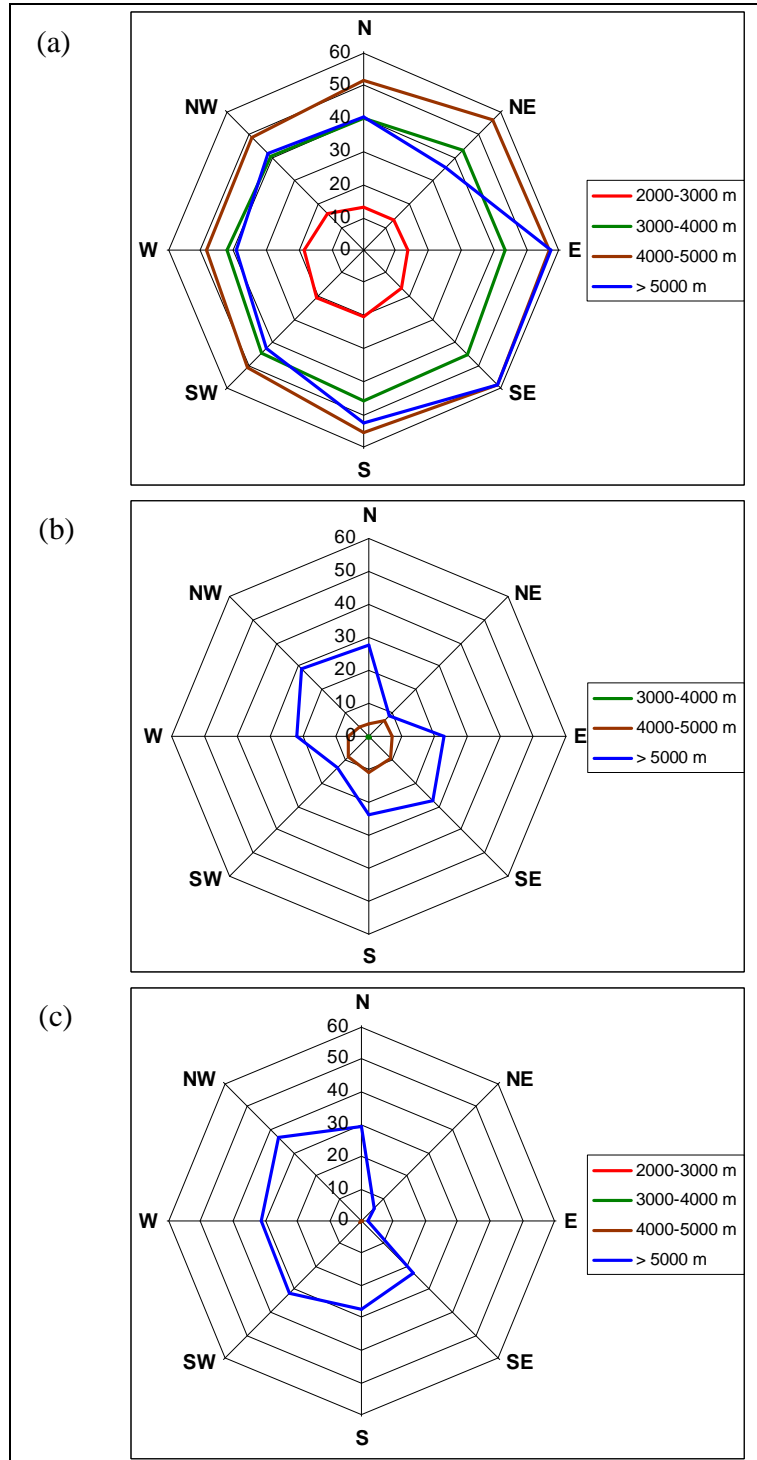




Figura 28. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Elqui

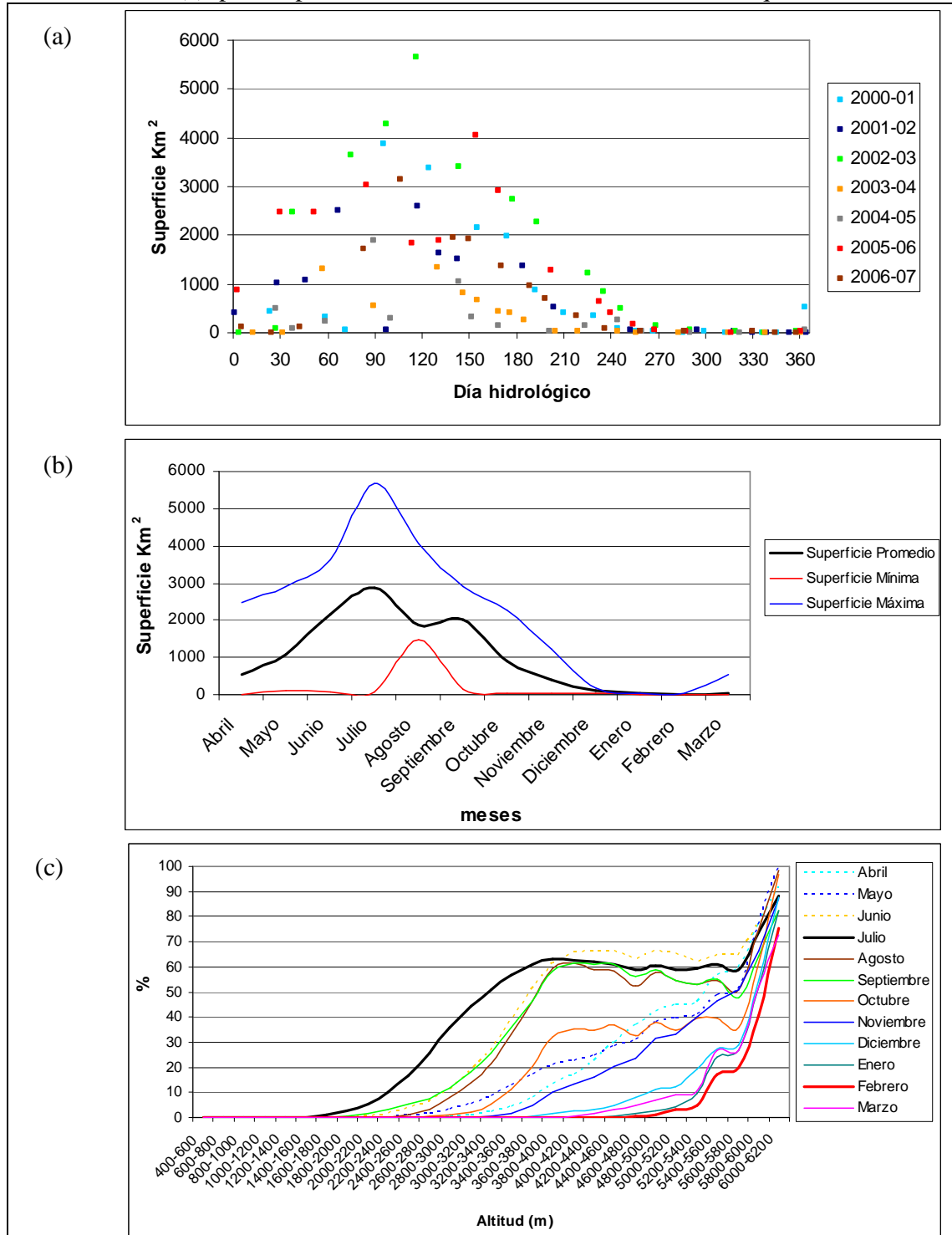




Figura 29. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Elqui

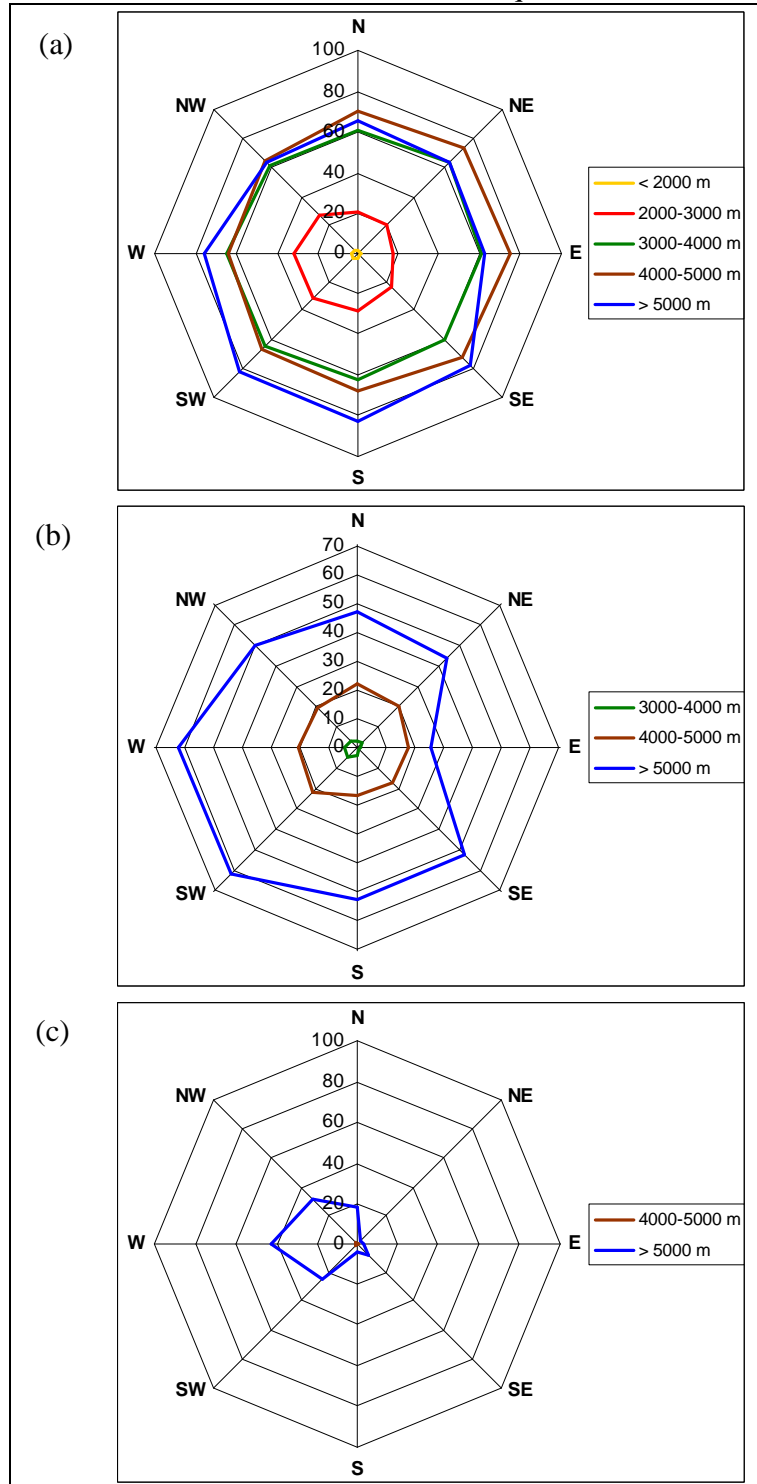




Figura 30. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Limarí

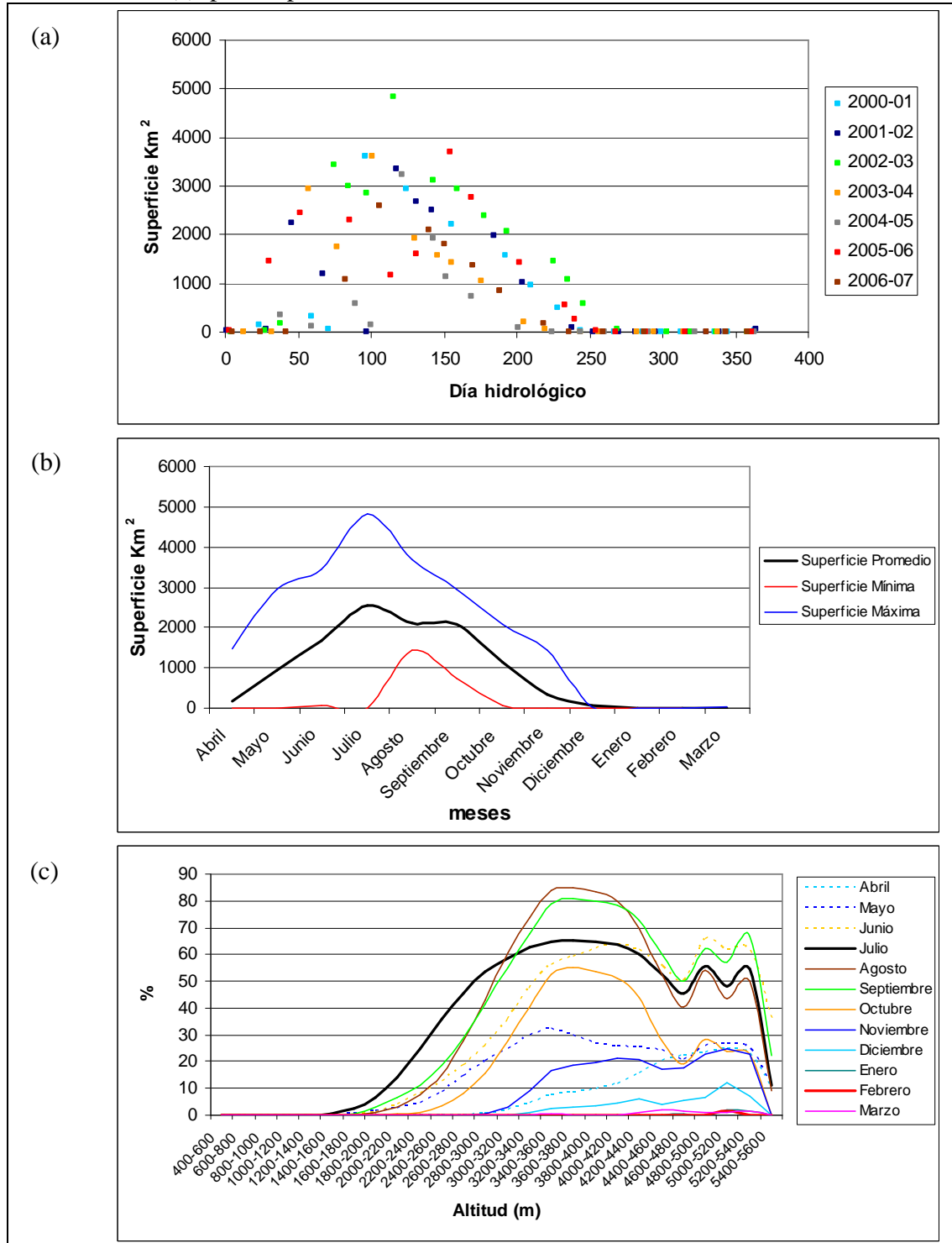




