

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



**Análisis de eventos de precipitación
en Antofagasta (23.6°S , 70.4°W), Chile**

Matías Eduardo Guzmán Muñoz

Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico

Marzo 2016

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**Análisis de eventos de precipitación
en Antofagasta (23.6°S, 70.4°W), Chile**

Matías Eduardo Guzmán Muñoz

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Profesor guía:

Dr. Aldo Montecinos G.

Comisión:

Dr. Ricardo Muñoz M. (co-guía)

Dr. Juan Inzunza B.



Marzo 2016

*Esta tesis está dedicada
a mi tía Leonor*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, Jacqueline y Manuel, por darme las herramientas para forjar mi futuro. A mis hermanos Isidora y Esteban por su incondicional apoyo y cariño. También agradecer de manera muy especial a Marisella, gracias por ser mi compañera a lo largo de todos estos años de vida universitaria, por tu apoyo, tus consejos, por la diaria motivación y sobretodo por tu amor. A los grandes amigos que hice en la universidad, en especial a Luis y Darío, gracias por estar siempre ahí.

Agradezco a mi profesor guía Aldo Montecinos, por creer en mí, por su disposición, por su constante apoyo y por enseñarme lo que realmente significa ser un hombre de ciencia. Al profesor Ricardo Muñoz por recibirme en el DGF, por su paciencia, sus enseñanzas y por los datos facilitados. Al profesor Dante Figueroa por su preocupación y por ser mucho más que un profesor a lo largo de estos años.

Quisiera agradecer también a todos que de alguna u otra forma contribuyeron a este trabajo y a los que me brindaron su apoyo en todo momento.

Por último agradecer al proyecto Fondecyt 1130111 por el financiamiento y a Juan Quintana de la Dirección Meteorológica de Chile por facilitarme los datos de precipitación en el norte de Chile.

Resumen

En el presente trabajo se busca realizar un análisis de la precipitación sobre Antofagasta y la influencia sobre la capa límite durante el desarrollo de un evento. Esta localidad está sometida durante todo el año a condiciones de gran estabilidad atmosférica debido a la influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS). Durante el periodo 1970-2014 se registraron sólo 97 eventos de precipitación en esta zona, de los cuales aproximadamente un 70 % precipitó menos de 1 *mm* por día, lo que indica lo escasa e irregular que es la lluvia en esta región del norte de Chile.

Para poder realizar el análisis propuesto, se construyó una base de datos que contiene información sobre la precipitación registrada en la estación Cerro Moreno ($23.6^{\circ}S$, $70.4^{\circ}W$), información vertical de distintas variables meteorológicas y termodinámicas captadas en lanzamientos de radiosondas y observaciones del tiempo sinóptico presente durante el desarrollo de un evento de precipitación.

Será necesario estudiar la climatología de Antofagasta, determinar y analizar el comportamiento de las variables meteorológicas ante un evento de precipitación, así como también establecer una configuración sinóptica para éstos y analizar su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Parte de los análisis que componen este trabajo son la descripción climatológica de la precipitación en Antofagasta, la elaboración de un análisis de “simultaneidad” mediante la probabilidad condicional de ocurrencia de eventos de precipitación en distintas localidades del norte de Chile (Arica, Iquique, Calama, entre otros) con el fin de encontrar una relación espacial y temporal entre ellos. El análisis de perfiles verticales de distintas variables termodinámicas cuyo comportamiento determina la ocurrencia de ciertos fenómenos atmosféricos, como por ejemplo, perfiles verticales de temperatura potencial equivalente y su relación con la inestabilidad potencial. La descripción y análisis de la variación de la altura de la base de las nubes, del nivel de condensación por ascenso y de la altura de la base de la inversión durante el desarrollo de precipitación. Un análisis de agrupamiento mediante el método K-means, usando la altura geopotencial en 500 hPa como atributo principal y, a partir de éste, un análisis de compuestos. La elaboración de un ciclo diario del comportamiento de la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre durante el desarrollo de un evento de precipitación.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.	3
1.1.1. Relación de eventos de precipitación en Antofagasta con eventos ENOS.	3
1.1.2. Variación interdecadal de precipitaciones.	3
1.1.3. Características de la nubosidad en Antofagasta ante un sistema frontal.	4
1.1.4. Inestabilidad Potencial.	4
1.1.5. Sobre el paso de un sistema frontal en el norte de Chile.	5
1.2. Capa Límite.	5
1.3. Hipótesis.	6
1.4. Objetivos.	6
1.4.1. Objetivo general.	6
1.4.2. Objetivos específicos.	6
2. Metodología	7
2.1. Set de datos.	7
2.2. Comparación entre datos de radiosonda y datos de reanálisis NCEP-CFSR.	9
2.3. Análisis de Simultaneidad.	11
2.4. Análisis de perfiles verticales de temperatura.	12
2.5. Análisis de Agrupamiento.	14
2.5.1. Método K-means	14
2.6. Análisis de Compuestos.	15
3. Resultados	16
3.1. Análisis climatológico de la precipitación en Antofagasta.	16
3.1.1. Relación de eventos de precipitación en Antofagasta con eventos El Niño.	18
3.2. Resultados de la comparación entre datos de radiosondas y datos NCEP-CFSR.	21
3.3. Análisis de Simultaneidad.	24
3.4. Análisis de eventos de precipitación en Antofagasta.	30
3.4.1. Ciclo diario de la precipitación.	30

3.4.2.	Perfiles verticales de temperatura.	33
3.4.3.	Análisis de Agrupamiento.	37
3.4.3.1.	Ciclo diario.	41
3.4.4.	Espesor de la nubosidad.	43
3.5.	Análisis de Compuestos.	46
4.	Discusión y Conclusiones.	57
4.0.1.	Análisis de la precipitación en Antofagasta.	57
4.0.2.	Eventos El Niño y Eventos de precipitación en la costa de la región de Antofagasta.	57
4.0.3.	Análisis de eventos de precipitación en el Norte Grande de Chile. . .	58
4.0.4.	Condiciones asociadas a un evento de precipitación.	58
4.0.5.	Comportamiento de la capa límite.	59

Índice de figuras

3.1.	<i>Precipitación acumulada total en cada mes entre 1970-2014 en Antofagasta y cantidad de días totales que precipitó en el mismo periodo de tiempo para cada mes respectivamente (línea solida) (Base de datos: Dirección Meteorológica de Chile).</i>	16
3.2.	<i>Distribución de la frecuencia acumulada empírica de los eventos de precipitación en Antofagasta entre enero de 1970 y diciembre de 2014 (línea azul).</i>	17
3.3.	<i>Panel superior: Precipitación acumulada de cada mes y ciclo anual de la temperatura en Antofagasta 1970-2014. Panel inferior: Precipitación acumulada de cada mes y ciclo anual de la humedad relativa en Antofagasta 1970-2014.</i>	18
3.4.	<i>Precipitación anual total en Antofagasta entre 1970-2014 (histograma), en relación a la ocurrencia de eventos El Niño (puntos rojos) y la media anual de anomalía superficial del mar (línea de color negro) (Base de datos: NOAA).</i>	19
3.5.	<i>Precipitación mensual total (histogramas) durante el desarrollo de eventos El Niño para los años 72-73 (a), 82-83 (b), 86-87 (c), 91-92 (d), 94-95 (e), 97-98 (f), 02-03 (g) y 09-10 (h). La variación de la anomalía de temperatura es representada por la línea roja.</i>	20
3.6.	<i>Perfil de temperatura media en Antofagasta entre 1979 - 2010 a partir de datos de radiosondas reales (línea roja) y a partir del reanálisis NCEP-CFSR (línea azul).</i>	21
3.7.	<i>Raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). El RMSE es mostrado para todos los meses.</i>	22
3.8.	<i>BIAS o sesgo entre los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y de radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). El BIAS es mostrado para todos los meses.</i>	22

3.9. Comparación de la desviación estandar de los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). La comparación es mostrada para todos los meses.	23
3.10. Coeficiente de correlación entre los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). La correlación es mostrada para todos los meses.	23
3.11. Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta (23.4° S, 70.4° W) para 66 eventos que registraron precipitaciones mayores o iguales a 0,1 mm y menores o iguales a 1 mm durante el periodo 1970-2012.	31
3.12. Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta (23.4° S, 70.4° W) para 23 eventos que registraron precipitaciones mayores a 1 mm y menores o iguales a 5 mm en el periodo 1970-2012.	31
3.13. Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta (23.4° S, 70.4° W) para 5 eventos que registraron precipitaciones mayores a 5 mm en el periodo 1970-2012.	32
3.14. Perfiles verticales de temperatura en 1200 UTC de cada día donde se registró precipitación en Cerro Moreno, Antofagasta.	33
3.15. Panel izquierdo: Perfiles verticales de temperatura de eventos sin presencia de la capa de inversión térmica. Panel derecho: Perfiles verticales de temperatura de eventos que presentan una capa de inversión térmica. El periodo considerado en ambos paneles es 1970 - 2014.	34
3.16. Panel izquierdo: Perfiles verticales de temperatura de eventos sin presencia de la capa de inversión térmica. Panel derecho: Distribución de la frecuencia de precipitaciones según la cantidad de lluvia registrada por evento. El periodo considerado en ambos paneles es 1970 - 2014.	35
3.17. Panel izquierdo: Perfiles verticales de temperatura de eventos que presentan una capa de inversión térmica. Panel derecho: Distribución de la frecuencia de precipitaciones según la cantidad de lluvia registrada por evento. El periodo considerado en ambos paneles es 1970 - 2014.	35
3.18. Clusters obtenidos por el método K-means usando como atributo campos de altura geopotencial en 500 hPa. Las áreas sombreadas muestran el campo promedio de altura geopotencial para cada uno de los grupos. En esta figura se muestran los clusters 1(a),2(b),3(c) y 4(d). El triangulo de color negro representa la ubicación de Antofagasta.	37

3.19. Clusters obtenidos por el método K-means usando como atributo campos de altura geopotencial en 500 hPa. Las áreas sombreadas muestran el campo promedio de altura geopotencial para cada uno de los grupos. En esta figura se muestran los clusters 5(e),6(f),7(h) y 8(h). El triangulo de color negro representa la ubicación de Antofagasta.	38
3.20. Variabilidad interanual de los eventos de precipitación y la cantidad respectiva de agua caída en cada evento de Antofagasta entre 1970 y 2014 de los clusters 1,2,3 y 4.	39
3.21. Variabilidad interanual de los eventos de precipitación y la cantidad respectiva de agua caída en cada evento de Antofagasta entre 1970 y 2014 de los clusters 5,6,7 y 8.	39
3.22. Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta (23.4° S, 70.4° W) para los eventos correspondientes al cluster 1(a), cluster 2(b), cluster 3(c) y cluster 4(d) para el periodo 1970 - 2012.	41
3.23. Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta (23.4° S, 70.4° W) para los eventos correspondientes al cluster 5(e), cluster 6(f), cluster 7(g) y cluster 8(h) para el periodo 1970 - 2012.	42
3.24. Percentiles 10, 50 y 90 de los datos de altura de la base de la inversión por subsidencia (eje y) y de la precipitación correspondiente (eje x) a los eventos que pertenecen a cada uno de los ocho clusters obtenidos para el periodo 1970-2013. Los percentiles 10 y 90 corresponden a los extremos de las líneas horizontales (precipitación) y verticales (base de la inversión), mientras que el 50 se muestra como la intersección de las líneas verticales y horizontales.	44
3.25. Percentiles 10, 50 y 90 de los datos de altura de la base de la nubosidad (eje y) y de la precipitación correspondiente (eje x) a los eventos que pertenecen a cada uno de los ocho clusters obtenidos para el periodo 1970-2013. Los percentiles 10 y 90 corresponden a los extremos de las líneas horizontales (precipitación) y verticales (base de la nubosidad), mientras que el 50 se muestra como la intersección de las líneas verticales y horizontales.	44
3.26. Percentiles 10, 50 y 90 del espesor resultante de la nubosidad (eje y) y de la precipitación correspondiente (eje x) a los eventos que pertenecen a cada uno de los ocho clusters obtenidos para el periodo 1970-2013. Los percentiles 10 y 90 corresponden a los extremos de las líneas horizontales (precipitación) y verticales (espesor), mientras que el 50 se muestra como la intersección de las líneas verticales y horizontales.	45

3.27. <i>Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 1, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.</i>	49
3.28. <i>Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 2, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.</i>	50
3.29. <i>Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 3, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.</i>	51
3.30. <i>Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 4, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.</i>	52
3.31. <i>Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 5, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.</i>	53
3.32. <i>Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 6, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.</i>	54

3.33. *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 7, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.* 55

3.34. *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 8, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.* 56

Índice de cuadros

3.1. Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la primera categoría ($0,1mm \leq pp \leq 0,2mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.	25
3.2. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de la primera categoría.	25
3.3. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la primera categoría.	25
3.4. Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la segunda categoría ($0,2mm < pp \leq 0,6mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.	26
3.5. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de la segunda categoría.	26
3.6. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la segunda categoría.	26
3.7. Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la tercera categoría ($0,6mm < pp \leq 1,2mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.	27
3.8. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de precipitación de la tercera categoría.	27
3.9. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la tercera categoría.	27
3.10. Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la cuarta categoría ($pp \geq 1,2mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.	28

3.11. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de precipitación de la cuarta categoría.	28
3.12. Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la cuarta categoría.	28
3.13. Categorización de las claves disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).	30
3.14. Distribución mensual de eventos de precipitación correspondientes a cada uno de los 8 clusters.	38
1. Claves 00 - 19 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).	61
2. Claves 20 - 39 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).	62
3. Claves 40 - 59 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).	63
4. Claves 60 - 79 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).	64
5. Claves 80 - 99 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).	65
6. Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 1970 - 1976.	66
7. Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 1977 - 1987.	67
8. Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 1987 - 2005.	68
9. Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 2006 - 2012.	69

Capítulo 1

Introducción

Chile es un país con una extensa amplitud latitudinal que se extiende desde 18°S hasta 56°S con 6435 km de línea de costa de norte a sur, sin embargo, su extensión meridional es tal que no existe un punto del territorio que esté alejado a más de 330 kilómetros del mar. Su particular geografía hacen que el relieve, principalmente la presencia de la Cordillera de Los Andes y la influencia del océano Pacífico sean factores claves que permiten la existencia de una gran variedad de climas distribuidos en todo lo largo del país (García, 1982). De los elementos climáticos, la precipitación y la temperatura son, sin duda, los más importantes debido a que se trata de factores muy sensibles para el ser humano producto de la relación que tienen con la vegetación, los recursos hídricos, la agricultura, los distintos tipos de suelo y con otros aspectos relacionados con los habitantes de cada lugar.