Figura 31. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Limarí

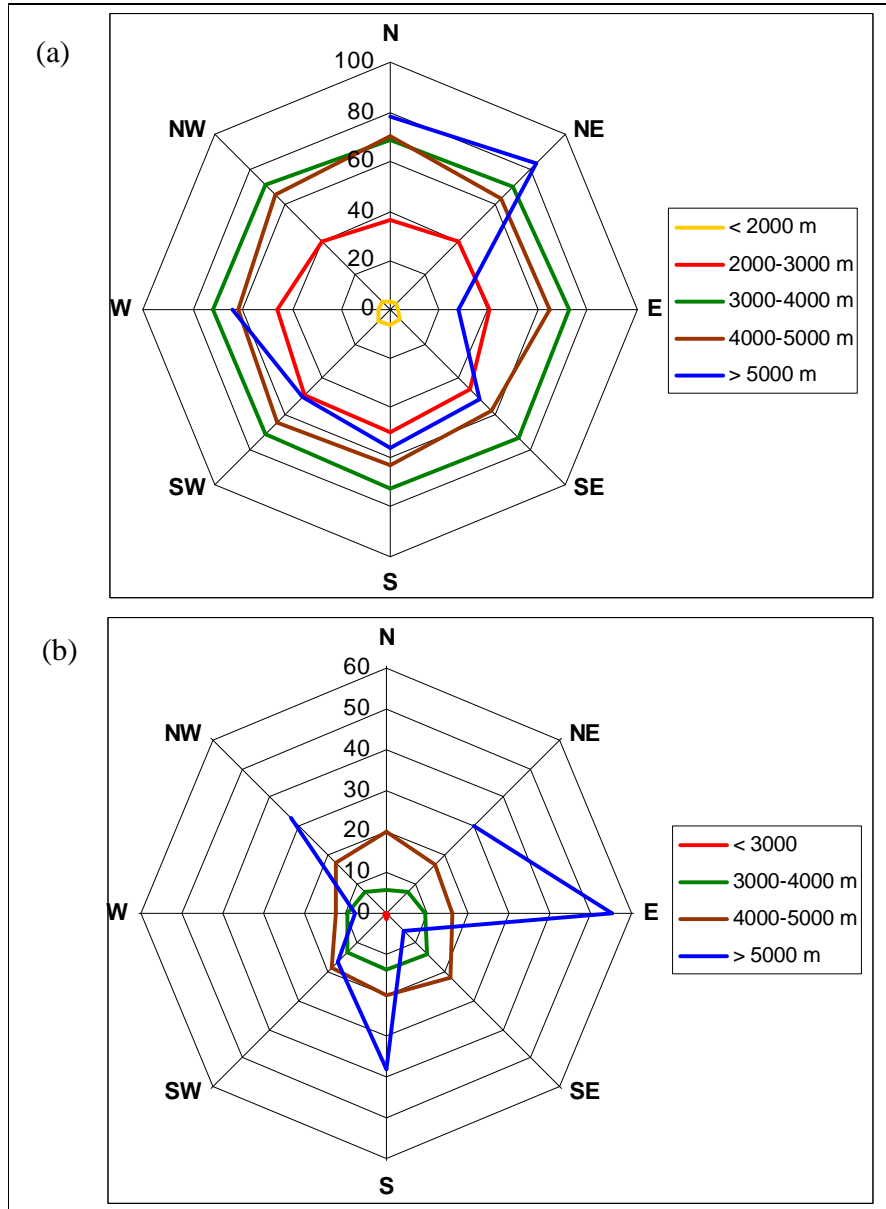




Figura 32. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Choapa

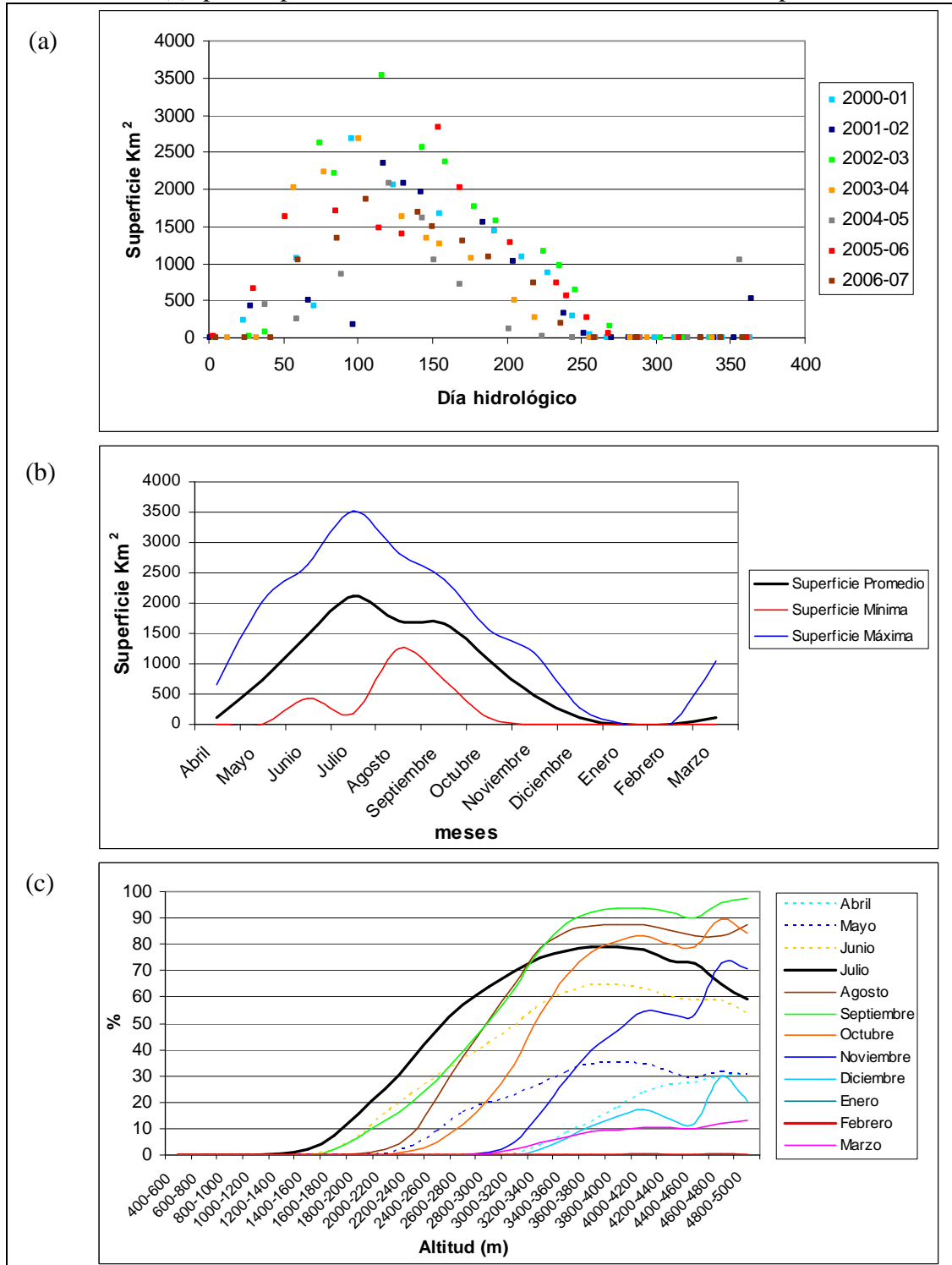




Figura 33. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Choapa

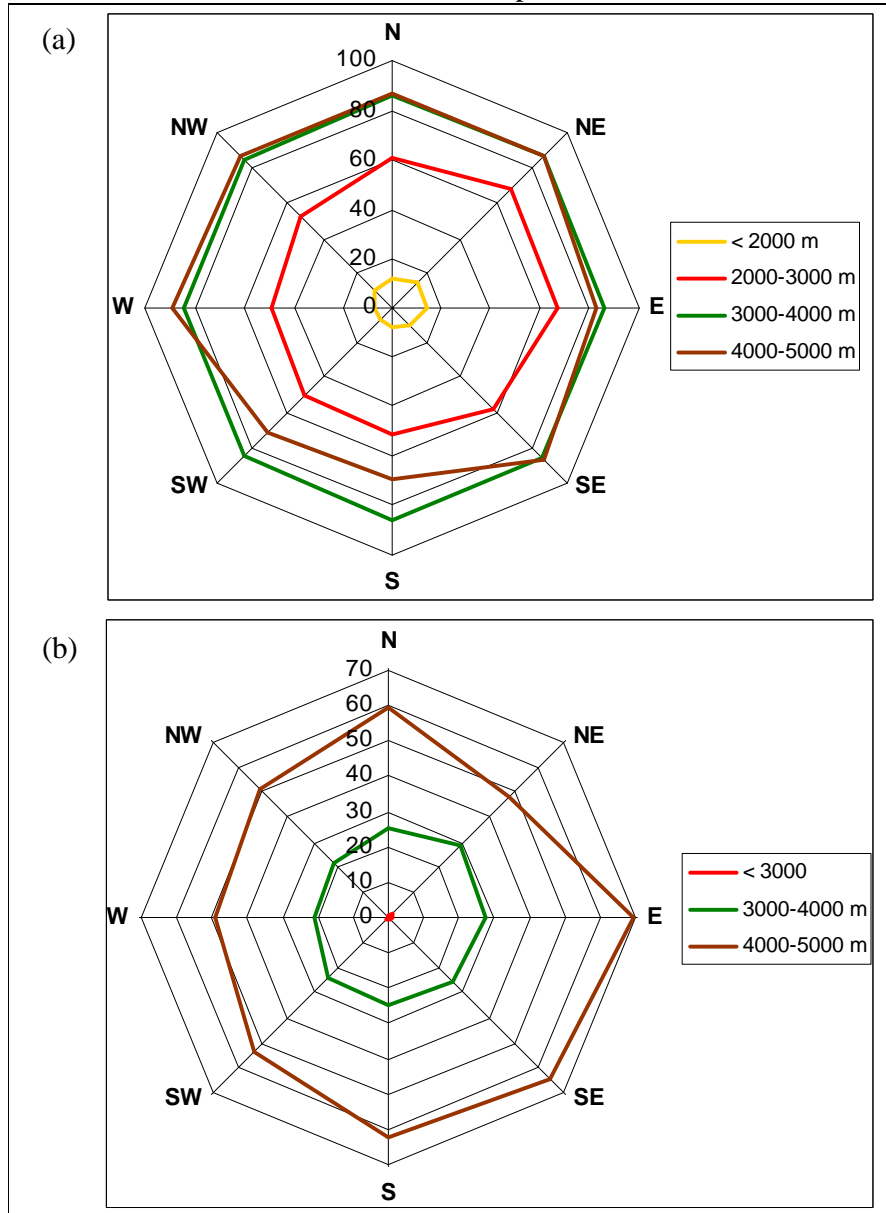




Figura 34. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Petorca

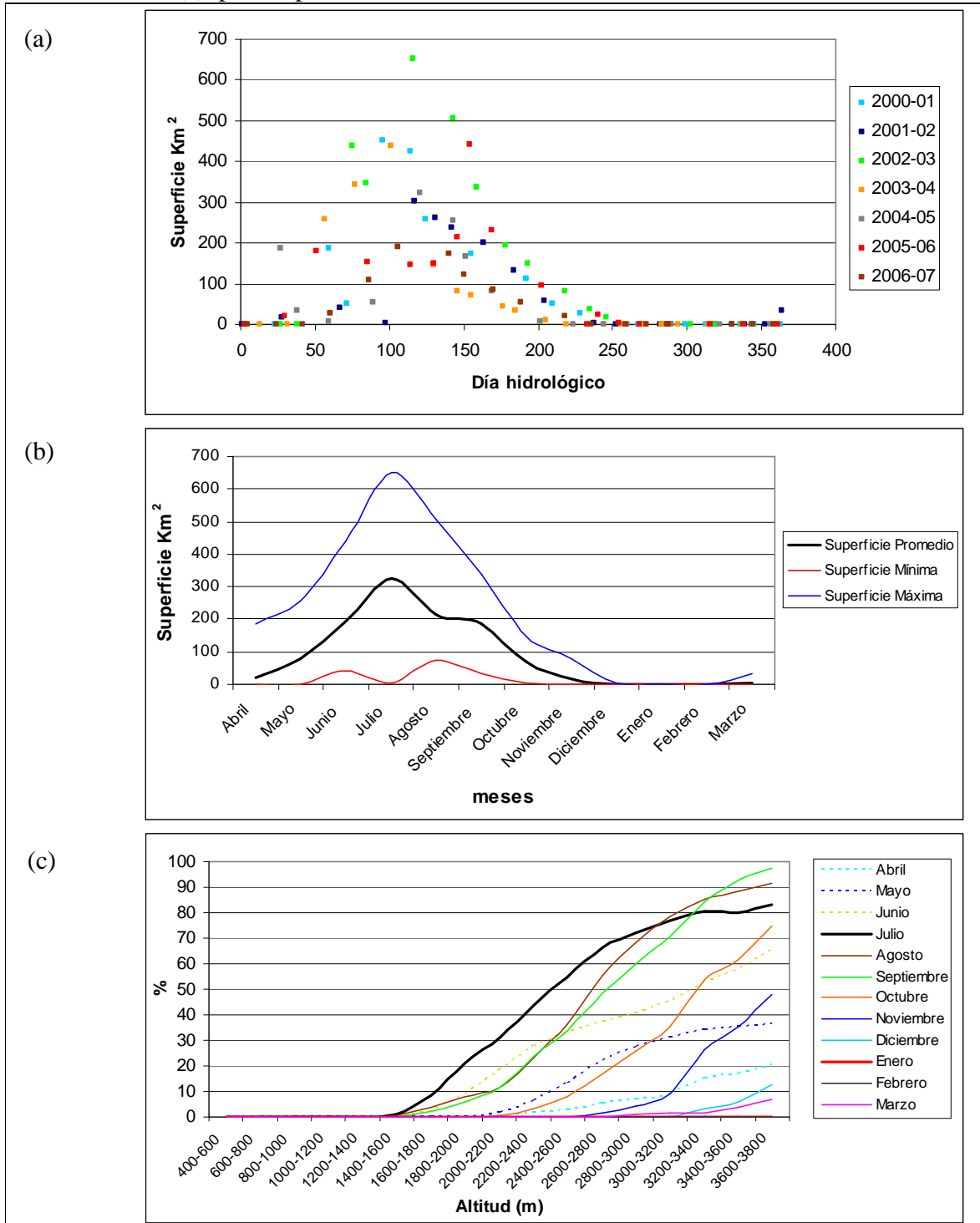




Figura 35. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Petorca

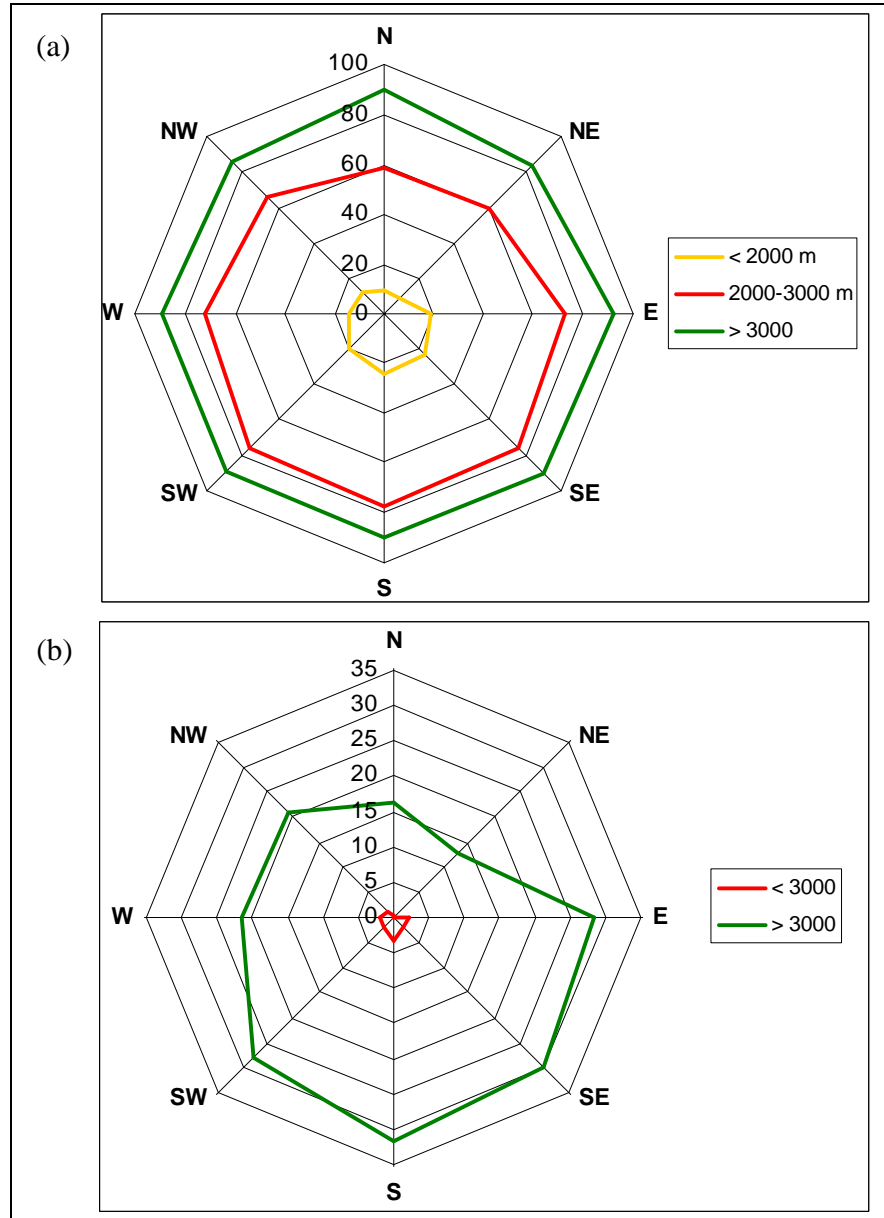




Figura 36. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Ligua

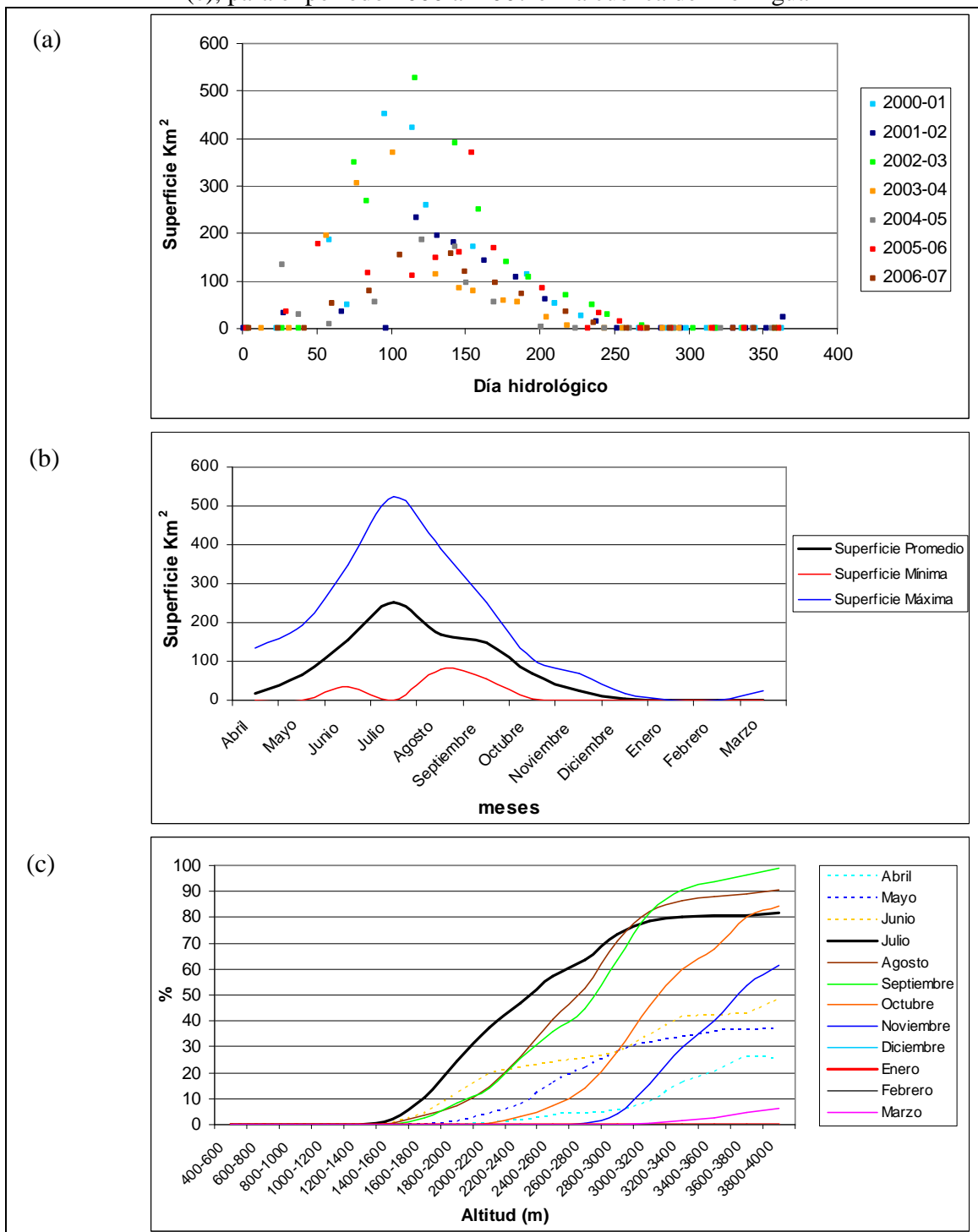




Figura 37. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a) y noviembre (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Ligua