La precipitación en Chile presenta una gran variabilidad en su distribución, tanto espacial como temporal. El norte del país es, probablemente, la zona más seca en el mundo; mientras que el sur es excesivamente húmedo y lluvioso, y se considera como una de las regiones extratropicales más húmedas del planeta. Entre 30°S y 40°S nos encontramos con una zona de transición, donde la precipitación anual media se incrementa a medida que avanzamos hacia el sur desde valores menores a 150 *mm* a valores que superan los 3.000 *mm* de agua caída (Miller, 1976). De acuerdo a la situación meteorológica que produce la caída de precipitación, se pueden distinguir tres tipos de regímenes en Chile: el primero de ellos, denominado como “de origen frontal”, se presenta a partir de 26°S hacia el sur; el segundo corresponde al ubicado en el altiplano chileno, el cual es de origen convectivo, y que está comprendido entre 18°S y 24°S, y finalmente, y que presenta la menor cantidad de agua precipitada, es el ubicado en la costa centro-norte del país, el cual está asociado a un tipo de nubosidad característica de esta zona que se desarrolla en el borde oriental del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur o ASPS (Climatología de Chile, 2001). En este trabajo se prestará mayor atención a la zona que está influenciada por este tipo de régimen pluviométrico, específicamente, en la ciudad de Antofagasta.

Antofagasta (23.6°S, 70.4°W) es la capital regional de la segunda región de Chile, y su cercanía al mar junto a las alturas del relieve al interior de la región contribuyen a crear

variaciones climáticas dispuestas en franjas longitudinales. Las precipitaciones sobre esta zona son escasas e irregulares y tienen una media anual inferior a 4 *mm*, incluyendo años en los que prácticamente no se registró agua caída. La presencia durante todo el año del ASPS es lo que somete a esta región costera a condiciones de gran estabilidad atmosférica y genera intensos procesos de surgencia en el borde oriental de éste. Esta estabilidad es lo que limita el desplazamiento hacia el norte de perturbaciones frontales que provienen del cinturón de los vientos del oeste en latitudes medias y altas, por lo que éstas rara vez se prolongan más allá de latitudes al norte de 31°S y sólo ocasionalmente, en invierno, alcanza latitudes hasta 27°S (Miller, 1976). Una capa de inversión térmica, ubicada generalmente sobre 1000 m de altitud, es característica en la costa del Norte Grande, la cual es el resultado de la subsidencia que domina en la región. Sin embargo, movimientos turbulentos que se desarrollan en esta capa de la atmósfera, originan una cobertura nubosa de tipo estratocúmulo que en ocasiones produce llovizna. Esta nubosidad baja o “camanchacas”, la cual es limitada verticalmente por la base de la inversión térmica, puede levantarse y entrar en diferentes sectores de la costa del norte de Chile, entre ellos la costa de Antofagasta. Por otra parte, la Cordillera de Los Andes, con más de 4.000 metros de altitud, constituye una barrera para la humedad que proviene del océano Atlántico y limita las lluvias de verano en el Altiplano a ocasionales lloviznas en la región preandina (Vargas et al., 2000).

Las precipitaciones, de distintas intensidades que se presentan en forma irregular sobre Antofagasta, serán objeto de estudio a lo largo de este trabajo, teniendo como principal motivación la falta de análisis sobre el desarrollo de este tipo de eventos tan poco frecuentes en el norte de nuestro país.

1.1. Antecedentes.

La escasez casi absoluta de precipitación que caracteriza la zona norte de nuestro país ha forzado, en cierta manera, que el interés de los investigadores se haya centrado en eventos donde la cantidad de agua caída haya alcanzado niveles extremos poco habituales para la región, y que además, el desarrollo de éstos hayan significado consecuencias negativas para la población. Específicamente, gran parte de las investigaciones revisadas, tienen relación con el aluvión que afectó a la ciudad de Antofagasta la madrugada del 18 de junio de 1991. Sin embargo, en el contenido de estas publicaciones se detallan distintas condiciones atmosféricas, tanto en su estructura como en las variables presentes en ella, así como también se describen relaciones entre fenómenos meteorológicos que, según sus respectivos autores, pueden asociarse al desarrollo de un evento de precipitación en nuestra zona de estudio.

1.1.1. Relación de eventos de precipitación en Antofagasta con eventos ENOS.

El análisis meteorológico del evento de 1991 (Garreaud y Rutllant, 1996), sugiere que la ocurrencia de precipitaciones en el norte de Chile es producto de la conjunción de varias condiciones atmosféricas relacionadas al desarrollo de eventos El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Estos factores constituyen manifestaciones típicas de eventos ENOS, que debieron repetirse también en los otros casos de precipitaciones intensas en Antofagasta. Las lluvias, tanto particularmente en esta ciudad como en el Desierto de Atacama, en general, ocurren durante los meses de invierno de la fase de desarrollo de eventos El Niño (Vargas et al., 2000).

1.1.2. Variación interdecadal de precipitaciones.

Vargas et al. (2000) señala que los periodos de años con mayor frecuencia de precipitaciones durante el siglo XX, parecen estar asociados a condiciones de escala interdecadal, global y local, de la temperatura superficial del mar (TSM), de la temperatura del aire y de otros parámetros atmosféricos. De acuerdo a estos autores, en una escala global, la ocurrencia de periodos de mayor precipitación en Antofagasta, coincide con tendencias globales de mayores temperaturas del aire (Parker et al., 1994) y de mayores temperaturas de la superficie del mar (Zhang et al., 1997). Rutllant et al. (1998) señala la ocurrencia de un calentamiento brusco en la temperatura de las aguas del litoral chileno (entre 19°S y 40°S) desde fines de 1976, relacionados simultáneamente con debilitamientos esporádicos de la inversión de subsidencia, debilitamiento de la cobertura nubosa y vientos más enérgicos a la hora de mayor insolación.

1.1.3. Características de la nubosidad en Antofagasta ante un sistema frontal.

El clima desértico costero que presenta Antofagasta se caracteriza por una frecuente nubosidad tipo estratocúmulo, que cubre la costa durante la noche y que, típicamente, se interrumpe antes de mediodía para retornar al atardecer. Esta capa de nubes se ubica inmediatamente bajo la capa de inversión térmica, lo que da lugar a espesas neblinas (“camanchacas”) en puntos donde la capa de nubosidad es intersectada por el relieve local (Rutllant et al., 1998). Las ocasionales lloviznas que registra esta zona son asociadas con el espesamiento de los estratocúmulos costeros producto de la irrupción invernal (junio a agosto) de perturbaciones frontales que alcanzan ya muy debilitadas esas latitudes (Ogaz y Fuenzalida, 1981).

Específicamente para el aluvión de 1991 en Antofagasta, se observó que el paso frontal debilitó la capa de inversión térmica, pero sin llegar a destruirla. Su tope ascendió hasta los 800 hPa y la capa de estratocúmulos mostró mayor continuidad durante el día en razón de la disminución de la subsidencia asociada al ASPS.

1.1.4. Inestabilidad Potencial.

Según Garreaud y Rutllant (1996), para el aluvión de 1991 la actividad convectiva asociada con la perturbación frontal fue localmente reforzada por la liberación de inestabilidad potencial generada en la capa de inversión térmica el día previo al desarrollo del evento en cuestión. Esto ocurrió por el efecto combinado del debilitamiento de la inversión de subsidencia, de la prevaguada en altura y de la advección cálida y húmeda bajo la capa de inversión asociada con vientos del NW en superficie, lo cual es muy raro en esta zona. El mecanismo más probable en el desencadenamiento de esa inestabilidad fue la divergencia en la tropósfera alta asociada a la zona de entrada del núcleo de máxima velocidad en la corriente en chorro que muestran las cartas meteorológicas del día del aluvión sobre la región de Antofagasta (Garreaud y Rutllant, 1996). Finalmente, estos autores proponen que, con el objeto de establecer el periodo de recurrencia de la condición potencialmente inestable de la inversión térmica, se puede analizar la distribución de frecuencia de la diferencia de temperatura potencial equivalente entre el tope y la base de la inversión de subsidencia para un periodo determinado. Valores negativos de esa diferencia representan una condición potencialmente inestable.

1.1.5. Sobre el paso de un sistema frontal en el norte de Chile.

Ogaz y Fuenzalida (1981) al caracterizar de manera general la situación sinóptica abarcada en su estudio, describieron la posición del eje de la corriente en chorro subtropical, su inclinación y la situación de prevaguada que ésta definió para todo el Cono Sur de América. Estos antecedentes sugieren la importancia de observar la posición de la corriente en chorro y de las condiciones de vaguada o prevaguada presentes ante un evento de precipitación.

1.2. Capa Límite.

La capa límite marina (CLM) en Antofagasta está limitada verticalmente por una persistente capa de inversión térmica asociada a la subsidencia forzada por la divergencia del flujo superficial en el borde oriental del ASPS. La CLM generalmente presenta una cubierta de nubes estrato-cumuliformes en su parte superior (bajo la inversión térmica) y su base regularmente coincide con el nivel de condensación por mezcla turbulenta en el seno de la CLM (Rutllant y Garreaud, 2005). Producto de la subsidencia de gran escala ya mencionada, la CLM se mantiene somera y bien mezclada. Sin embargo, existen periodos en que ésta se deprime aún cuando la subsidencia se ve debilitada (Garreaud y Rutllant, 2002). La estructura de la CLM y de la capa de inversión que la cubre, tienen variaciones modestas pero significativas sobre Antofagasta ante el paso de un sistema frontal. Si bien la inversión no se interrumpe, con un paso frontal ésta pierde intensidad y la oscilación diaria de su base se hace más evidente, tanto así que sufre un ascenso que dificulta el quiebre diurno de la nubosidad baja (Ogaz y Fuenzalida, 1981). Cuando su tope se ubica bajo el nivel de condensación por ascenso (NCA), la nubosidad costera disipa, pero en aquellas ocasiones en que la subsidencia de gran escala se ve atenuada, esto puede no ocurrir y el cielo puede permanecer cubierto parcial o totalmente durante todo el día (Fuenzalida, 1980).

1.3. Hipótesis.

- “La Capa Límite Marina aumenta en profundidad o altura durante un evento de precipitación sobre Antofagasta”.

Para determinar si se cumple la hipótesis propuesta, es necesario analizar el comportamiento de la base de la inversión por subsidencia durante el desarrollo de un evento de precipitación, puesto que ésta es la que limita la CLM. También es importante identificar al altura del nivel de condensación por ascenso (NCA) en estos eventos puesto que éste coincide con la base de la persistente capa de nubosidad que encontramos sobre la zona costera de Antofagasta. La variación de la diferencia que hay entre la altura del tope de la nubosidad o base de la inversión térmica y la base de la nubosidad al ocurrir precipitación, entrega información primordial acerca del comportamiento de la CLM ante el desarrollo de uno de estos eventos, y además se podrá determinar a que intensidad de las precipitaciones está asociado este posible aumento en la CLM.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

- Explicar la ocurrencia de precipitación diaria en Antofagasta (23.6°S, 70.4°W) .

1.4.2. Objetivos específicos.

- Establecer una configuración sinóptica para eventos de precipitación de distintas intensidades.
- Analizar el comportamiento de la capa de la atmósfera más cercana a la superficie ante un evento de precipitación en esta zona.
- Relacionar los eventos de precipitación en Antofagasta con el desarrollo de eventos El Niño.

Capítulo 2

Metodología

En este capítulo se detallan las bases de datos utilizadas en la elaboración del presente trabajo y los distintos análisis llevados a cabo a partir de éstos.

2.1. Set de datos.

La información utilizada en el desarrollo de este trabajo consta de productos de reanálisis, campos de datos de la región y observaciones reales captadas en estaciones meteorológicas de distintas variables atmosféricas y termodinámicas en Antofagasta.

- **Climate Forecast System Reanalysis - National Centers for Environmental Prediction (NCEP-CFSR).**

Se descargaron series de tiempo en los puntos de grillas que contienen las siguientes localidades del norte de Chile: Arica (18.5°S, 70.5°W), Iquique (20.5°S, 70.5°W), Calama (23.5°S, 71°W), Copiapó (27.5°S, 70.5°W) y Antofagasta (23.5°S, 71°W). Los datos tienen una resolución temporal de 6 horas en el periodo 1979-2011, una resolución espacial de 0.5°x 0.5° y 23 niveles verticales de presión. Las variables son: altura geopotencial, humedad específica y relativa, temperatura del aire y la componente zonal y meridional del viento. También se utilizaron campos de datos de este producto para el periodo 1979 - 2014, donde las variables escogidas fueron altura geopotencial en 500 hPa, presión atmosférica a nivel del mar y la componente zonal y meridional del viento en 300 hPa.

Todos los campos con los que se trabajó abarcan un área comprendida entre 10-40°S de latitud y 90-60°W de longitud. Estos campos también tienen una resolución espacial y temporal equivalente a la de los datos de los puntos mencionados anteriormente, por lo que cada campo tiene una dimensión de 61 x 61 puntos.

- **Radiosondeos de Antofagasta (DGF).**

Se utilizan radiosondas lanzadas (cortesía de R. Muñoz, DGF) desde la estación ubicada en el aeropuerto Cerro Moreno (23.4°S, 70.4°W) durante el período 1957 - 2013, mientras que los datos de radiosondas correspondientes al año 2014, fueron tomados desde el sitio de la Universidad de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/>). Estos archivos contienen mediciones diarias en 1200 UTC de presión, temperatura, humedad relativa, y de dirección y velocidad del viento.

También se cuenta con datos cada una hora del nivel de condensación por ascenso y de altura de la base de la nube entre 1969 - 2013, y con datos diarios (1200 UTC) de la altura de la base de la inversión (si es que hay) para el mismo periodo de años (cortesía de R. Muñoz). Las observaciones de la altura de la base de las nubes son estimaciones visuales realizadas por meteorólogos en superficie.

- **Datos de precipitación (DMC).**

Se utilizan datos de precipitación acumulada diaria para el periodo 1970 - 2014 de distintas estaciones de la zona norte y centro de Chile. Éstas son Arica (18°21'5", 70°20'9"), Iquique (20°32'23", 70°10'43"), Calama (22°29'43", 68°54'16"), Antofagasta (23°27'1", 70°26'28"), Copiapó (27°22'00", 70°19'05"), Ls Serena (29°55'3", 71°38'43"), Juan Fernández (33°38'12", 78°50'6") y Valparaíso (33°1'23", 71°38'43").

Cabe destacar que cada dato diario representa la precipitación acumulada entre las 1200 UTC de un día y las 1200 UTC del día siguiente. Este detalle es importante puesto que la fecha de un evento de precipitación puede no ser la que registró el sensor, sino que realmente puede tratarse del día anterior a éste.

- **Tiempo Presente Sinóptico (DMC).**

Se cuenta con una tabla de la variable "Tiempo Presente Sinóptico" con observaciones que comienzan a las 0000 UTC y que se registra cada tres horas entre 1960 y 2013. El tiempo presente sinóptico es registrado mediante la sintaxis de un código más un número, lo cual representa el estado de la atmósfera a una hora determinada. El significado de estos códigos está disponible en la CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

2.2. Comparación entre datos de radiosonda y datos de reanálisis NCEP-CFSR.

Es necesario realizar una comparación entre los datos de radiosondas reales en Antofagasta y los datos obtenidos del NCEP-CFSR (denominados como “radiosondas virtuales”) con el fin de evaluar la precisión del producto de reanálisis.