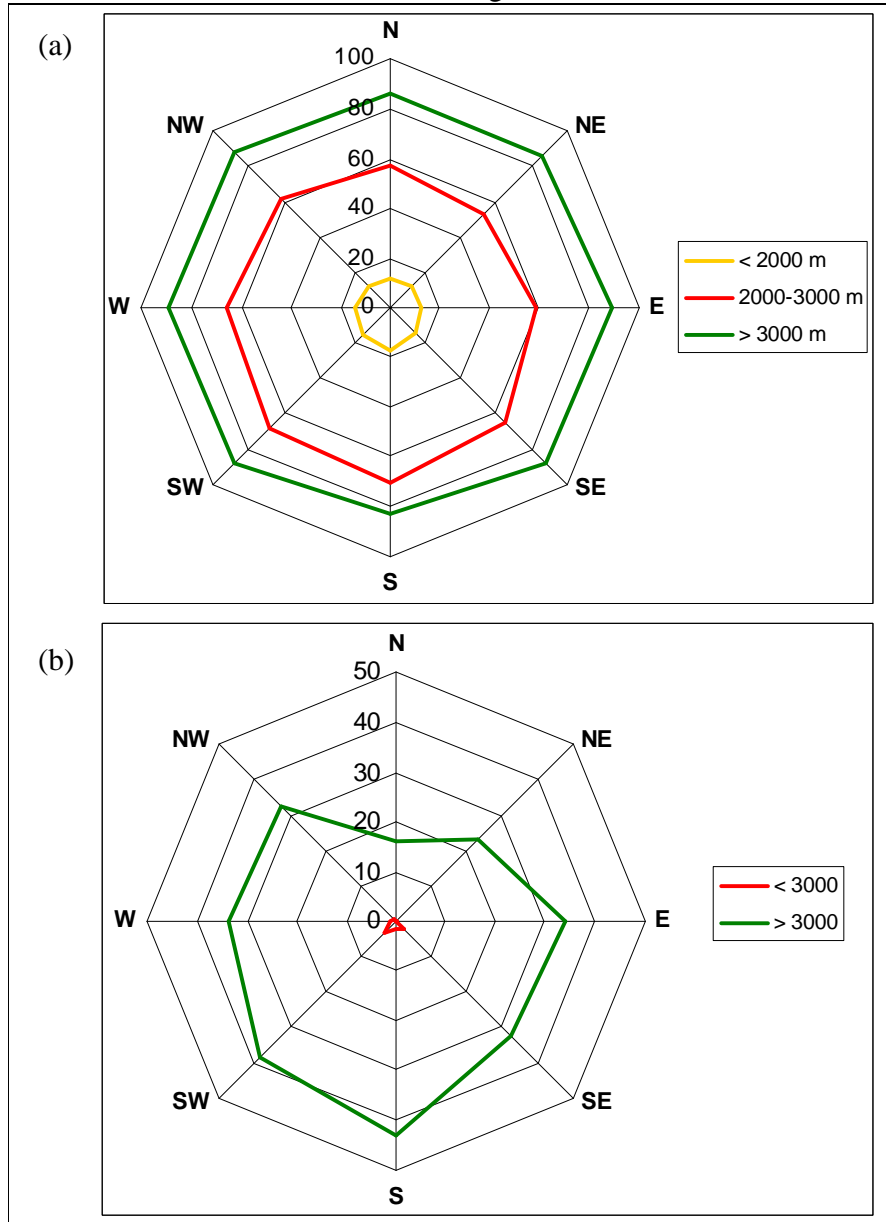




Figura 38. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Aconcagua

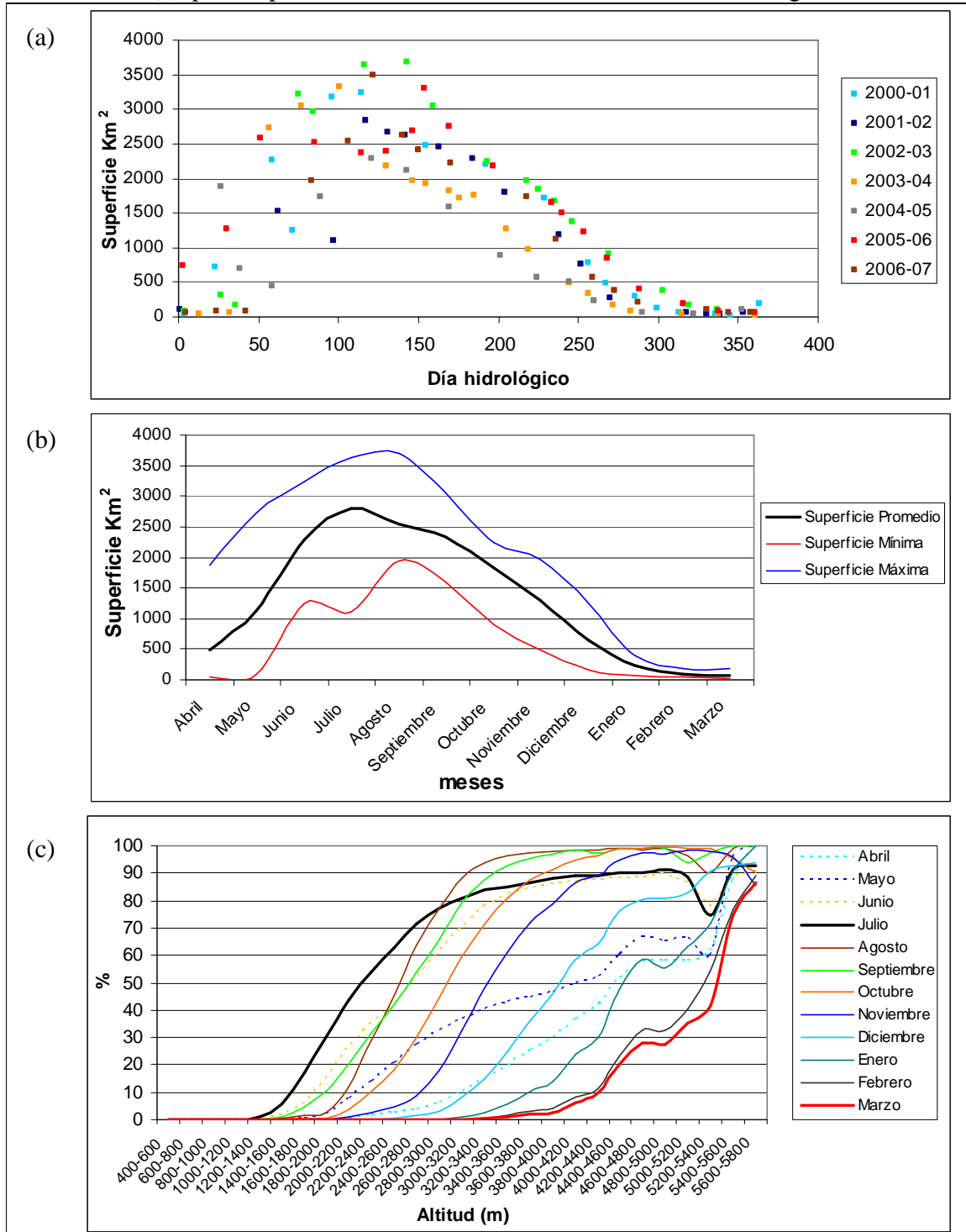




Figura 39. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Aconcagua

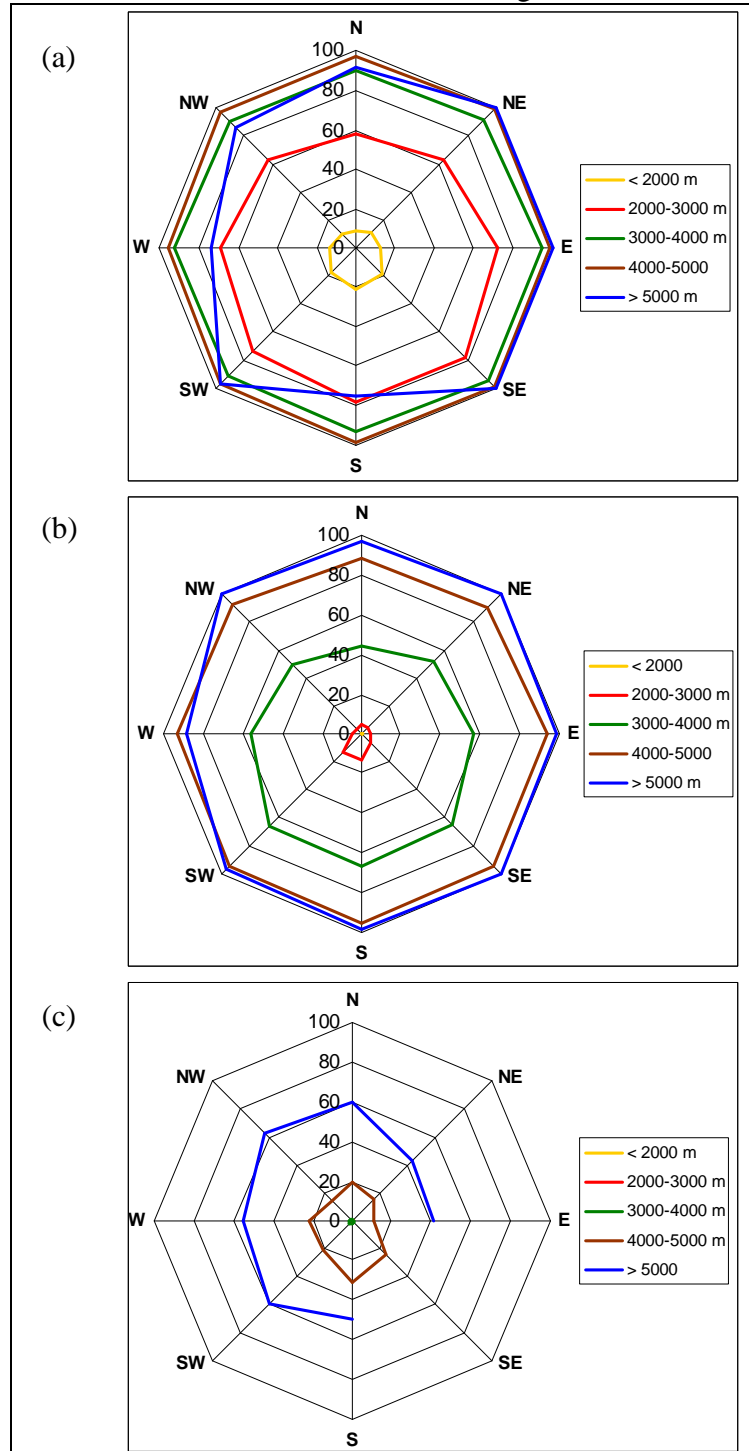




Figura 40. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maipo

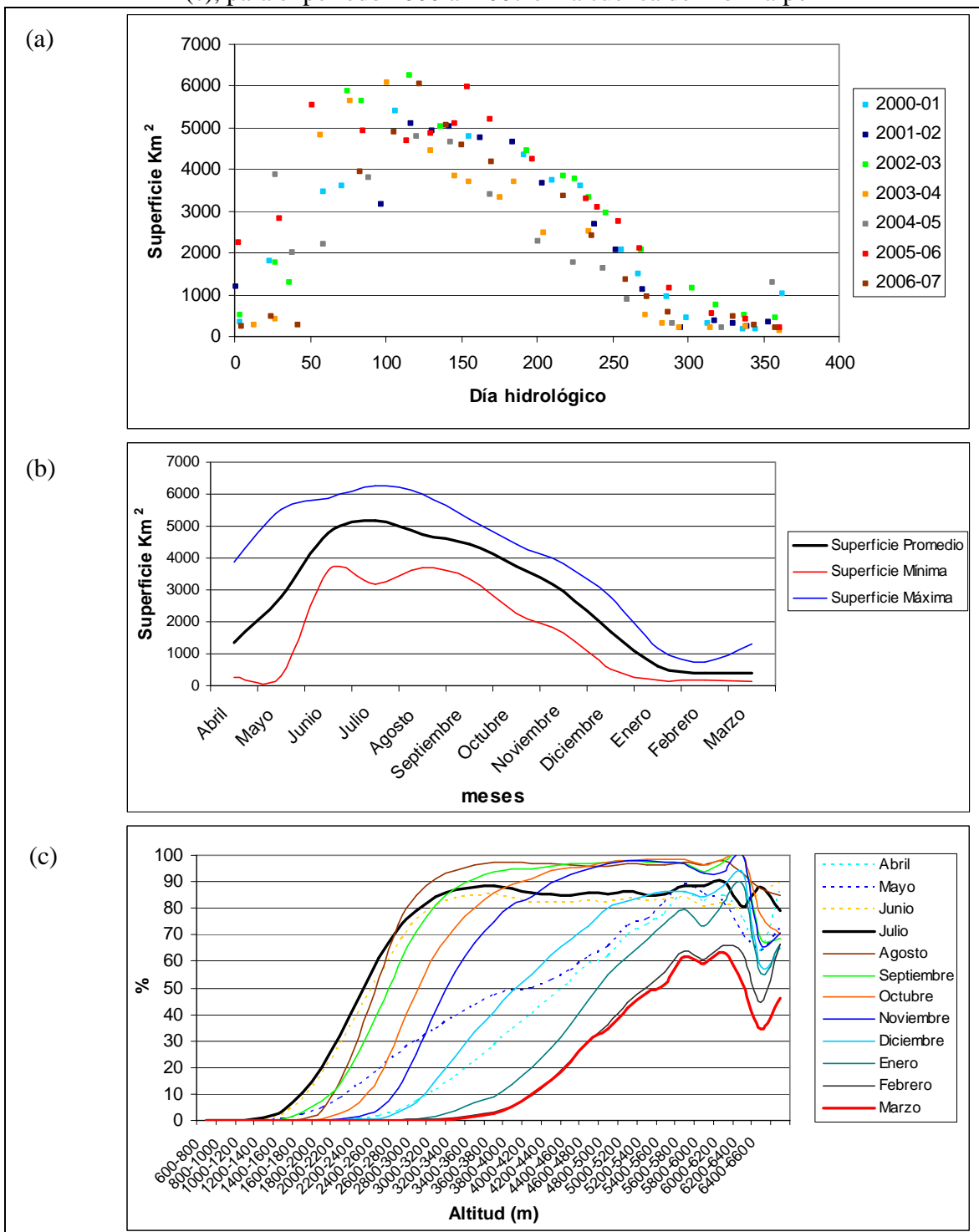




Figura 41. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maipo

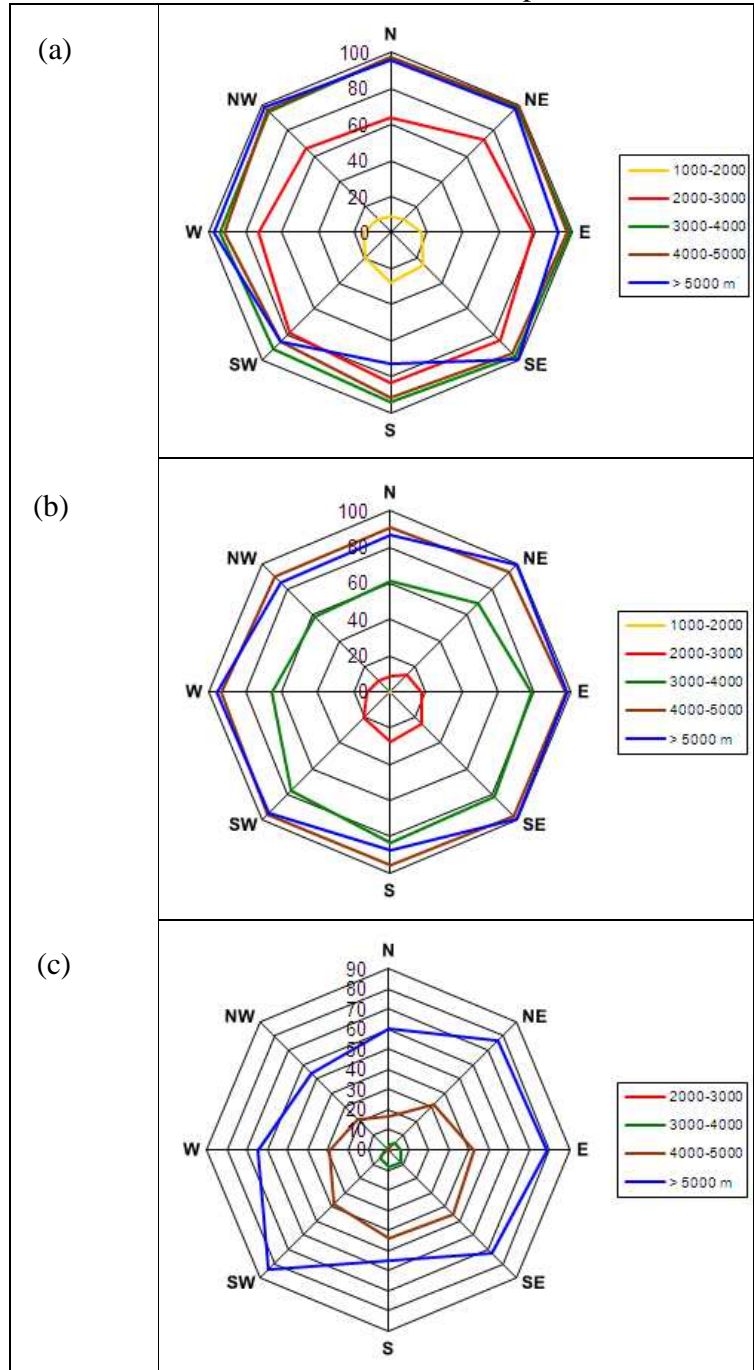




Figura 42. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Rapel

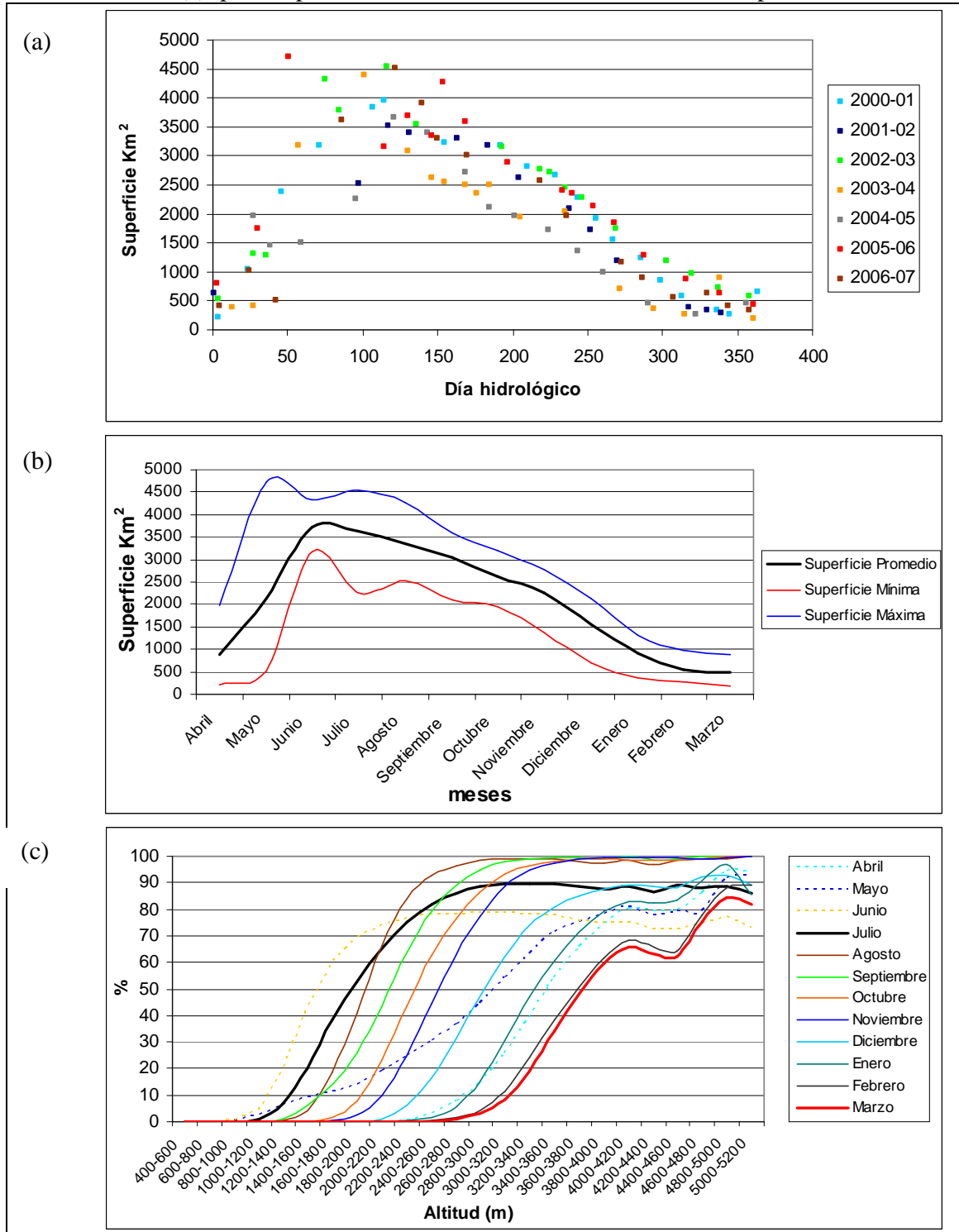




Figura 43. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Rapel

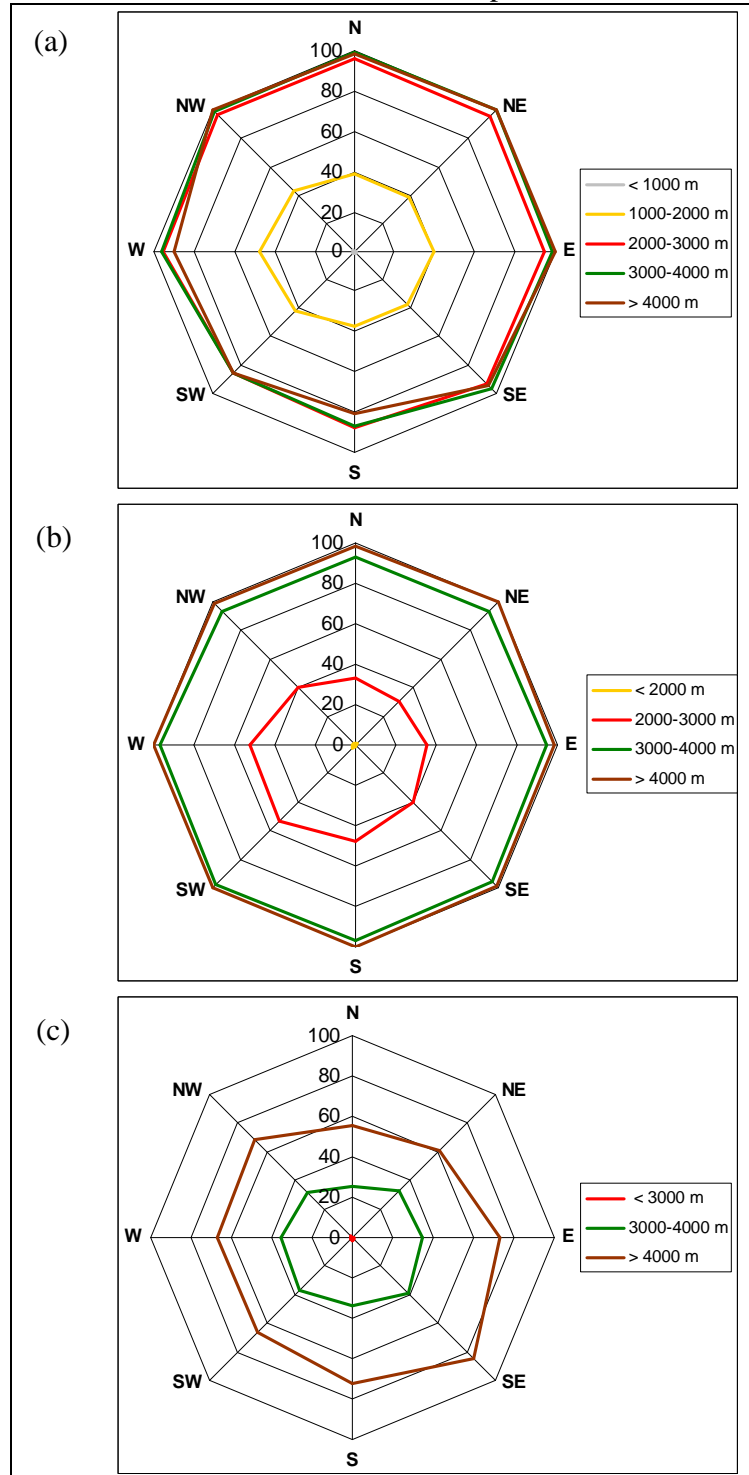




Figura 44. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Mataquito