Los estadísticos para comparar las radiosondas “reales” con las “virtuales” se basan en la ecuación propuesta por Murphy (1988) para el error cuadrático medio (MSE):

$$MSE = (\bar{y} - \bar{o})^2 + s_y^2 + s_o^2 - 2s_y s_o r_{yo} \quad (2.1)$$

Donde:

\bar{y} y \bar{o} corresponde a la media de los valores reanalizados y observados respectivamente.

s_y^2 y s_o^2 corresponde a la varianza de los valores reanalizados y observados respectivamente.

r_{yo} corresponde a la correlación entre ambos valores.

Para establecer la medida relativa de precisión (skill score) de un set de datos simulados y observados, a partir del MSE respecto de un pronóstico de control, se utiliza la siguiente ecuación (Wilks, 2006)

$$SS = \frac{MSE - MSE_{\text{clim}}}{MSE_{\text{perf}} - MSE_{\text{clim}}} \quad (2.2)$$

Si como modelo de control se usa la climatología, el MSE_{clim} queda como

$$MSE_{\text{clim}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{o} - o_i)^2 = s_o^2 \quad (2.3)$$

Además, si el modelo fuera perfecto, el $MSE_{\text{perf}} = 0$, la ecuación 2.2 queda como:

$$SS = 1 - \frac{MSE}{MSE_{\text{clim}}} \quad (2.4)$$

Luego, utilizando la ecuación 2.3:

$$SS = 1 - \frac{MSE}{s_o^2} \quad (2.5)$$

Finalmente, utilizando las ecuaciones 2.1 y 2.5 se obtiene:

$$1 - \frac{MSE}{s_o^2} = r_{yo}^2 - (r_{yo} - \frac{s_y}{s_o})^2 - (\frac{\bar{y} - \bar{o}}{s_o})^2 \quad (2.6)$$

A partir de la ecuación 2.6 se puede concluir que el RMSE es función de la correlación, primer término del lado izquierdo de la ecuación, de la amplitud, entregado por la comparación de las desviaciones estandar del segundo término y del sesgo o BIAS, que aparece en el último término de la ecuación.

Entonces, para la evaluación o validación presentada se ha optado por utilizar:

- **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), definido como:**
(Pielke, 1984)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_{iobs})^2}{N}} \quad (2.7)$$

Donde:

ϕ_i corresponde a los valores pronosticados, simulados o reanalizados.

ϕ_{iobs} corresponde a los valores observados.

N corresponde al número de valores analizados.

El MSE corresponde al promedio al cuadrado de la diferencia entre los pares de simulaciones y observaciones. Esta medida es similar al MAE (Error Medio Absoluto), excepto por la exponente al cuadrado que provoca que el MSE sea más sensible a los errores y a puntos atípicos (outliers). Los valores del MSE van desde cero (pronóstico perfecto) a valores más grandes a medida que aumentan las discrepancias entre el pronóstico y las observaciones. Aplicar la raíz cuadrada al MSE tiene la ventaja de que conserva las unidades de la variable pronosticada y es, por tanto, más fácil de interpretar como un error típico de magnitud (Wilks, 2006).

- **Sesgo o BIAS (Pielke, 1984), definido como:**

El BIAS o ME representa la diferencia entre el promedio del reanálisis y el de las observaciones, por lo tanto, expresa el sesgo del pronóstico. Nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, es decir, nos cuantifica el error del modelo.

- **Desviación Estandar**

$$\frac{s_y}{s_o} \quad (2.8)$$

Donde:

s_y corresponde a la desviación estandar de los valores reanalizados.

s_o corresponde a la desviación estandar de los valores observados.

Al realizar la comparación de la desviación estándar de los valores reanalizados con la de las observaciones se obtiene información sobre la subestimación o sobrestimación de

la varianza observada.

- **Coficiente de Correlación de Pearson, definido como:**

$$r_{yo} = \frac{Cov(y, o)}{s_y s_o} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(o_i - \bar{o})(y_i - \bar{y})]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.9)$$

En este contexto, el coeficiente de correlación refleja la asociación lineal entre los reanálisis y las observaciones y se relaciona con la fase del error asociado.

2.3. Análisis de Simultaneidad.

Como se ha mencionado anteriormente, la precipitación en el norte de Chile es escasa y se distribuye en pocos eventos durante el año. Incluso hay años extremadamente secos donde prácticamente no se registraron lluvias. A medida que avanzamos hacia el sur del país, la cantidad de precipitación registrada comienza a aumentar, y con ella la cantidad de eventos por año.

Como una manera de determinar si los eventos de precipitación en el norte grande de Chile están relacionados espacial y temporalmente, se ha elaborado un análisis de “simultaneidad” mediante el uso de la probabilidad condicional. El objetivo de este análisis es el de determinar la probabilidad de que llueva simultáneamente en dos de las localidades mencionadas en la sección 2.1, considerando dos “ventanas” de días. La primera varía desde 3 días antes y después de ocurrido un evento, mientras que la otra considera una ventana de 0 días, es decir, se considera la ocurrencia simultanea de eventos. Cabe mencionar que se definieron como eventos de precipitación los días que presentan una cantidad mayor o igual a 0,1 mm. Esta información, junto con la fecha del evento, se guardó en una “bitacora” para cada una de las estaciones utilizadas respectivamente. El criterio utilizado para categorizar los eventos en este análisis fue el de separar la cantidad de agua caída registrada en cada estación según los cuartiles que dividen los datos de precipitación correspondientes a la estación de Antofagasta.

Entonces si,

- $0,1 \text{ mm} \leq pp \leq 0,2 \text{ mm}$, las precipitaciones (pp) corresponden a la primera categoría.
- $0,2 \text{ mm} < pp \leq 0,6 \text{ mm}$, las precipitaciones (pp) corresponden a la segunda categoría.
- $0,6 \text{ mm} < pp \leq 1,2 \text{ mm}$, las precipitaciones (pp) corresponden a la tercera categoría.
- $pp > 1,2 \text{ mm}$, las precipitaciones (pp) corresponden a la cuarta categoría.

La probabilidad condicional corresponde a la probabilidad de que ocurra un evento dada la ocurrencia de otro; se expresa como:

$$P_r\{E_1|E_2\} \quad (2.10)$$

Donde:

E_1 corresponde al evento de interés.

E_2 corresponde al evento condicionante.

La probabilidad condicional se calcula (Wilks, 2006):

$$P_r\{E_1|E_2\} = \frac{P_r\{E_1 \cap E_2\}}{P_r\{E_2\}} \quad (2.11)$$

2.4. Análisis de perfiles verticales de temperatura.

La estación meteorológica localizada en el aeropuerto Cerro Moreno de Antofagasta, es una de las cinco estaciones a cargo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) que posee observaciones a partir de radiosondas en el país. De éstas, es posible obtener perfiles verticales de distintas variables, como la temperatura, para posteriormente analizar su comportamiento ante diferentes eventos meteorológicos. Los lanzamientos de radiosondas comenzaron en Antofagasta en 1957, por lo que tanto la cantidad como la calidad de los datos obtenidos ha mejorado considerablemente en el transcurso de los años. Evidencia de esto es la diferencia en el número de datos recolectados en cada lanzamiento, donde en las últimas décadas es considerablemente superior en comparación a las mediciones realizadas en los primeros años de lanzamientos. A raíz de lo anterior, se realizó una interpolación para establecer 23 “niveles de presión” fijos limitados entre 1000 y 200 hPa, con el fin de obtener perfiles verticales con la misma cantidad de datos y con información en niveles verticales equivalentes a los obtenidos por el reanálisis NCEP-CFSR.

El objetivo de realizar este análisis es el de identificar la presencia o ausencia de la capa de inversión térmica en los perfiles verticales de temperatura que correspondan a los días donde se registraron precipitaciones. Posteriormente, se analiza por separado ambos casos, es decir, eventos de precipitación con y sin la presencia de la capa de inversión de subsidencia. Aquí se observa la relación de cada caso con la cantidad de agua caída en sus respectivos eventos y la relación entre la altura de la base de la inversión térmica (si la hay) con la magnitud de las precipitaciones. Además, se determinaron perfiles verticales de temperatura potencial (θ) y temperatura potencial equivalente (θ_e) con el fin de identificar perfiles de eventos que indiquen o generen condiciones de inestabilidad, o bien, condiciones potencialmente inestables.

Las ecuaciones utilizadas para determinar estas variables termodinámicas, según Bohren y Albrecht, son:

- Temperatura Potencial (θ)

$$\theta = T \left(\frac{p_o}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (2.12)$$

Donde:

T es la temperatura en un determinado nivel de la atmósfera (°K).

p es la presión en un determinado nivel de la atmósfera (hPa).

p_o es la presión en un nivel de referencia (usualmente 1000 hPa).

γ es la razón entre los calores específicos (C_p/C_v).

- Temperatura Potencial Equivalente (θ_e)

$$\theta_e = \theta \exp \left(\frac{2.675 w}{T_{LCL}} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

θ es la temperatura potencial (°K).

w es la razón de mezcla (g/kg).

T_{LCL} es la temperatura del nivel de condensación por ascenso (°K).

La temperatura donde ocurre el nivel de condensación por ascenso (T_{LCL} , por sus siglas en inglés) se determina utilizando la ecuación (Bohren & Albrecht, 1998):

$$T_{LCL} = \frac{T_{do}\Gamma_d - T_o\Gamma_{dew}}{\Gamma_d - \Gamma_{dew}} \quad (2.14)$$

Donde:

T_{do} es la temperatura punto rocío de la parcela en una determinada altura (°C).

Γ_d es el gradiente adiabático seco ($\sim 9.8^\circ\text{C}/\text{km}$).

T_o es la temperatura de la parcela en un nivel z_o (°C).

Γ_{dew} es el gradiente vertical del punto rocío ($\sim 1.8^\circ\text{C}/\text{km}$).

Reemplazando los valores de Γ_d y Γ_{dew} en la ecuación anterior:

$$T_{LCL} = \frac{9.8T_{do} - 1.8T_o}{8} \quad (2.15)$$

2.5. Análisis de Agrupamiento.

El objetivo principal de este análisis es el de realizar una clasificación que ordene, en este caso, los días en los que se desarrollaron precipitaciones en grupos o “clusters”, de manera tal que los elementos que pertenezcan a un determinado cluster compartan uno o más atributos (o características) sólo entre sí y no con los días agrupados en otros clusters. Es necesario además que una vez formados los clusters, se cumpla que la distancia entre los elementos contenidos en cada uno de ellos sea menor que la distancia entre los grupos. Es importante tener en cuenta para este análisis que la definición de distancia a utilizar condiciona de manera considerable los agrupamientos que se obtendrán al final.

En este trabajo, se optó por el algoritmo de agrupamiento no jerárquico K-Means, puesto que este método permite la reubicación de los puntos utilizados a medida que se desarrolla el análisis con el fin de obtener una mejor clasificación final. Característica con la que los métodos jerárquicos no cuentan.

2.5.1. Método K-means

K-means es un algoritmo iterativo que asigna n observaciones a cada uno de los k clusters definidos por un centroide. Hay que destacar que k se elige antes de que el algoritmo comience, por lo que el resultado final del método en general depende de este valor.

El algoritmo procede de la siguiente manera:

1. El usuario debe elegir los k centros iniciales o “semillas” de cada cluster (centroides).
2. Calcula las distancias punto-centroide entre todas las observaciones y el centroide más cercano a ellas.
3. Calcula la media de las observaciones en cada grupo para obtener k nuevas ubicaciones para los centroides.
4. Repite los pasos 2 y 3 hasta que la asignación de clusters no cambie, o bien, se haya alcanzado el número máximo de iteraciones definidas por el usuario (en este trabajo se definieron 100 repeticiones).

El atributo escogido para realizar este análisis fue la altura geopotencial en 500 hPa. Esta variable nos entrega información sobre la profunda interacción que hay entre la circulación en altura y la que ocurre en superficie. Además, permite identificar la presencia de vaguadas y dorsales en altura, y por lo tanto, la presencia de ciclones y anticiclones, movimiento de masas de aire, la dirección e intensidad del flujo en este nivel, entre otras características de la dinámica atmosférica.

2.6. Análisis de Compuestos.

Realizar este tipo de análisis permite estudiar el comportamiento de, en este caso, dos o más variables meteorológicas a partir de una característica inicial.

En este trabajo se utilizó como característica principal los clusters resultantes del método K-means al asignar como atributo de agrupamiento la altura geopotencial en 500 hPa.

A partir de los grupos creados, se obtuvieron las fechas de sus respectivos eventos, y con esta información se calculó para cada uno de los clusters, los campos medios de altura geopotencial en 500 hPa, el promedio de los campos de datos de presión a nivel del mar y el promedio de los campos de la componente zonal y meridional del viento en 300 hPa. Con estas últimas, se determinó la dirección y la magnitud del viento para cada uno de los eventos incluidos en cada cluster.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Análisis climatológico de la precipitación en Antofagasta.

La segunda región de Antofagasta presenta características de extrema aridez, donde la cercanía al mar y las alturas del relieve al interior del continente contribuyen a crear variaciones climáticas dispuestas en franjas longitudinales. La ciudad de Antofagasta presenta un clima desértico con nublados abundantes, los cuales son una característica importante de este tipo de clima y que se intensifica durante los meses de invierno. Otra característica del clima de Antofagasta es la alta humedad recibida desde el mar, cuya influencia no alcanza más allá de unos 40 o 50 km hacia el interior del continente. El régimen pluviométrico está dado principalmente por lloviznas y por sistemas frontales que ocasionalmente llegan a estas latitudes (Climatología de Chile, 2001).

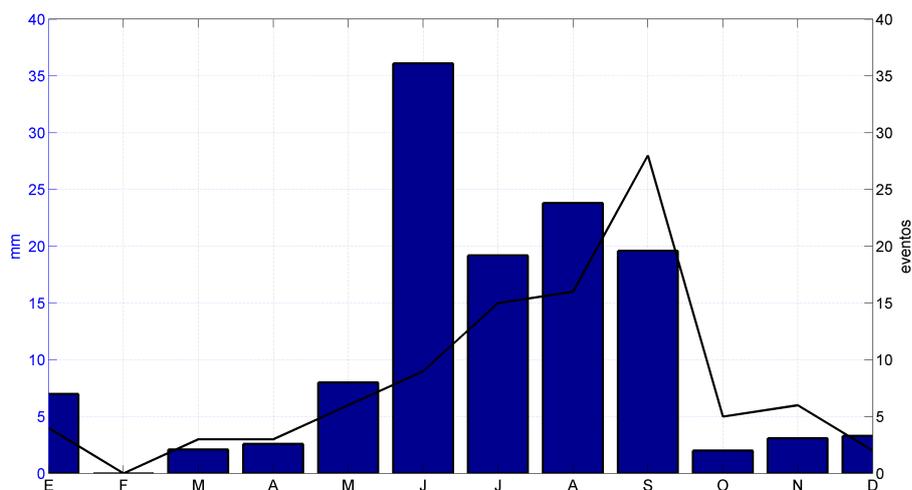


Figura 3.1: Precipitación acumulada total en cada mes entre 1970-2014 en Antofagasta y cantidad de días totales que precipitó en el mismo periodo de tiempo para cada mes respectivamente (línea sólida) (Base de datos: Dirección Meteorológica de Chile).