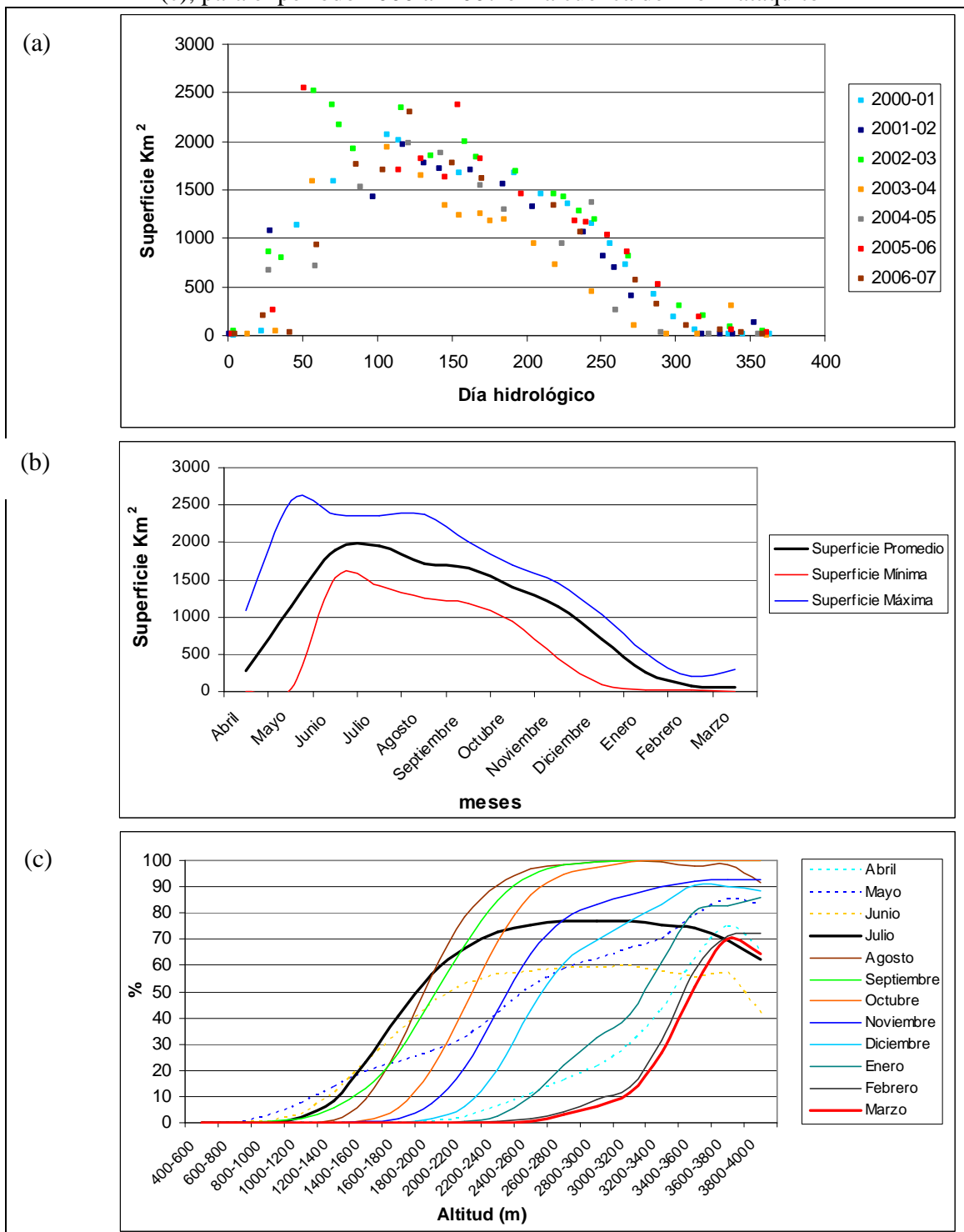




Figura 45. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Mataquito

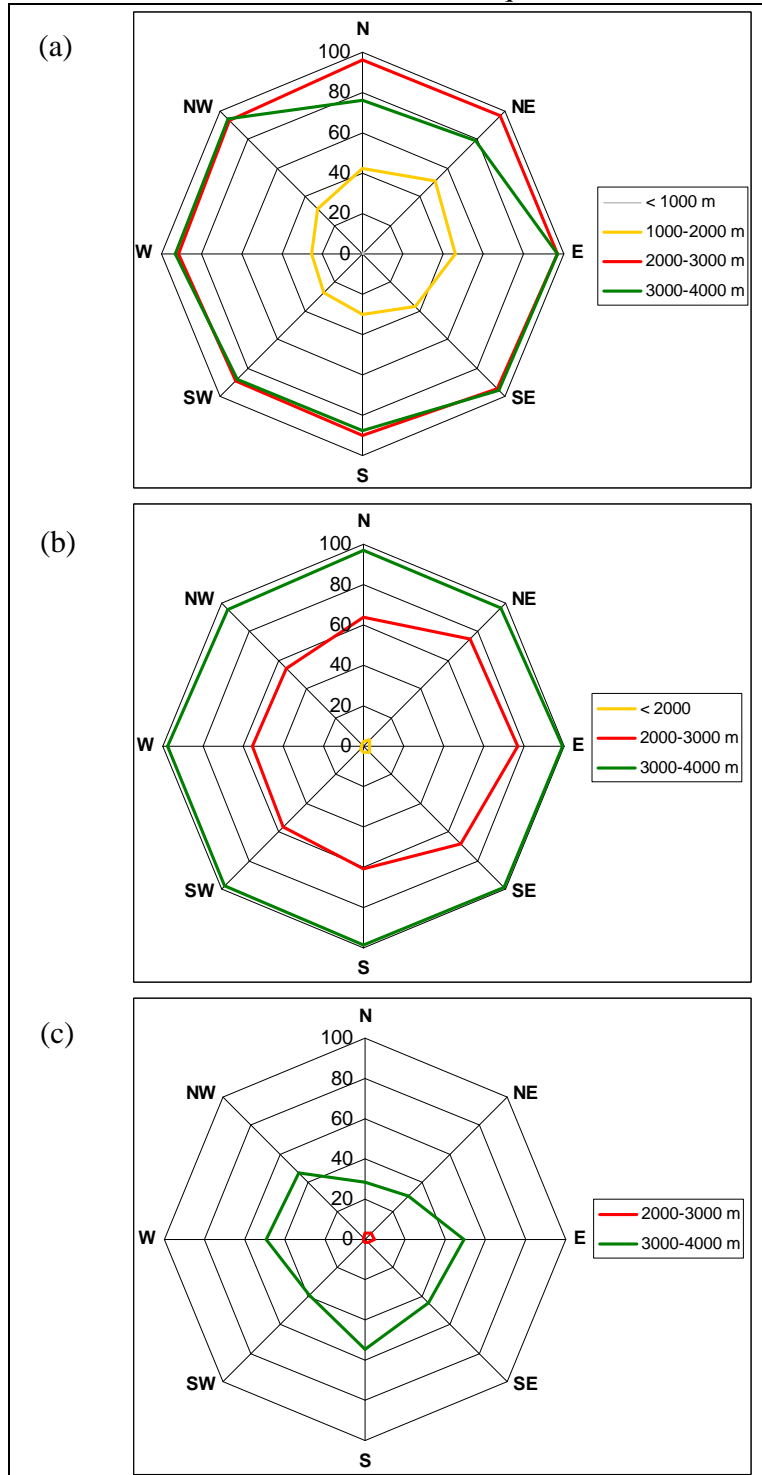




Figura 46. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maule

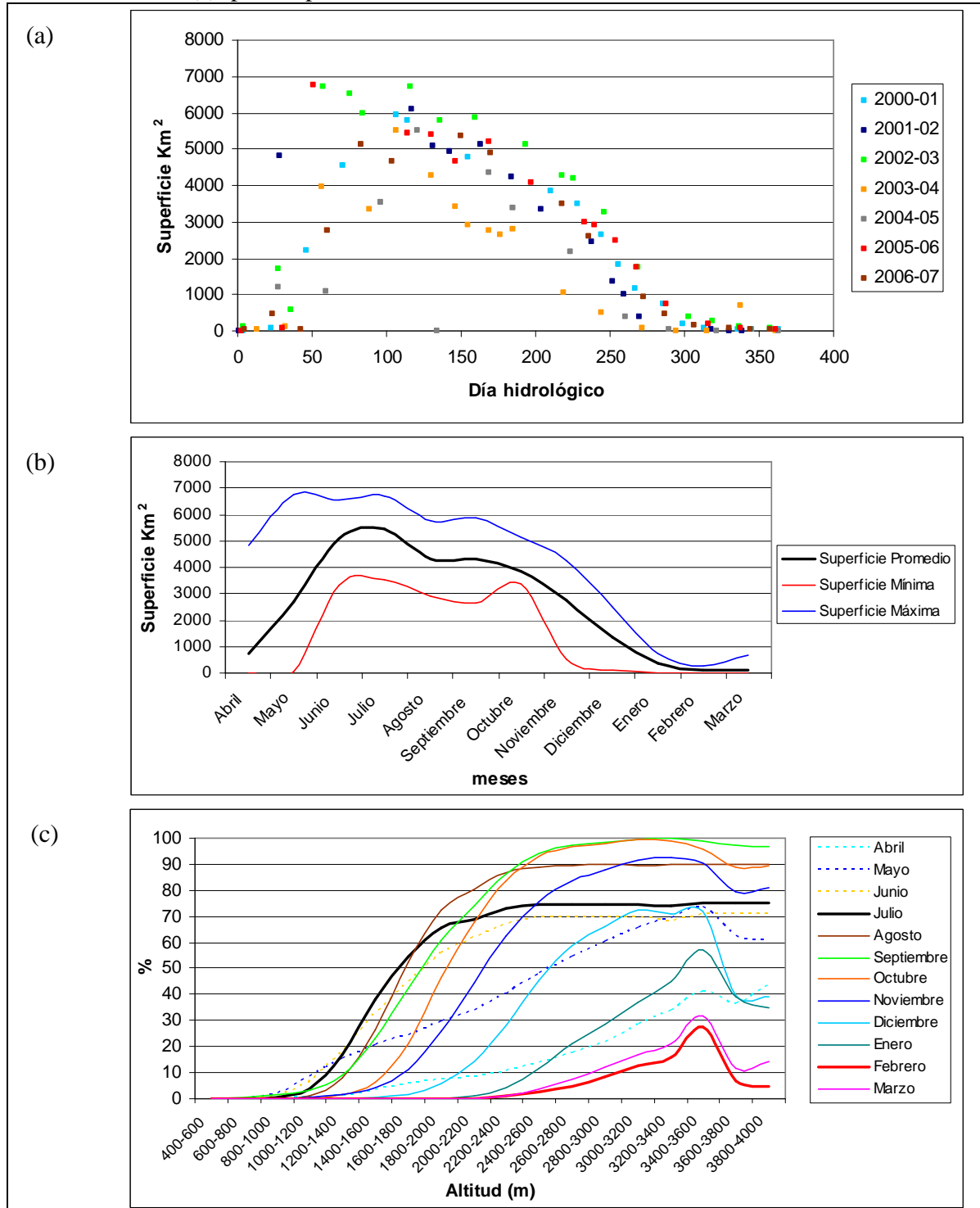




Figura 47. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y febrero (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Maule

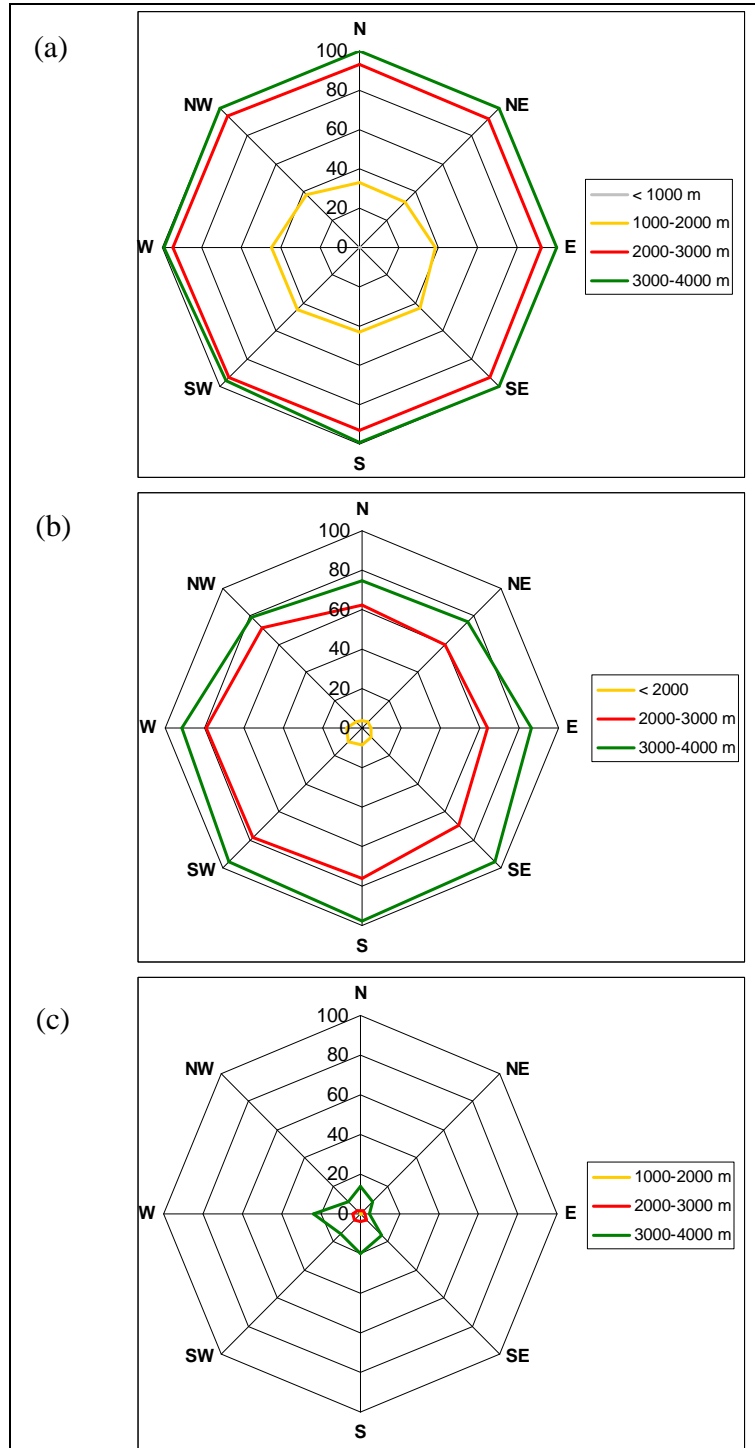




Figura 48. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Itata

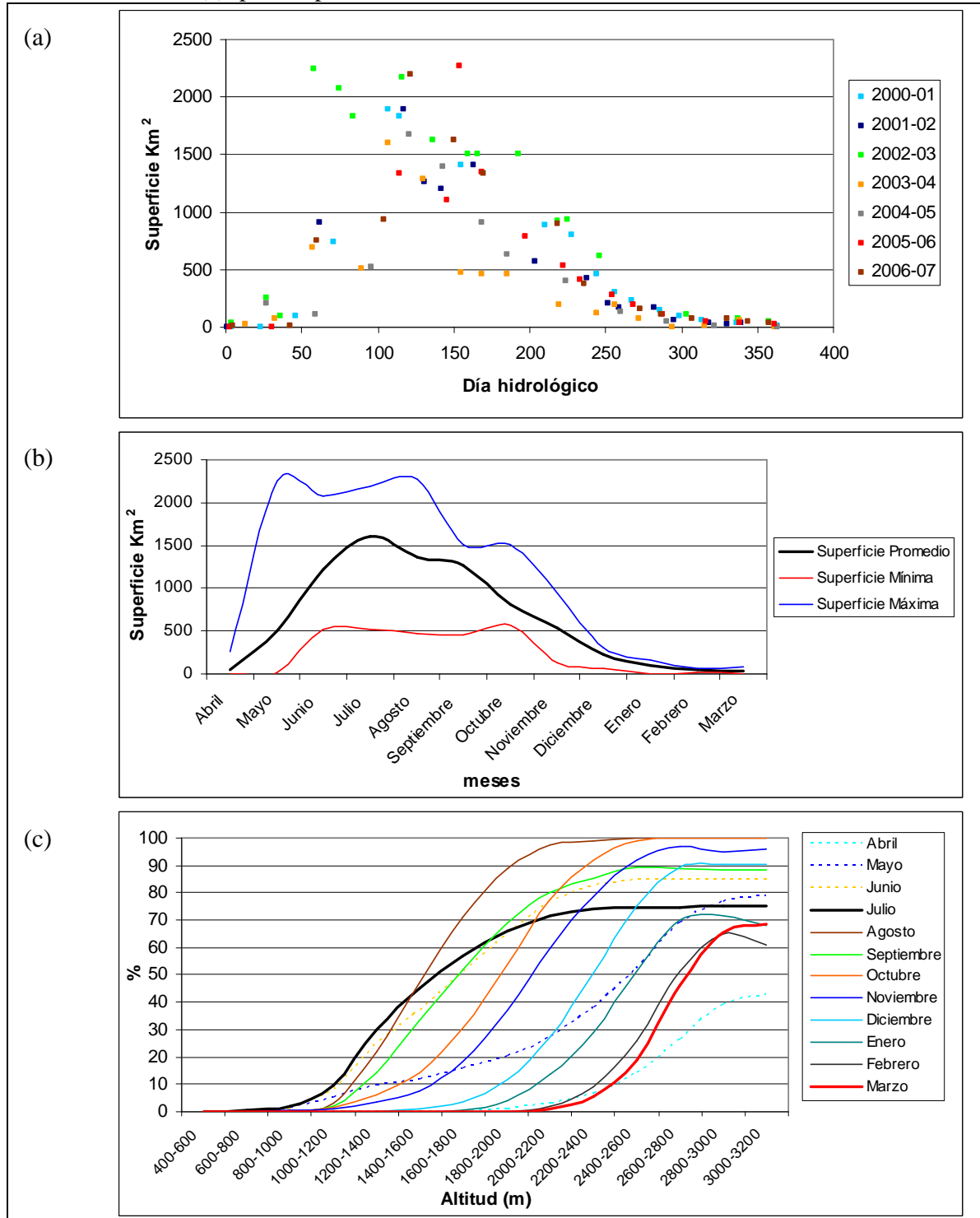




Figura 49. Porcentaje de cobertura nival promedio por exposición cada 1.000 metros de altitud, para los meses de julio (a), noviembre (b) y marzo (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Itata