En la figura 3.1 se muestra la distribución de eventos de precipitación (mayores a 0,1 mm) registrados en Antofagasta entre 1970 y 2014. Se observa que en este periodo de tiempo sólo se registraron 97 eventos de precipitación, de los cuales aproximadamente el 70 % no supera 1 mm de agua caída (figura 3.2). El mes con mayor cantidad de eventos registrados en la zona corresponde a septiembre (28 eventos). Los meses de invierno (JJA) son los que presentan la mayor cantidad de precipitaciones, donde junio alcanza 36 mm de agua caída. Entre octubre y abril los eventos son a lo más 4 por cada mes y no superan 5 mm de agua precipitada, excepto en enero que aumenta levemente la cantidad de eventos y la magnitud llega a 7 mm .

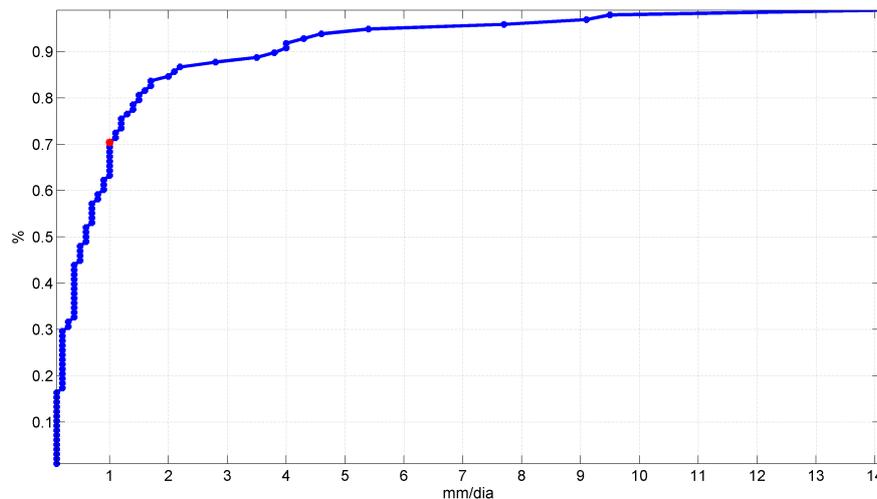


Figura 3.2: Distribución de la frecuencia acumulada empírica de los eventos de precipitación en Antofagasta entre enero de 1970 y diciembre de 2014 (línea azul).

En la figura 3.2 podemos observar la distribución de probabilidad acumulada de los eventos de precipitación a partir de la cantidad de milímetros registrados en cada uno de ellos. Se registraron eventos desde 0,1 hasta 14,1 mm , donde este último corresponde al aluvión del 18 de junio de 1991 (Garreaud y Rutllant, 1996; Vargas, 2000). Como se mencionó anteriormente, eventos catalogados como “débiles” son los que predominan. Sin embargo también se registraron eventos que están sobre la media anual de esta zona calculada a partir de los datos disponibles y que es de 4 mm , aunque estos no superan el 10% de los eventos. Sólo 9 eventos en 45 años registraron al menos 4 mm de agua caída en un día y sólo 1 evento en este mismo periodo de tiempo superó los 10 mm .

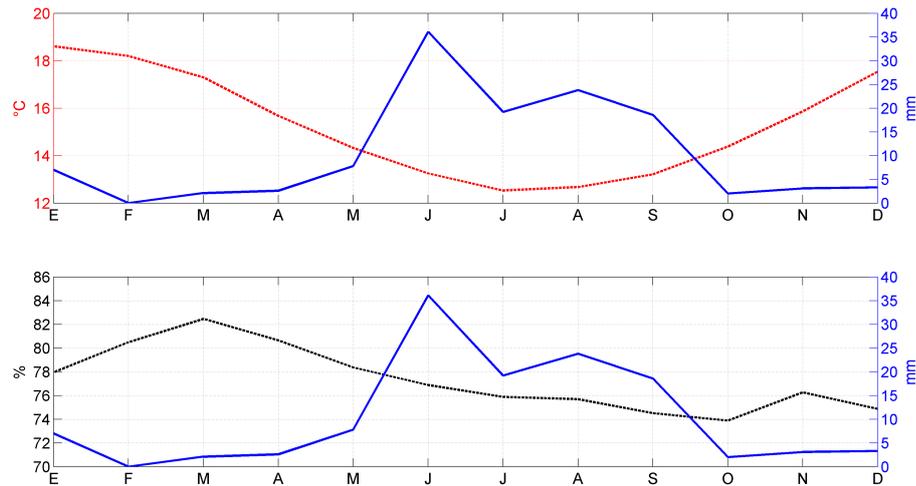


Figura 3.3: Panel superior: Precipitación acumulada de cada mes y ciclo anual de la temperatura en Antofagasta 1970-2014.

Panel inferior: Precipitación acumulada de cada mes y ciclo anual de la humedad relativa en Antofagasta 1970-2014.

El panel superior de la figura 3.3 muestra un marcado ciclo anual de la temperatura, con máximos durante los meses de verano (DEF), enfriamiento progresivo en los meses de otoño (MAM), mínimos valores en invierno (JJA) y calentamiento durante la primavera (SON). El panel inferior de la figura 3.3 muestra que la mayor humedad relativa media se concentra en marzo (82%), luego la humedad relativa comienza a descender a lo largo del año hasta fines de la primavera, que es donde alcanza su valor más bajo (74%). La mayor cantidad de precipitaciones se centran en los meses más fríos, donde los valores de humedad relativa media no superan un 78%. Mientras que los meses más cálidos no registran grandes cantidades de precipitación.

3.1.1. Relación de eventos de precipitación en Antofagasta con eventos El Niño.

El Niño es un fenómeno que corresponde a la fase cálida de la Oscilación del Sur (ENOS). Representa un estado extremo de las condiciones océano-atmosféricas de la cuenca del Pacífico, cuyas repercusiones climáticas se dejan sentir en gran parte del planeta. La Oscilación del Sur (OS) se expresa a través de un índice (IOS) que representa la diferencia normalizada de la presión atmosférica entre los polos de la Oscilación del Sur. Un valor del IOS negativo representa un ASPS debilitado, y con él, vientos alisios menos intensos, particularmente en la región occidental del Pacífico ecuatorial. Ésto tiene como consecuencia que se presenten anomalías positivas en la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico ecuatorial central y oriental y a lo largo de la costa oeste de Sudamérica (Vargas et al., 2000).

Los eventos ENOS se relacionan con fuertes anomalías positivas de la precipitación en las regiones costeras del Ecuador, norte del Perú y Chile central. El debilitamiento del ASPS y los frecuentes bloqueos en el régimen de los Oestes (Mar de Bellingshausen 90°S) son mecanismos responsables del exceso de precipitación en Chile entre 30°S - 35°S (Rutllant & Fuenzalida, 1991). Estos factores están fuertemente modulados por oscilaciones intraestacionales que explican importantes diferencias de un mes a otro dentro de un mismo invierno lluvioso (Rutllant & Aceituno, 1991).

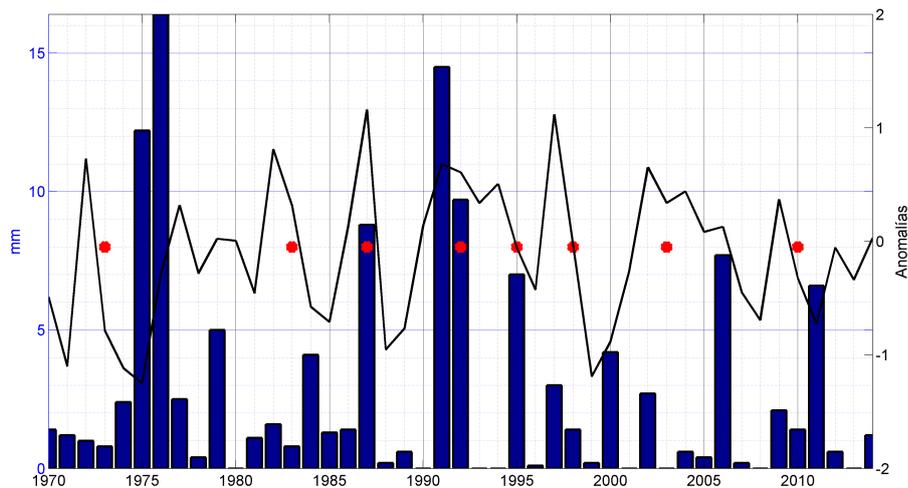


Figura 3.4: Precipitación anual total en Antofagasta entre 1970-2014 (histograma), en relación a la ocurrencia de eventos El Niño (puntos rojos) y la media anual de anomalía superficial del mar (línea de color negro) (**Base de datos: NOAA**).

La relación entre eventos ENSO y la precipitación anual total en Antofagasta entre 1970 y 2014 es mostrada en la figura 3.4. La mayoría de los eventos El Niño registraron anomalías positivas de la temperatura superficial del mar en los últimos meses de cada año y en los primeros meses del siguiente, excepto en el evento 86-87, donde anomalías cercanas a $1,5^{\circ}\text{C}$ fueron registradas en meses invernales de 1987. Los eventos El Niño 86-87, 91-92 y 94-95 muestran precipitaciones anuales que están sobre la media en Antofagasta. Sin embargo, los otros 5 eventos registrados muestran precipitaciones que no superan los 5 mm en los años donde se desarrolló el evento. Cabe destacar que la cantidad de precipitación registra el año 1991 corresponde en mayor parte al aluvión de junio de dicho año ($14,1\text{ mm}$), el cual coincide con el desarrollo de un evento El Niño de moderada intensidad (Vargas et al., 2000).

La figura 3.5 muestra la precipitación mensual y la respectiva anomalía de temperatura superficial del mar durante el desarrollo de los 8 eventos El Niño que ocurrieron entre 1970 y 2014. Todos los datos mostrados en sus respectivos paneles corresponden a dos años completos comprendidos entre enero del primer año y diciembre del segundo. Se decidió por este periodo de meses con el fin de observar la distribución de la precipitación antes, durante y posterior al desarrollo de un evento ENSO.

Los eventos 72-73 (a), 82-83 (b), 02-03 (g) y 09-10 (h) mostrados en la figura 3.5 corresponden a los más “secos”, donde los datos muestran eventos que no superan 1 mm cada uno. Los eventos de precipitación para estos eventos ENOS se concentran mayormente en meses previos al periodo donde la anomalía de temperatura alcanza valores máximos. Las anomalías de temperatura de los eventos 72-73 y 82-83 superan los 2° en el verano.

Los eventos 86-87 (c), 94-95 (e) y 97-98 (f), siendo este último el más intenso registrado hasta la fecha (Lee et al., 2010), presentan levemente una mayor cantidad de precipitación. Durante el evento 86-87, se registraron 10 eventos de precipitación, donde el que mayor agua caída registró tuvo lugar en julio de 1987 (4,3 mm), superando la media anual de precipitaciones en Antofagasta en un par de horas. El aumento en las precipitaciones en julio de 1987 también coincide al ocurrir durante meses previos al máximo de anomalías de temperatura alcanzada en este evento El Niño.

El evento 94-95 presenta dos eventos que registraron 2,3 mm en el mes de mayo de 1995 y posteriores precipitaciones en julio y septiembre que acumularon 4,7 mm en total, cantidad que también supera la precipitación media anual en esta zona. Lo llamativo de estas precipitaciones es que ocurrieron fuera del desarrollo del evento El Niño de ese año, es decir, cuando los valores de la anomalía son menores o iguales a 0. Finalmente, el evento 91-92 (d), es el que presenta mayor precipitación, las cuales presentan un máximo en la ya mencionada tormenta de junio de 1991 y también muestran una concentración durante los meses de otoño del segundo año del desarrollo del evento. El evento del 28 de mayo de 1992 es el que mayor cantidad de agua caída registró (4,6 mm) de los considerados de aquel año. El desarrollo de estas precipitaciones coincide con la disminución progresiva en las anomalías de temperatura, la cual alcanza valores menores a 0 en octubre de ese mismo año.

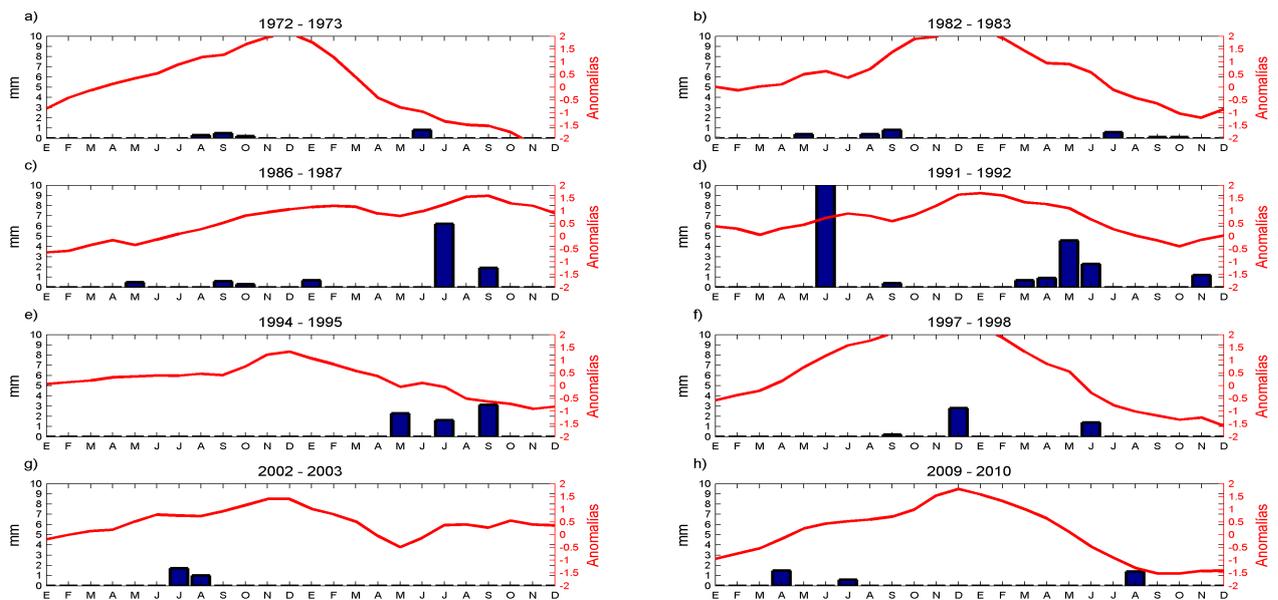


Figura 3.5: Precipitación mensual total (histogramas) durante el desarrollo de eventos El Niño para los años 72-73 (a), 82-83 (b), 86-87 (c), 91-92 (d), 94-95 (e), 97-98 (f), 02-03 (g) y 09-10 (h). La variación de la anomalía de temperatura es representada por la línea roja.