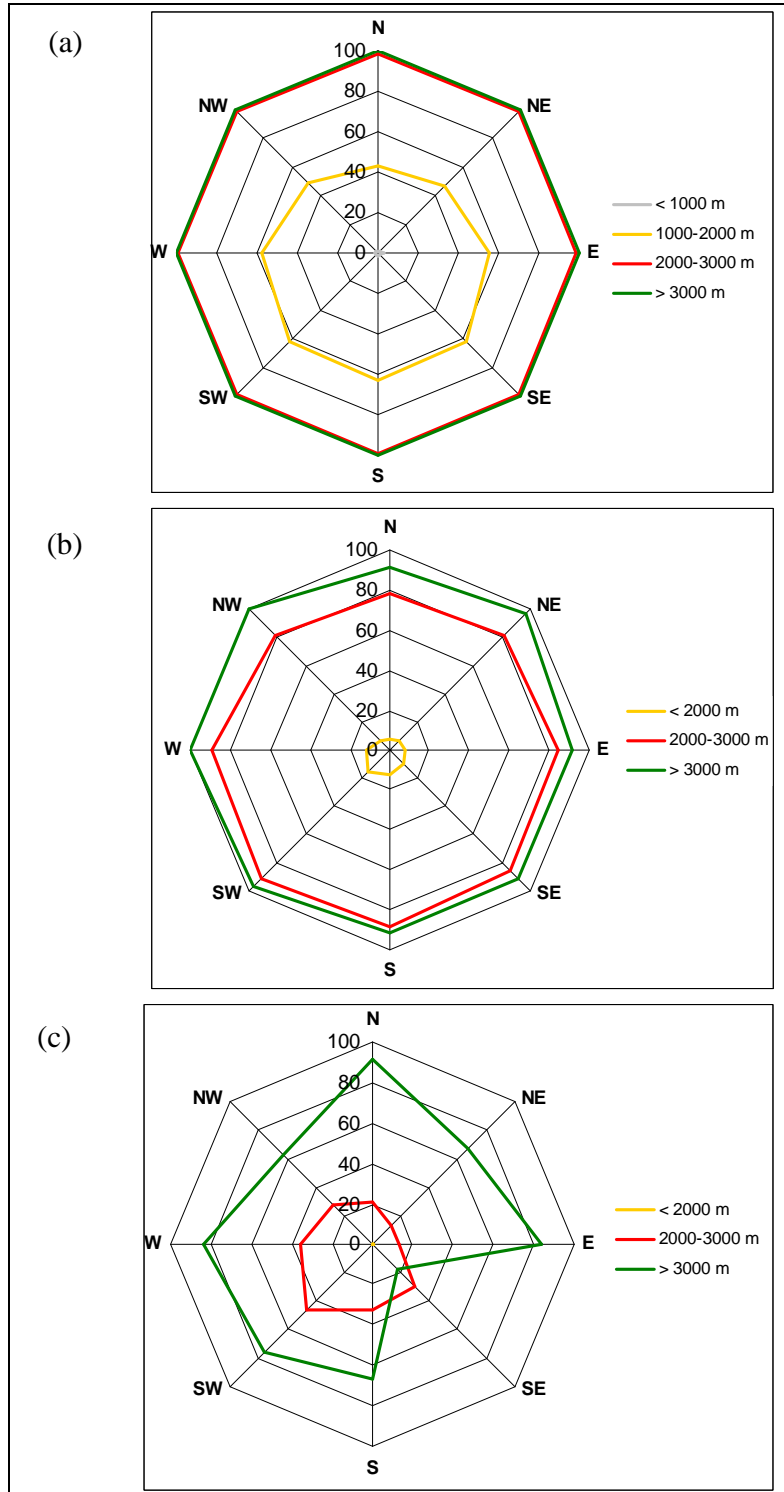




Figura 50. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Biobío

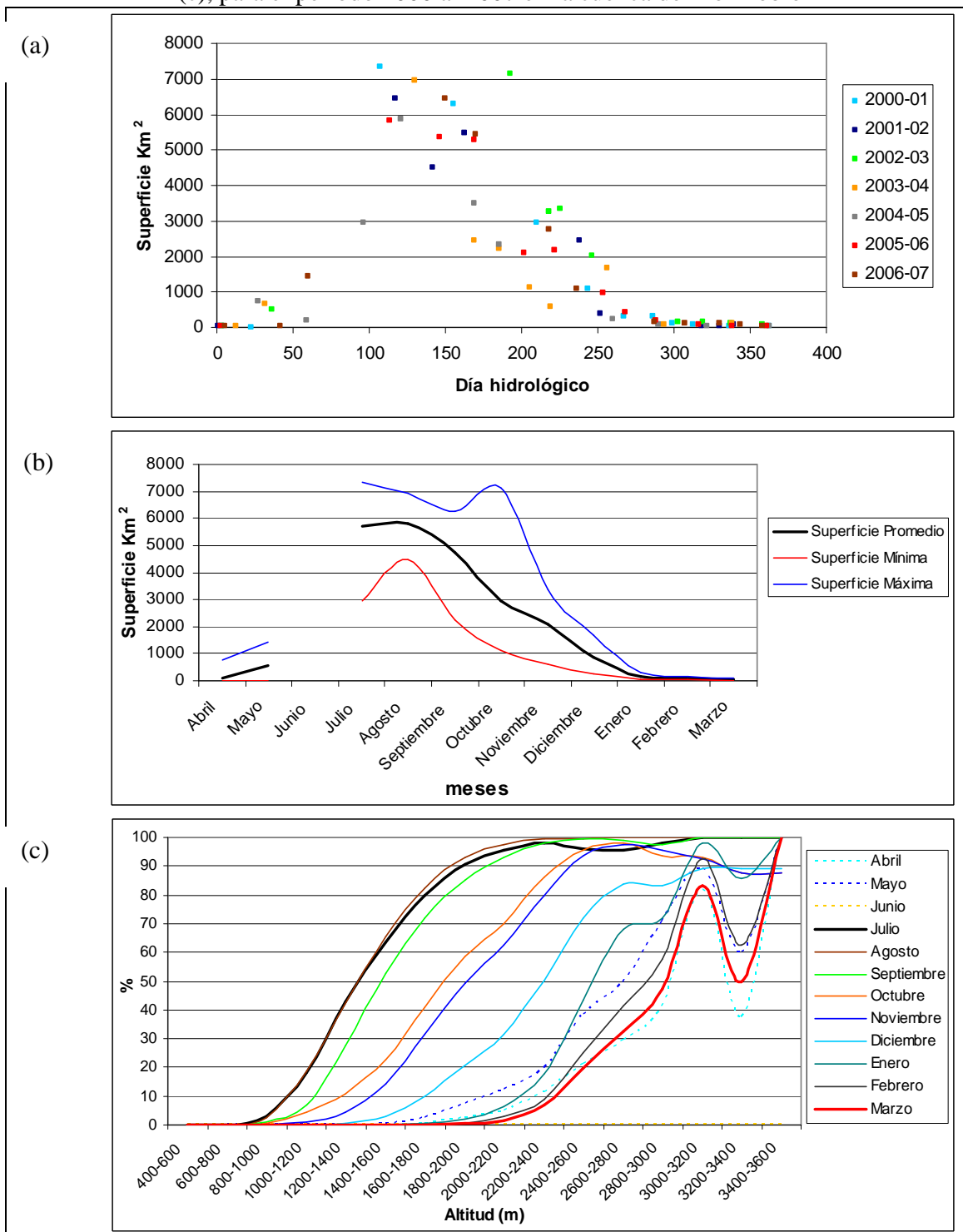




Figura 51. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Imperial

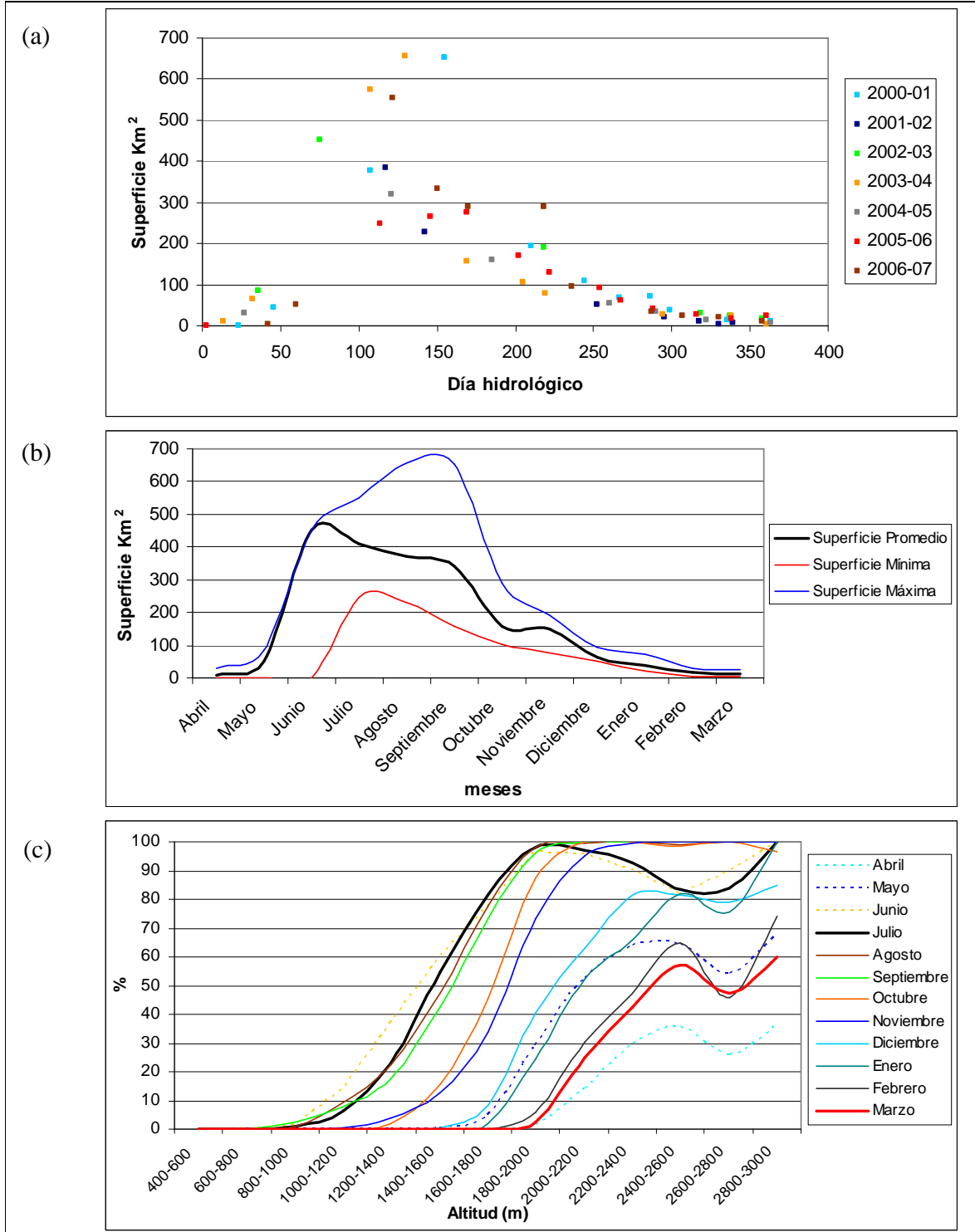




Figura 52. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Toltén

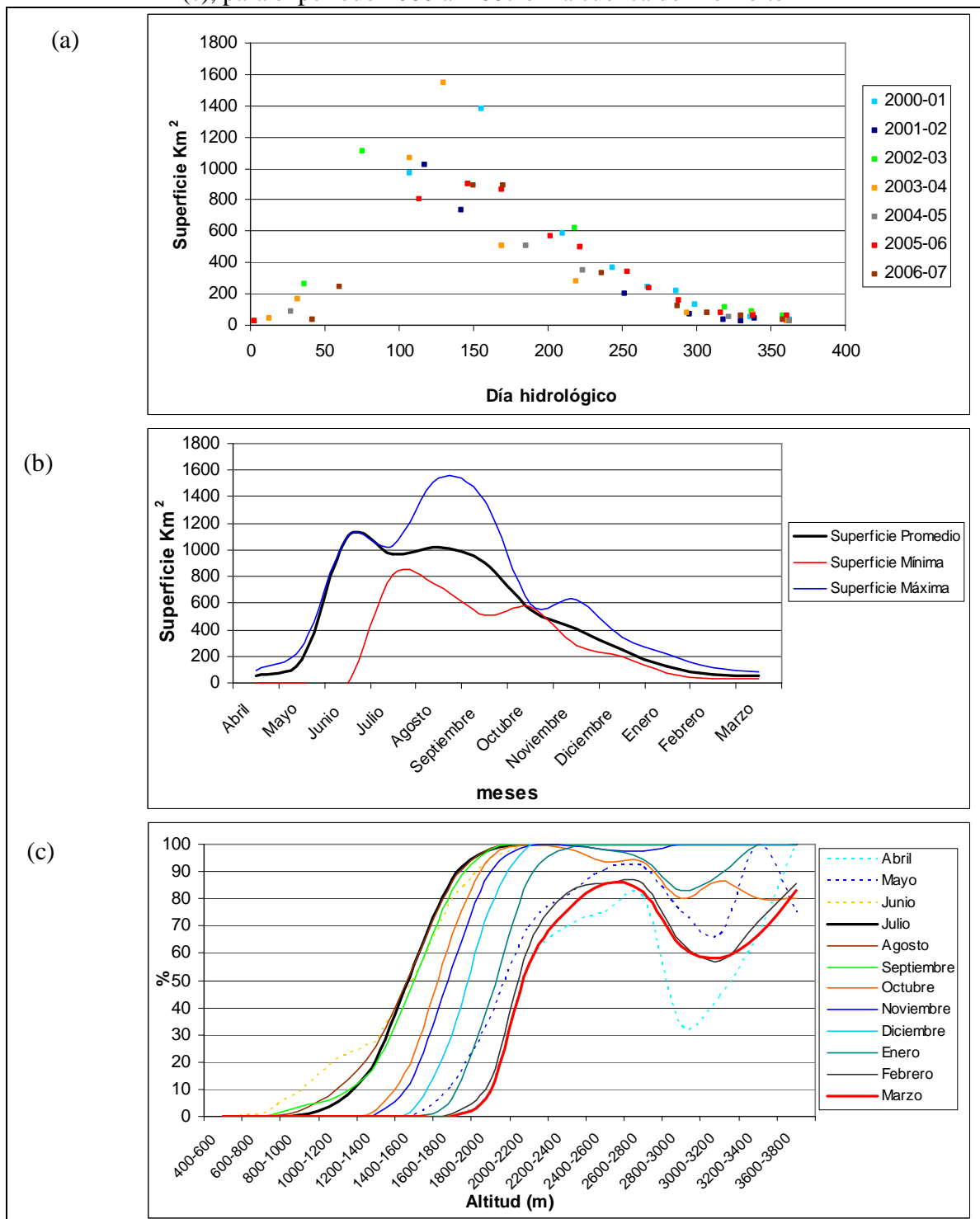




Figura 53. Variación de superficie de cobertura nival (a), superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b) y variaciones porcentuales promedio mensuales por rangos de altitud (c), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Valdivia

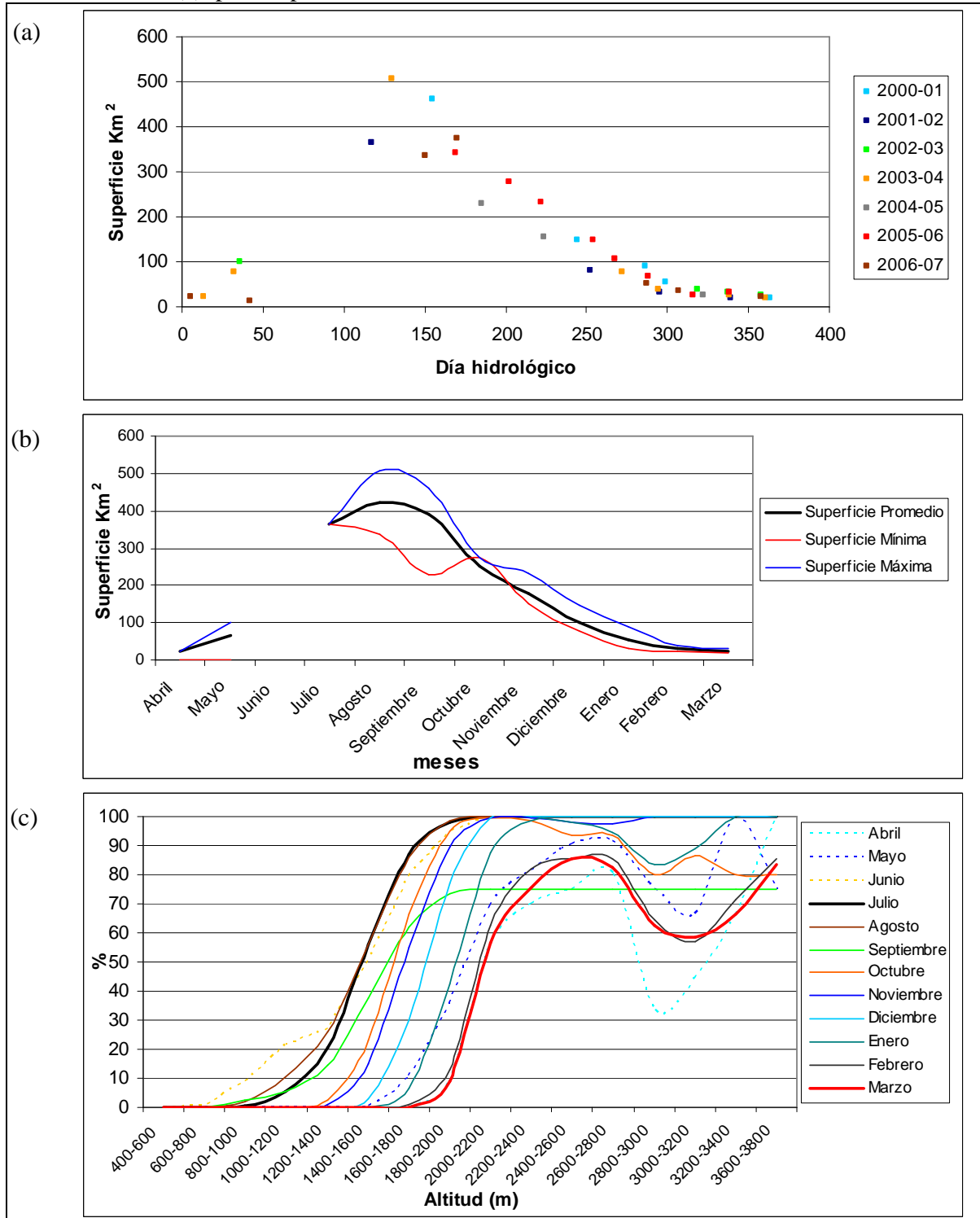




Figura 54. Variación de superficie de cobertura nival (a) y superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Bueno

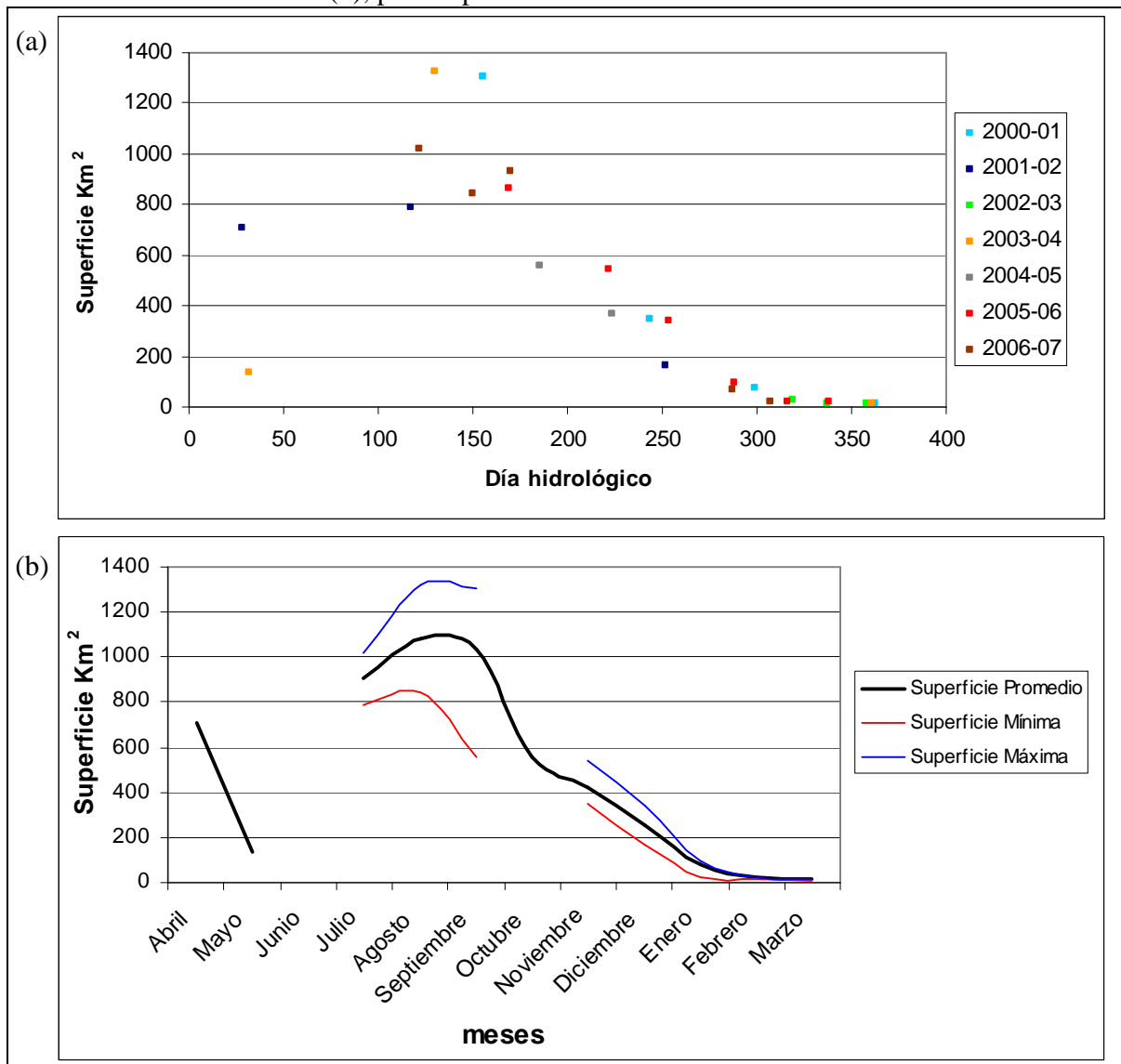




Figura 55. Variación de superficie de cobertura nival (a) y superficies promedio, máxima y mínima mensuales (b), para el periodo 2000 al 2007 en la cuenca del río Petrohué