3.2. Resultados de la comparación entre datos de radiosondas y datos NCEP-CFSR.

En esta sección se muestra, a través de una serie de figuras, los resultados de la comparación entre los datos de temperatura obtenidos a través de radiosondas en Antofagasta y los datos de temperaturas correspondientes al producto de reanálisis NCEP-CFSR para el periodo 1979 - 2010. Éstos resultados corresponden a los valores obtenidos tras calcular los estadísticos detallados en la sección 2.2 de este trabajo, en 23 niveles de presión verticales y para cada uno de los meses del año. La razón de calcular cada estadístico para cada mes fue para no incluir implícitamente el ciclo anual de la temperatura en Antofagasta en el resultado de la validación.

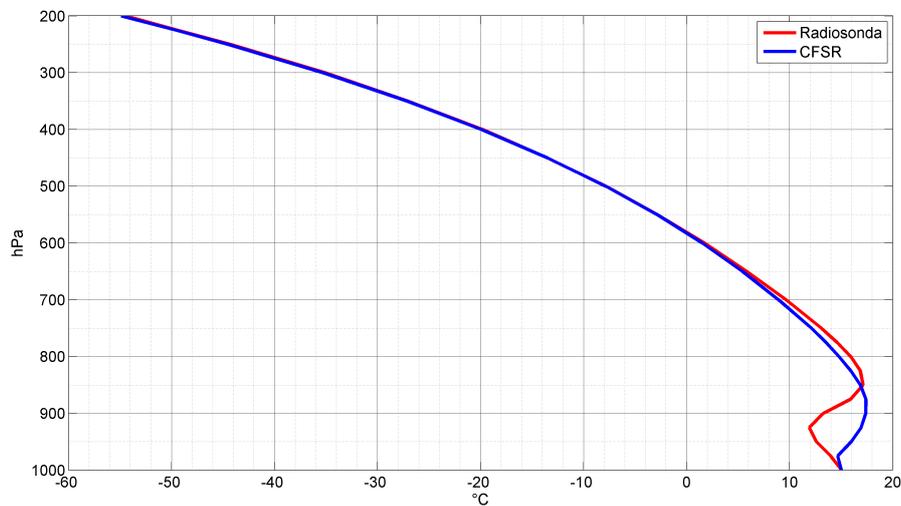


Figura 3.6: Perfil de temperatura media en Antofagasta entre 1979 - 2010 a partir de datos de radiosondas reales (línea roja) y a partir del reanálisis NCEP-CFSR (línea azul).

Al observar los perfiles de temperatura media en Antofagasta entre 1979 y 2010 (figura 3.6), inmediatamente llama la atención la diferencia que hay entre ambos perfiles cerca de la superficie hasta 850 hPa. Luego, sobre este nivel de presión los perfiles comienzan a ser muy similares a medida que avanzamos en la altura. Esta diferencia señala que el producto de reanálisis para la temperatura (radiosondas virtuales) no es capaz de representar la capa de inversión térmica presente sobre esta zona del país entre aproximadamente 980 y 850 hPa, y que si se puede apreciar en el perfil de temperatura media del radiosonda de Antofagasta. El hecho que los datos NCEP-CFSR omitan la capa de inversión en Antofagasta da una primera “alerta” sobre la confianza de la información entregada por este producto.

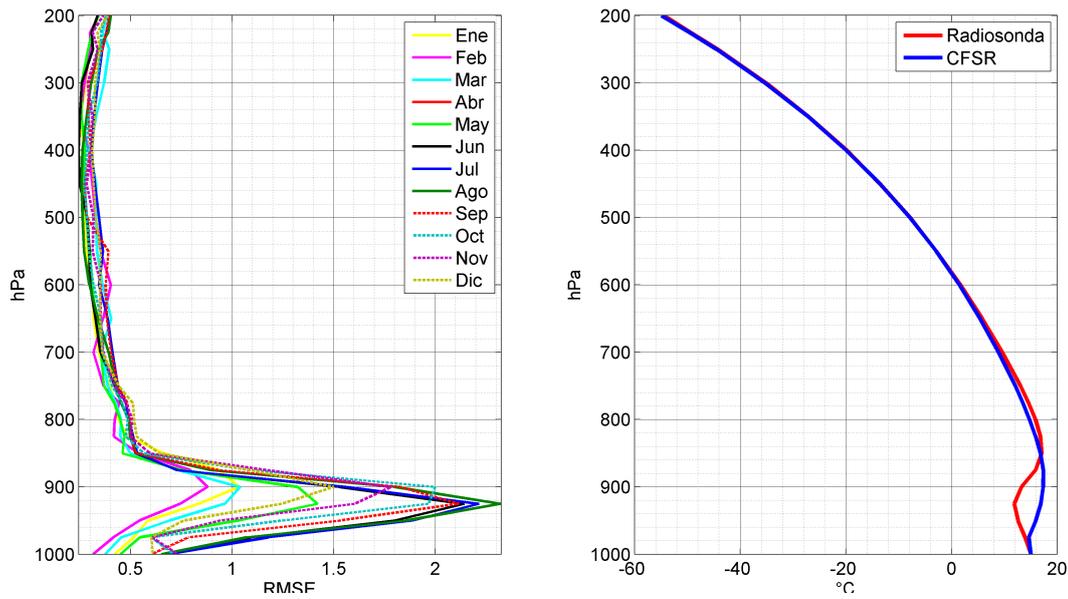


Figura 3.7: Raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). El RMSE es mostrado para todos los meses.

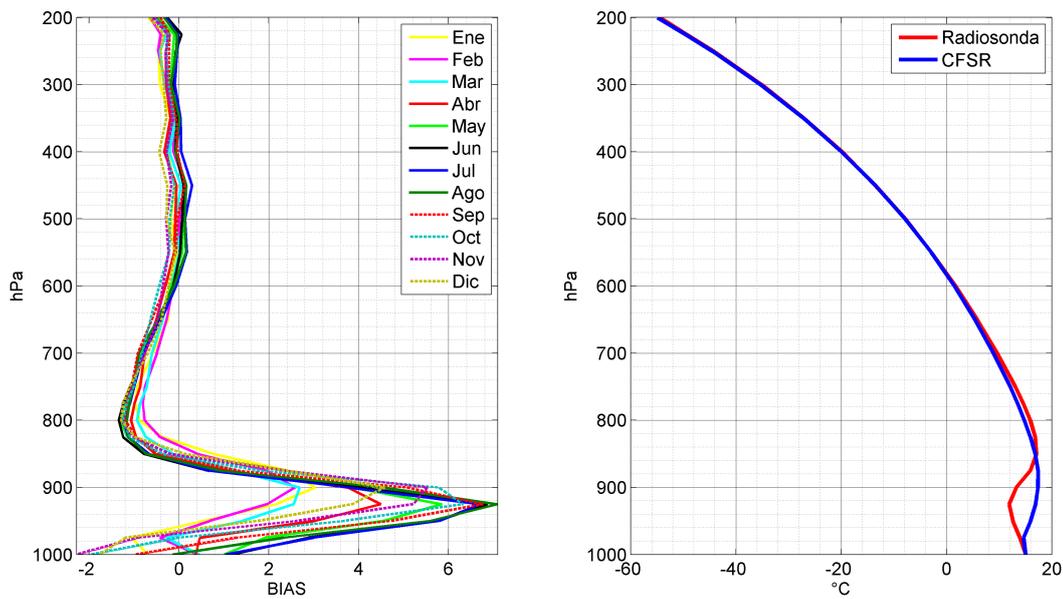


Figura 3.8: BIAS o sesgo entre los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y de radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). El BIAS es mostrado para todos los meses.

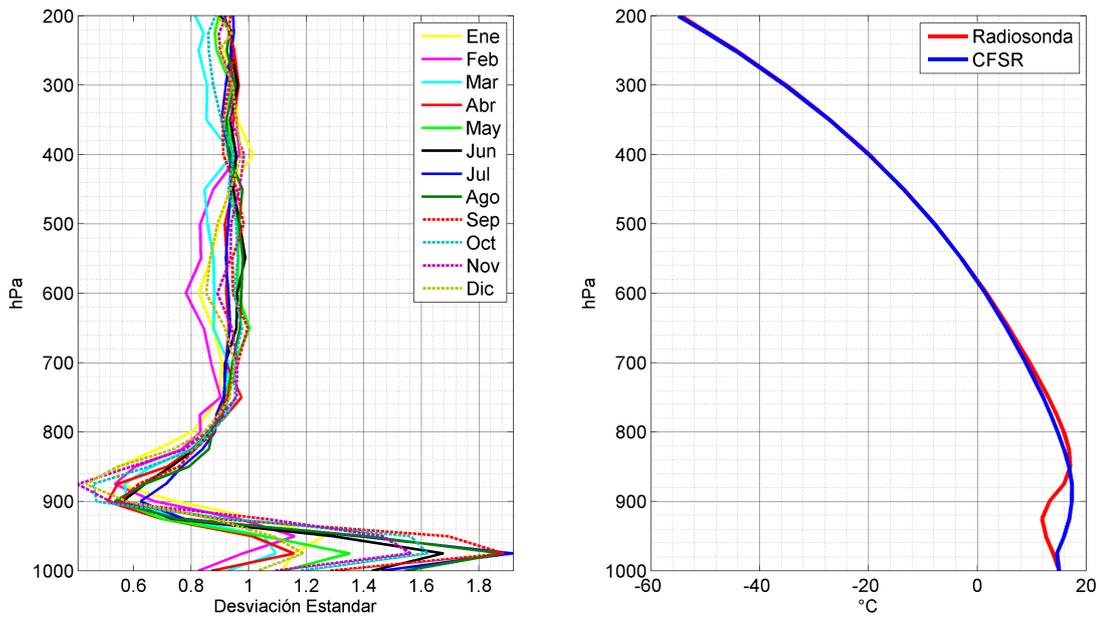


Figura 3.9: Comparación de la desviación estandar de los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). La comparación es mostrada para todos los meses.

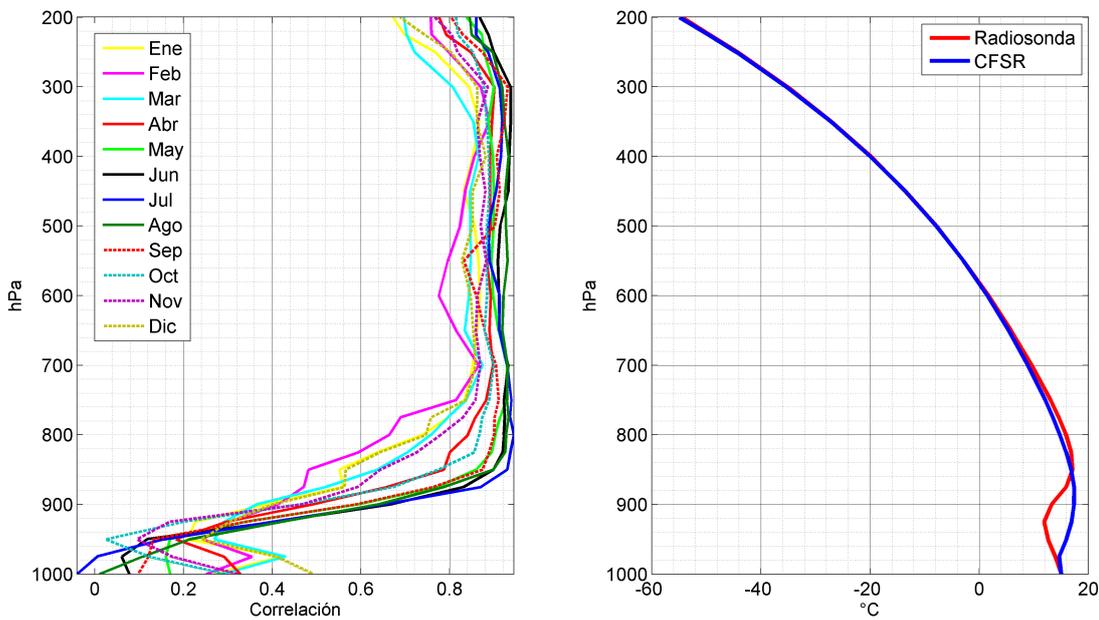


Figura 3.10: Coeficiente de correlación entre los datos de radiosondas real y virtual entre 1979-2010 (panel izquierdo) y perfiles de temperatura media en Antofagasta a partir de datos de radiosonda y radiosonda virtual para el mismo periodo de años (panel derecho). La correlación es mostrada para todos los meses.

Los resultados del RMSE (figura 3.7), del BIAS (figura 3.8), de la amplitud (figura 3.9) y de la correlación o fase (figura 3.10) muestran valores muy buenos sobre los 800 hPa en todos los estadísticos calculados. Sobre este nivel de presión no hay mayores problemas de sesgo, amplitud o fase. El RMSE es menor o igual a $0,5^{\circ}\text{C}$ para todos los meses del año, el sesgo es cercano a 1°C entre 800 y 700 hPa, pero tras 600 hPa su valor está en torno a 0°C .

Un comportamiento parecido muestra la comparación de la desviación estandar, donde excepto para los meses comprendidos entre diciembre y marzo, muestra valores muy cercanos 1°C . Y finalmente la correlación muestra valores mayores a 0,8 sobre 800 hPa. Sin embargo, y tal como se mencionó respecto de la figura 3.6, los valores más problemáticos se concentran entre niveles de presión muy cercanos a la superficie y 850 hPa, es decir, donde habitualmente se encuentra la capa de inversión térmica y la capa límite marina en Antofagasta. Por este motivo, se decidió no extender en análisis a otras localidades donde se registra la precipitación. El análisis de validación mostró que no es posible confiar en el reanálisis desde la superficie hasta 850 hPa. El RMSE tiene valores mayores a $1,4^{\circ}\text{C}$ en todos los meses del año, excepto en enero, febrero y marzo que poseen valores cercanos a 1°C . El sesgo presenta valores superiores a 4°C , pero al igual que el RMSE, tiene una pequeña mejoría en los primeros tres meses del año donde los valores son un poco mayores a 2°C . La amplitud es sobrestimada por el reanálisis durante todos los meses del año y los coeficientes de correlación oscilan entre valores cercanos a 0 y 0,4, lo que evidencia un grave problema con la fase.

3.3. Análisis de Simultaneidad.

En esta sección se muestran los resultados del análisis de simultaneidad detallado en la sección 2.3 mediante una serie de cuadros de datos. Se definió como el evento de interés (E_1) a las estaciones de la primera fila de cada cuadro y al evento condicionante (E_2) a las estaciones de la primera columna de cada cuadro. Entonces, cada valor mostrado corresponde a la probabilidad condicional de que ocurra un evento de precipitación en E_1 , dado que ocurrió un evento de precipitación en E_2 , con la “ventana” de días señalada.

En los cuadros que se presentan a continuación se muestran la cantidad de eventos de precipitación correspondientes a los registros de Arica, Iquique, Calama, Antofagasta, Copiapó, La Serena, Valparaíso y Archipiélago Juan Fernandez, así como también, los resultados de la probabilidad condicional calculada entre los casos de las estaciones antes mencionadas. Éstos fueron calculados para tres grupos de eventos, donde el criterio utilizado para separarlos fue el de considerar distintos intervalos en la magnitud de la precipitación asociada a los eventos.

Estación	N° de Eventos	%
Arica	18	23,38
Iquique	6	25
Calama	28	14,74
Antofagasta	29	29,9
Copiapó	59	31,05
La Serena	255	33,82
Valparaíso	141	9,26
Juan Fdez.	733	9,65

Cuadro 3.1: Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la primera categoría ($0,1mm \leq pp \leq 0,2mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.

-3 a 3 días	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0	0,05	0	0	0,11	0	0,28
Iquique	0	-	0,16	0	0	0,33	0,16	0,16
Calama	0,03	0,03	-	0	0,1	0,18	0,1	0,39
Antofagasta	0	0	0	-	0,07	0,07	0,03	0,31
Copiapó	0	0	0,03	0,03	-	0,1	0,15	0,2
La Serena	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	-	0,1	0,26
Valparaíso	0	0,007	0,02	0,007	0,07	0,14	-	0,25
Juan Fdez.	0,01	0,001	0,02	0,02	0,02	0,1	0,05	-

Cuadro 3.2: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de la primera categoría.

Mismo día	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0	0	0	0	0,05	0	0,05
Iquique	0	-	0,16	0	0	0,16	0	0
Calama	0	0,03	-	0	0,03	0,07	0	0,03
Antofagasta	0	0	0	-	0	0	0	0,1
Copiapó	0	0	0,01	0	-	0,03	0,02	0,06
La Serena	0,004	0,004	0,01	0	0,01	-	0,02	0,03
Valparaíso	0	0	0	0	0,007	0,03	-	0,02
Juan Fdez.	0,001	0	0,001	0,004	0,005	0,01	0,004	-

Cuadro 3.3: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la primera categoría.

Estación	N° de Eventos	%
Arica	23	29,87
Iquique	7	29,16
Calama	26	13,68
Antofagasta	22	22,68
Copiapó	42	22,1
La Serena	145	19,23
Valparaíso	188	12,34
Juan Fdez.	977	12,86

Cuadro 3.4: Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la segunda categoría ($0,2mm < pp \leq 0,6mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.

-3 a 3 días	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0	0	0	0,09	0,13	0,04	0,39
Iquique	0	-	0	0	0	0,28	0,28	0,43
Calama	0	0	-	0,11	0,08	0,04	0,11	0,38
Antofagasta	0	0	0,1	-	0,1	0,1	0,27	0,36
Copiapó	0,05	0	0,05	0,05	-	0,17	0,14	0,36
La Serena	0,03	0,03	0,01	0,01	0,05	-	0,18	0,41
Valparaíso	0,005	0,02	0,02	0,03	0,03	0,14	-	0,33
Juan Fdez.	0,01	0,003	0,01	0,01	0,02	0,07	0,07	-

Cuadro 3.5: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de la segunda categoría.

Mismo día	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0	0	0	0,04	0,09	0,04	0,09
Iquique	0	-	0	0	0	0	0	0
Calama	0	0	-	0,08	0	0	0	0
Antofagasta	0	0	0,1	-	0,1	0	0,04	0,04
Copiapó	0,02	0	0	0,05	-	0,02	0,07	0,1
La Serena	0,01	0	0	0	0,01	-	0,08	0,04
Valparaíso	0,005	0	0	0,005	0,02	0,06	-	0,06
Juan Fdez.	0,002	0	0	0,001	0,004	0,006	0,01	-

Cuadro 3.6: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la segunda categoría.

Estación	N° de Eventos	%
Arica	22	28,57
Iquique	5	20,83
Calama	19	10
Antofagasta	23	23,71
Copiapó	14	7,36
La Serena	71	9,42
Valparaíso	138	9,06
Juan Fdez.	941	12,39

Cuadro 3.7: Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la tercera categoría ($0,6mm < pp \leq 1,2mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.

-3 a 3 días	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0,04	0,09	0	0	0	0,04	0,18
Iquique	0,2	-	0,2	0,2	0	0	0	0,4
Calama	0,1	0,05	-	0,05	0	0,05	0,1	0,26
Antofagasta	0	0,09	0,04	-	0,09	0,17	0,09	0,39
Copiapó	0	0	0	0,14	-	0,07	0,21	0,28
La Serena	0	0	0,01	0,04	0,01	-	0,13	0,36
Valparaíso	0,007	0	0,02	0,01	0,02	0,05	-	0,35
Juan Fdez.	0,005	0,003	0,004	0,01	0,004	0,03	0,05	-

Cuadro 3.8: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de precipitación de la tercera categoría.

Mismo día	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0	0,04	0	0	0	0	0,04
Iquique	0	-	0	0,2	0	0	0	0,4
Calama	0,05	0	-	0	0	0	0,05	0
Antofagasta	0	0,04	0	-	0,04	0,04	0	0,04
Copiapó	0	0	0	0,07	-	0,07	0,07	0
La Serena	0	0	0	0,01	0,01	-	0,01	0,01
Valparaíso	0	0	0,007	0	0,007	0,007	-	0,08
Juan Fdez.	0,001	0,002	0	0,001	0	0,001	0,01	-

Cuadro 3.9: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la tercera categoría.

Estación	N° de Eventos	%
Arica	14	18,18
Iquique	6	25
Calama	47	24,74
Antofagasta	23	23,71
Copiapó	75	39,47
La Serena	283	37,53
Valparaíso	1056	69,33
Juan Fdez.	4946	65,1

Cuadro 3.10: Cantidad de eventos de precipitación (pp) correspondientes a la cuarta categoría ($pp \geq 1,2mm$). El porcentaje mostrado es respecto al total de eventos de cada estación respectivamente.

-3 a 3 días	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0,14	0,36	0,14	0,14	0,14	0,14	0,86
Iquique	0,3	-	0,83	0,6	0,6	0,3	0,3	1
Calama	0,11	0,13	-	0,25	0,17	0,11	0,21	0,87
Antofagasta	0,08	0,13	0,43	-	0,35	0,35	0,39	0,91
Copiapó	0,03	0,05	0,08	0,12	-	0,76	0,69	0,92
La Serena	0,01	0,007	0,02	0,04	0,28	-	0,89	0,96
Valparaíso	0,001	0,002	0,01	0,01	0,1	0,42	-	0,98
Juan Fdez.	0,005	0,005	0,02	0,01	0,04	0,17	0,43	-

Cuadro 3.11: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando una ventana de 3 días antes y después de ocurrido un evento de precipitación de la cuarta categoría.

Mismo día	Arica	Iquique	Calama	Antofagasta	Copiapó	La Serena	Valparaíso	Juan Fdez.
Arica	-	0,07	0,14	0,14	0	0	0	0,14
Iquique	0,16	-	0,6	0,3	0,3	0,16	0,16	0,83
Calama	0,04	0,08	-	0,19	0,08	0,04	0,02	0,34
Antofagasta	0,08	0,08	0,39	-	0,17	0,17	0,08	0,39
Copiapó	0	0,03	0,05	0,05	-	0,64	0,43	0,59
La Serena	0	0,003	0,007	0,01	0,02	-	0,71	0,71
Valparaíso	0	0,001	0,001	0,002	0,03	0,2	-	0,71
Juan Fdez.	0,0004	0,001	0,003	0,002	0,009	0,04	0,15	-

Cuadro 3.12: Resultados de la probabilidad condicional entre las estaciones mostradas, considerando la ocurrencia simultanea de eventos de precipitación de la cuarta categoría.

Los resultados obtenidos al determinar la probabilidad condicional entre eventos correspondientes a la primera categoría no muestran valores importantes de simultaneidad entre las estaciones del Norte Grande de Chile, incluso considerando la ventana de 3 días. La probabilidad de ocurrencia simultánea más alta entre las localidades de esta zona es de 16 % y relaciona precipitación en Calama dada la ocurrencia de un evento en Iquique. Este porcentaje corresponde a 4 eventos de la primera categoría que, en este caso, ocurrieron de manera simultánea en ambas estaciones puesto que este valor no cambió al reducir la ventana de días a cero. Antofagasta muestra valores nulos de probabilidad condicional con Arica, Iquique y Calama, y valores muy bajos con las demás localidades, las cuales se reducen a cero al considerar el desarrollo de eventos simultáneos. Las probabilidades condicionales más altas son las calculadas cuando los eventos registrados en Juan Fernandez corresponden al evento de interés (E_1). Ésto se debe a la enorme diferencia que hay entre la cantidad de eventos que muestra esta estación y las demás consideradas (cuadro 3.1), por lo que la probabilidad de encontrar una simultaneidad entre eventos ocurridos en Juan Fernandez con eventos de las demás estaciones es alta, y más aún considerando la ventana de 3 días para los eventos condicionantes. En el análisis de simultaneidad para los eventos de la segunda categoría tampoco se aprecia una relación entre las localidades del Norte Grande. La probabilidad condicional es nula cuando Arica, Iquique, Calama y Antofagasta intercambian el rol de evento de interés y evento condicionante, excepto en el caso que muestra el cuadro 3.5 entre Antofagasta y Calama. Cuando Calama es el evento de interés (E_1) y Antofagasta el condicionante (E_2) la probabilidad es de 10 % (2 eventos), la cual se mantiene pese a considerar el desarrollo de eventos simultáneos. Cuando se cambian los papeles, la probabilidad condicional arroja un valor de 11 %, es decir 3 eventos considerando la ventana de 3 días, el cual se reduce a 8 % (dos eventos) cuando se consideran eventos en el mismo día. Con las demás localidades, Antofagasta no muestra valores importantes, siendo el más alto el 5 % que comparte con Copiapó. Una simultaneidad de 28 % se encuentra entre La Serena y Valparaíso cuando Iquique es el evento condicionante (sólo dos eventos). Los eventos de la tercera categoría muestran valores un poco más altos entre las localidades del Norte Grande respecto a las categorías antes revisadas, pero éstos no superan el 20 %. Cuando Iquique es el evento condicionante, Arica, Calama y Antofagasta muestran este valor, manteniéndose al reducir la ventana de días. Sin embargo, este 20 % solo representa la ocurrencia de 1 evento cuando Iquique es E_2 . En esta categoría, los resultados solo superan levemente el 20 % de probabilidad condicional con la ventana de 3 días (sin considerar los resultados de Juan Fernandez como E_1).

Finalmente, los resultados para la cuarta categoría sí muestran valores importantes entre las localidades ubicadas desde Antofagasta hacia el norte. Nuevamente cuando Iquique es el evento condicionante, presenta 83 % (5 eventos) y 60 % (4 eventos) de probabilidad condicional con Calama y Antofagasta como eventos de interés respectivamente. Estos porcentajes disminuyen levemente cuando se consideran eventos simultáneos, por lo que será importante observar las fechas donde se desarrollaron estas precipitaciones en los análisis siguientes.

3.4. Análisis de eventos de precipitación en Antofagasta.

Como ya se ha observado en puntos anteriores, la escasa cantidad de eventos de precipitación registrados en Antofagasta permite poder trabajar con información detallada de cada evento desarrollado entre 1970 y 2014. A partir de esta información, es posible determinar el “ciclo diario” que presenta la precipitación, estudiar el comportamiento de la capa límite durante estos eventos a través de un análisis de la presencia de la inversión térmica en perfiles verticales de temperatura y de la variación del espesor de las nubes, y además realizar un análisis de agrupamiento utilizando distintos campos de datos a través del método k-means para observar las condiciones sinópticas presentes durante el desarrollo de la precipitación.

3.4.1. Ciclo diario de la precipitación.

A partir de la variable “Tiempo Presente Sinóptico” (sección 2.1) es posible conocer el comportamiento de la atmósfera cerca de la superficie a una hora determinada. Como se mencionó, los datos de precipitación disponibles representan un acumulado entre las 1200 UTC de un día determinado y las 1200 UTC del día de observación. Por esta razón, se elaboró una tabla (ver Anexo II) que incluye el registro cada tres horas del “tiempo presente sinóptico” para cada uno de los 94 eventos desarrollados en Antofagasta entre 1970 y 2012.

Categoría	Claves	Descripción
C1	00 - 19	Sin precipitación, niebla, niebla helada (excepto para 11 y 12), tempestad en polvo, tempestad de arena, ventisca baja o alta en la estación, en el momento de la observación o, excepto para 09 y 17, durante la hora precedente.
C2	20 - 29	Precipitación, niebla niebla helada o tormenta en la estación en el curso de la hora precedente pero no en el momento de la observación.
C3	30 - 39	Tempestad de polvo, tempestad de arena, ventisca baja o alta.
C4	40 - 49	Niebla o niebla helada en el momento de la observación.
C5	50 - 59	Llovizna en la estación en el momento de la observación.
C6	60 - 69	Lluvia en la estación en el momento de la observación.
C7	70 - 79	Precipitación sólida, pero no en forma de chubascos en el momento de la observación.
C8	80 - 99	Precipitación en forma de chubascos o precipitación con tormenta o después de una tormenta.

Cuadro 3.13: Categorización de las claves disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).

Con las observaciones disponibles agrupadas en las categorías que muestra el cuadro 3.13, se determinó el ciclo diario del comportamiento de la capa atmosférica más cercana a la superficie frente al desarrollo de un evento de precipitación a partir de las 1200 UTC del día del evento.

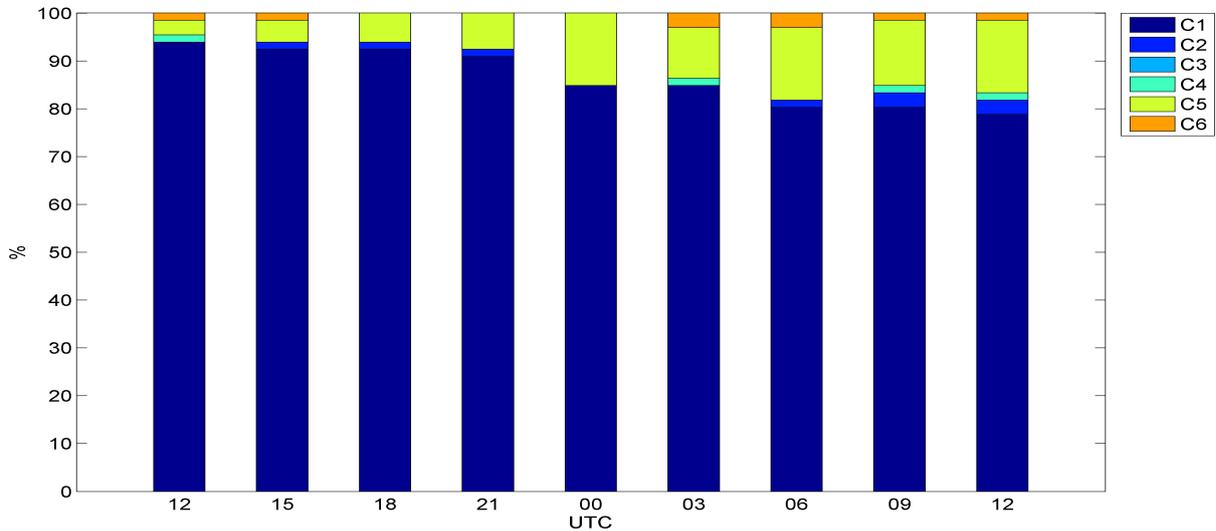


Figura 3.11: Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta (23.4° S, 70.4° W) para 66 eventos que registraron precipitaciones mayores o iguales a 0,1 mm y menores o iguales a 1 mm durante el periodo 1970-2012.

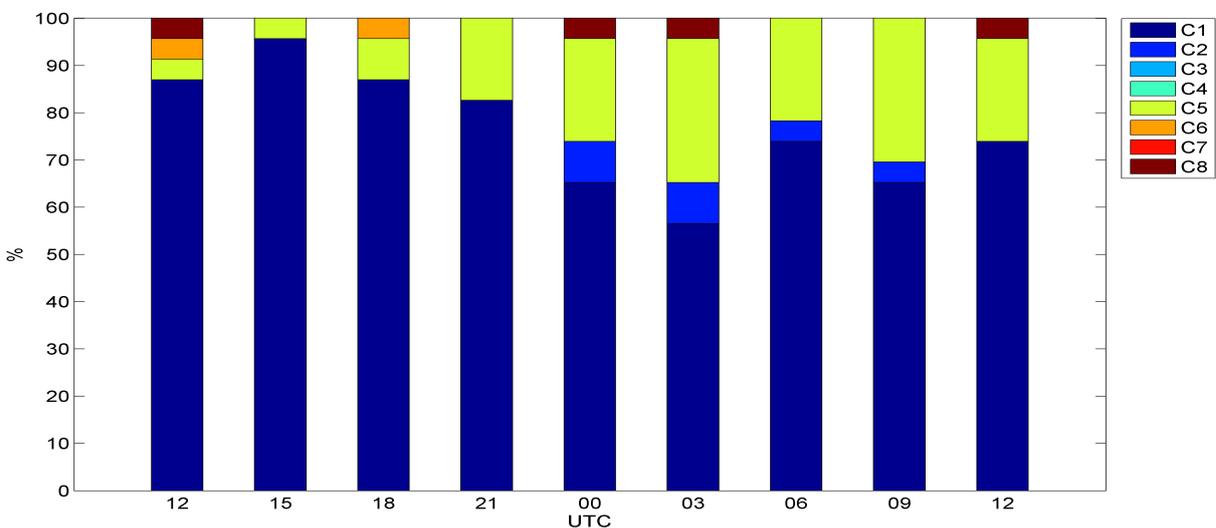


Figura 3.12: Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta (23.4° S, 70.4° W) para 23 eventos que registraron precipitaciones mayores a 1 mm y menores o iguales a 5 mm en el periodo 1970-2012.

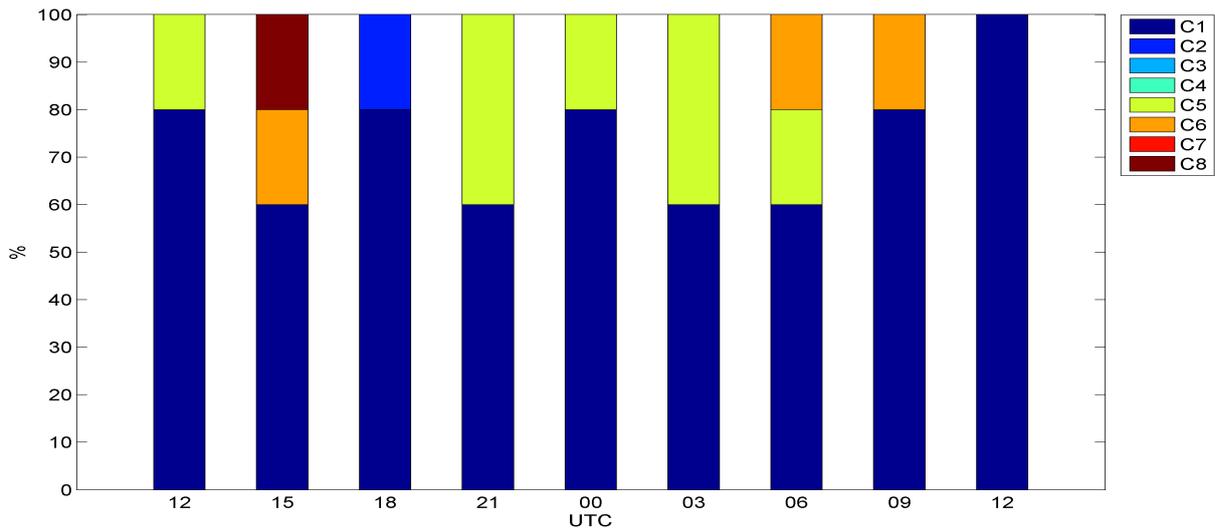


Figura 3.13: Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta ($23.4^{\circ}S$, $70.4^{\circ}W$) para 5 eventos que registraron precipitaciones mayores a 5 mm en el periodo 1970-2012.

Los eventos de precipitación (pp) de la figura 3.11 ($0,1 \leq pp \leq 1$) muestran un ciclo diario donde la categoría 1 predomina considerablemente sobre las demás. Ésta supera el 90% de 1200 a 2100 UTC, donde las claves que más se reiteran son 1,2 y 3 (ver Anexo I) que pertenecen a la categoría 1 (C1), es decir, las observaciones indican desarrollo de nubosidad en el cielo (o al menos la presencia de ellas). A partir del anochecer, la categoría 5 aumenta levemente y presenta peaks en 0000 UTC y en 0600 UTC. Llovizna débil en el momento de la observación (clave 50) es el tipo de precipitación que más veces fue registrada durante la noche hasta la mañana siguiente.

El ciclo diario de la figura 3.12 ($1 < pp \leq 5$) también muestra altos porcentajes de la categoría 1 entre 1200 y 2100 UTC, siendo el peak más alto en 1500 UTC (95.6%). La categoría 5 está sobre 20% desde que comienza la noche hasta 0900 UTC del día siguiente, donde llovizna intermitente y llovizna continua, son los registros que más se reiteran durante estas horas. Cabe destacar la presencia de claves correspondientes a la categoría 2, puesto que ésta señala el comportamiento del cielo en horas precedentes al momento del registro. Llovizna, lluvia e incluso chubascos de lluvia fueron observados durante este periodo.

Finalmente, la figura 3.13 muestra la distribución de la frecuencia de las claves registradas durante el desarrollo de eventos de precipitación mayores a 5 mm. Solo 5 eventos cumplen con este umbral, lo que tiene como consecuencia que los porcentajes mostrados en la figura sean engañosos, ya que 20% corresponde al registro de solo una clave en la hora correspondiente. Esto significa que no podemos hablar de un ciclo diario para estos eventos, pero si podemos analizar el comportamiento del cielo durante el desarrollo de éstos (ver Anexo II). Al observar los registros cada tres horas de estos casos, inmediatamente destaca el hecho que todos muestran una conducta distinta. El 20 de junio de 1975 precipitaron 9,5 mm. Las observaciones indican que una llovizna continua y fuerte desarrollada entre 2100 y 0000 UTC fue precedida y sucedida por bruma que se extendió hasta nueve horas antes y

después de registrada la precipitación. Un año después en el mes de agosto, el pluviómetro marcó 9,1 *mm* en Cerro Moreno. La gran diferencia es que durante este evento solo se apuntó lluvia continua y moderada a las 1500 UTC y en horas posteriores solo se observó disipación de la nubosidad. Tuvieron que pasar 15 años para que ocurriera un evento de precipitación en Antofagasta que superara los 5 *mm* de agua. Solo en un par de horas se registraron 14,1 *mm*, donde lluvia continua y fuerte comenzó a caer en la madrugada (0600 UTC) del 18 de junio de 1991. Nuevamente, tras 15 años un nuevo evento de intensa precipitación se registró para esta región. El 30 de agosto de 2006 marcó 7,7 *mm* de agua, donde una llovizna débil comenzó a caer después de medianoche y que tuvo su punto más intenso a las 0900 UTC con lluvias débiles pero continuas. Por último, el evento del 09 de julio de 2011 es el de menor precipitación registrada (5,4 *mm*). Sin embargo, es el que presenta la mayor cantidad de claves relacionadas con algún tipo de precipitación (5 en total). Éste comenzó con llovizna continua débil por la mañana para luego dar paso a chubascos débiles al mediodía. Posteriormente, la llovizna continuó hasta la medianoche.

3.4.2. Perfiles verticales de temperatura.

A partir de las mediciones obtenidas por radiosondas (sección 2.1) de la estación Cerro Moreno en Antofagasta, se obtuvieron los perfiles verticales de temperatura para cada día donde hubo precipitación.

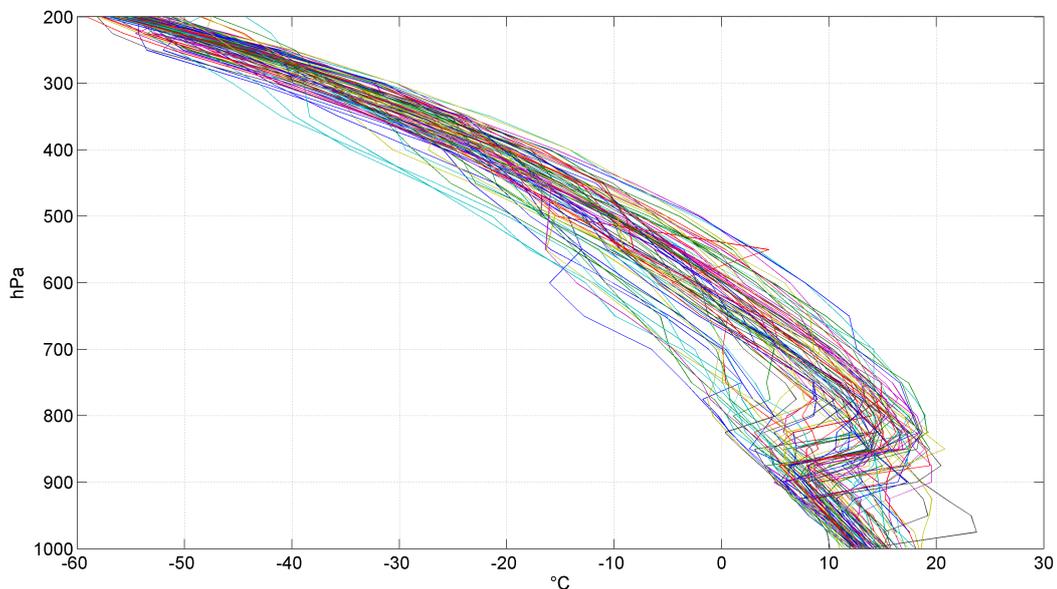


Figura 3.14: *Perfiles verticales de temperatura en 1200 UTC de cada día donde se registró precipitación en Cerro Moreno, Antofagasta.*

Al observar los perfiles verticales de temperatura de la figura 3.14, se observa que existe una brecha en el nivel de 700 hPa que divide los perfiles en dos grupos. Esta separación es la que entregó un primer indicio de cómo poder diferenciar los perfiles que presentan una capa de inversión térmica en su estructura vertical de los que no. Sin embargo, fue

necesaria una revisión más exhaustiva de cada perfil individualmente y se seleccionaron sólo los que cumplieron los criterios utilizados por Muñoz y Zamora (2010) para determinar los perfiles que puedan ser considerados como representativos de la inversión por subsidencia en esta zona. Éstos son: eliminar tanto los perfiles con una capa de inversión sobre los 3000 m, así como también los perfiles cuyas inversiones térmicas tengan su base en superficie. Además, considerar sólo las inversiones que hayan significado un aumento mayor a 2°C de la temperatura y una disminución en la humedad relativa mayor a 20 %.

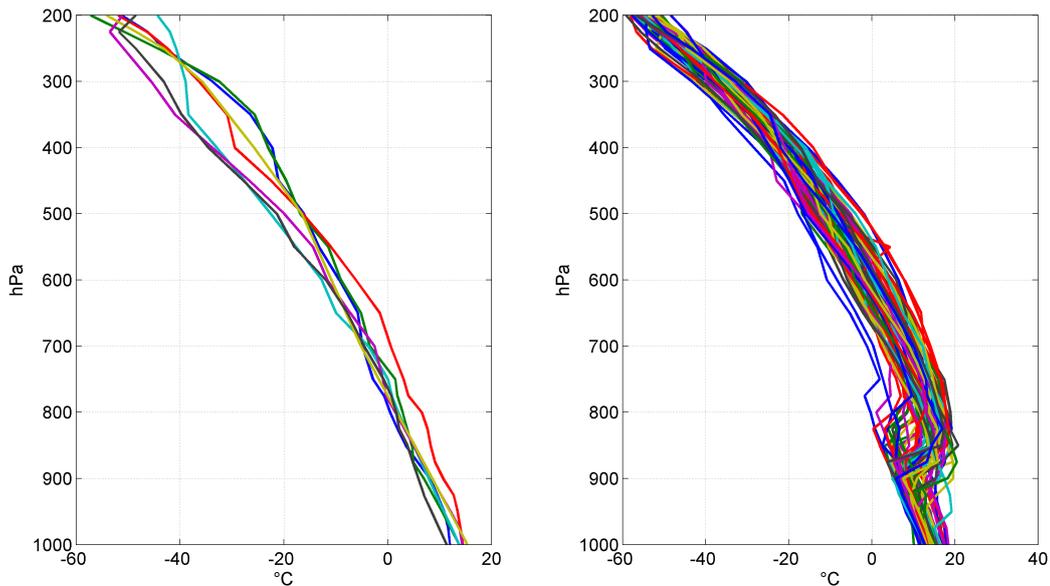


Figura 3.15: Panel izquierdo: Perfiles verticales de temperatura de eventos sin presencia de la capa de inversión térmica. Panel derecho: Perfiles verticales de temperatura de eventos que presentan una capa de inversión térmica. El periodo considerado en ambos paneles es 1970 - 2014.

De los 97 eventos de precipitación registrados en Antofagasta en el periodo 1970 - 2014, no todos poseen un perfil vertical con datos. Sin embargo, 93 % de los eventos (90) poseen la información necesaria para llevar a cabo el análisis. A éstos, hay que restarles los perfiles que no fueron considerados debido a que cumplían con algunos de los criterios señalados anteriormente. Seis perfiles no superaban el gradiente vertical mínimo de aumento de temperatura (2°C), 3 perfiles presentaban una capa de inversión en superficie, mientras que la altura de la base de inversión de otros 2 perfiles superaba los 3000 m. Finalmente, 4 perfiles verticales no fueron considerados puesto que sus respectivos perfiles de humedad relativa no mostraban un decrecimiento de al menos 20 % en los niveles de presión correspondientes a la capa de inversión por subsidencia. Entonces, para llevar a cabo este análisis se contó con 74 perfiles verticales de temperatura (76 % del total de los eventos).

La figura 3.15 muestra los dos grupos resultantes. El primer grupo (panel izquierdo) contiene 7 de los 74 perfiles de temperatura disponibles para el periodo antes mencionado, es decir, sólo 9 % de los eventos presenta ausencia de la capa de inversión al ocurrir precipitación. Mientras que el panel derecho de la figura 3.16, muestra el segundo grupo conformado por 67 perfiles (90 %) que incluyen una capa de inversión por subsidencia en su estructura.

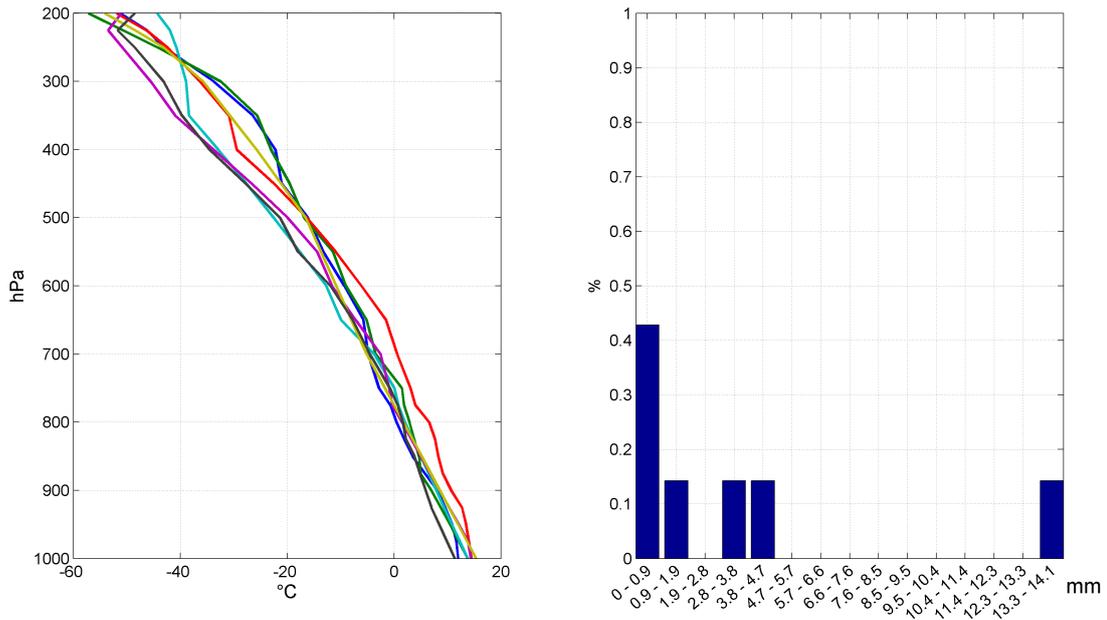


Figura 3.16: Panel izquierdo: Perfiles verticales de temperatura de eventos sin presencia de la capa de inversión térmica. Panel derecho: Distribución de la frecuencia de precipitaciones según la cantidad de lluvia registrada por evento. El periodo considerado en ambos paneles es 1970 - 2014.

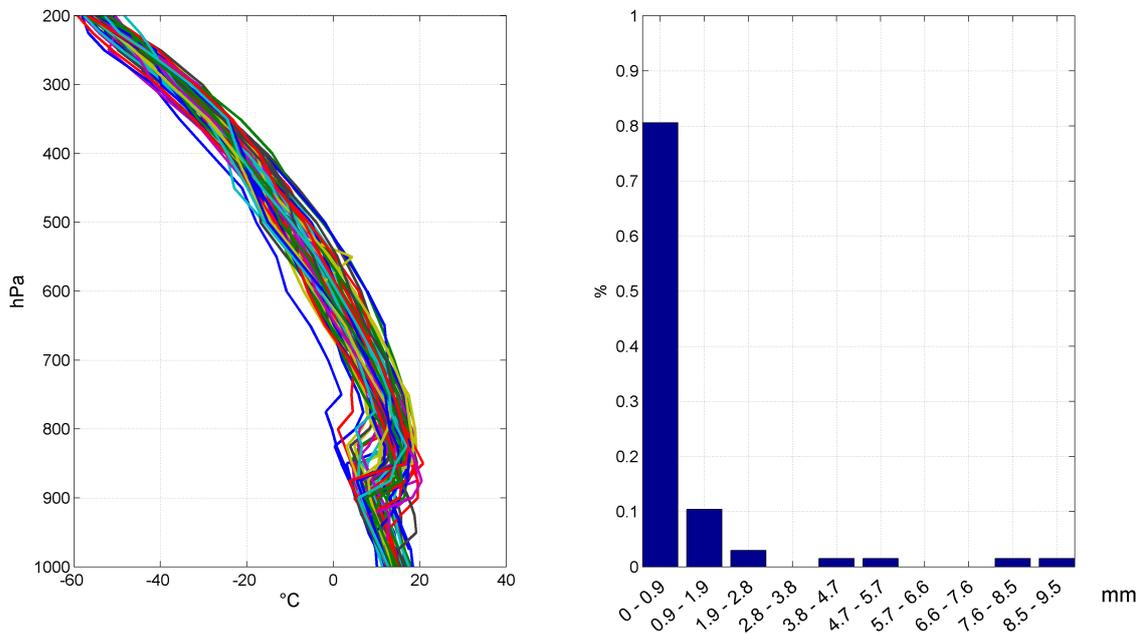


Figura 3.17: Panel izquierdo: Perfiles verticales de temperatura de eventos que presentan una capa de inversión térmica. Panel derecho: Distribución de la frecuencia de precipitaciones según la cantidad de lluvia registrada por evento. El periodo considerado en ambos paneles es 1970 - 2014.

Las figuras 3.16 y 3.17 muestran los perfiles verticales de temperatura de eventos donde la capa de inversión térmica desapareció durante el evento de precipitación y los perfiles verticales de eventos donde la capa de inversión por subsidencia se mantuvo, respectivamente. Además, entrega información de cómo se distribuyó la cantidad de precipitación asociada a cada caso. La figura correspondiente al caso de los eventos sin inversión térmica señala que el mayor porcentaje de eventos (43%), corresponde a precipitación que no superó 1 *mm*. El resto de las precipitaciones se distribuye en frecuencias de 15%, es decir, sólo 1 evento por intervalo. Cabe destacar que el evento que más agua caída ha dejado sobre Antofagasta (14,1 *mm*) presenta un perfil vertical de temperatura sin inversión por subsidencia.

Por otra parte, la figura 3.17 muestra que predominan eventos donde las precipitaciones no han sido intensas. 80% de los eventos no supera el primer intervalo definido para la precipitación. Incluso, el segundo porcentaje más alto es el que muestra el intervalo 0,9-1,9 *mm* (10%) y que incluye 7 de los 67 eventos de este caso. El resto de los eventos se distribuye en los intervalos restantes, pero con sólo 1 o 2 eventos por intervalo. La precipitación más intensa registrada para este caso es de 9,5 *mm*.

3.4.3. Análisis de Agrupamiento.

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos al utilizar el algoritmo de agrupamiento no jerárquico K-means. Para llevar a cabo este análisis, y cómo se detalló en la sección 2.5.1, inicialmente el usuario debe ingresar la cantidad de clusters que desea obtener. Para este trabajo se decidió utilizar 8 grupos o clusters, puesto que tras haber probado con 9 e incluso 10 clusters, se concluyó que 8 era la cantidad adecuada puesto que los resultados obtenidos con un número de clusters mayor a éste mostraron una tendencia a entregar grupos bastante similares entre sí.

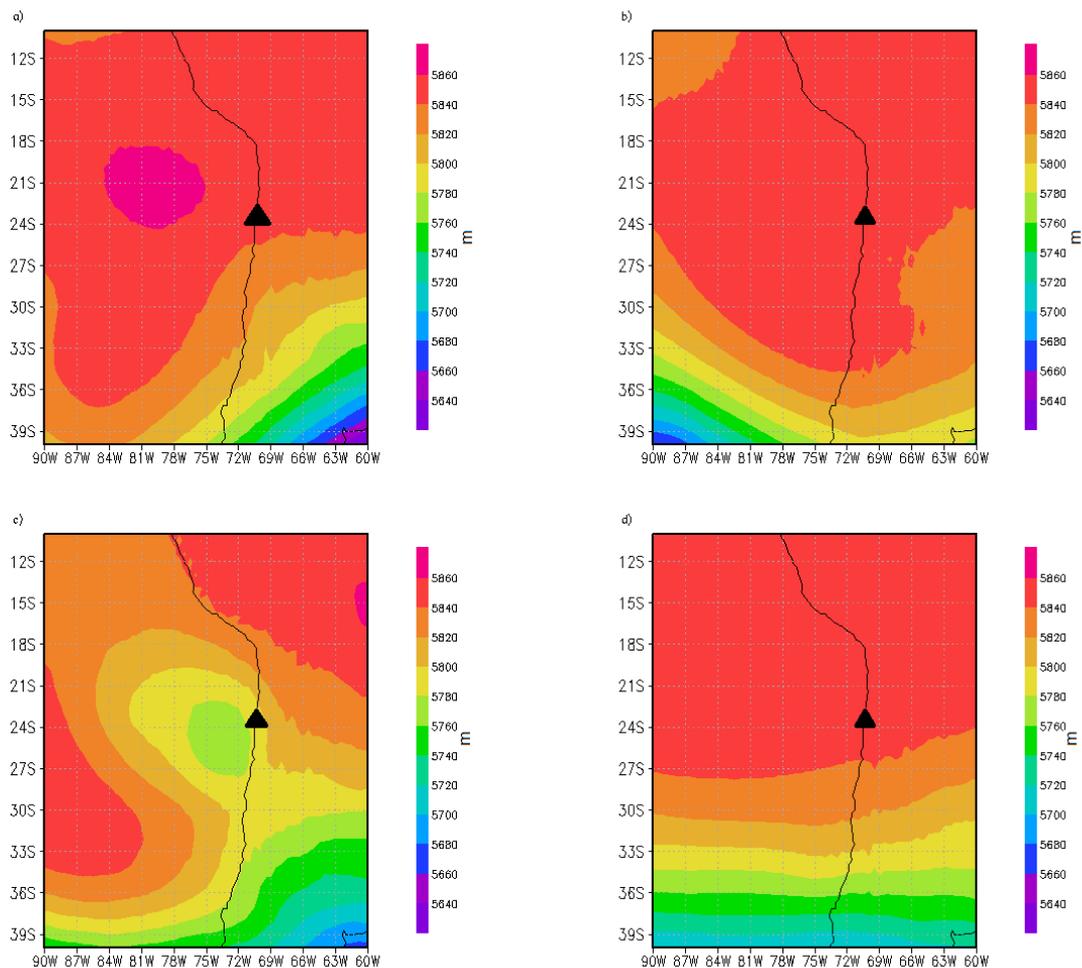


Figura 3.18: Clusters obtenidos por el método K-means usando como atributo campos de altura geopotencial en 500 hPa. Las áreas sombreadas muestran el campo promedio de altura geopotencial para cada uno de los grupos. En esta figura se muestran los clusters 1(a), 2(b), 3(c) y 4(d). El triángulo de color negro representa la ubicación de Antofagasta.

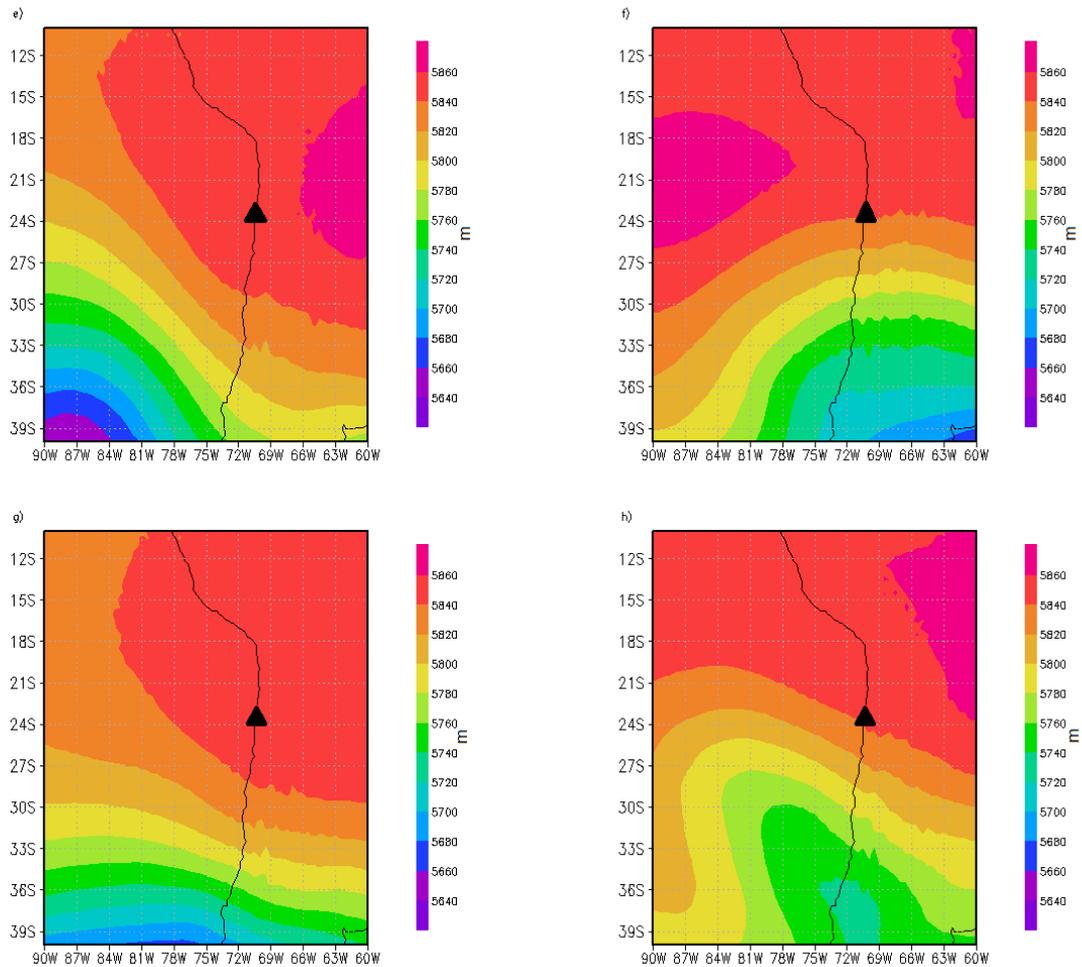


Figura 3.19: Clusters obtenidos por el método K-means usando como atributo campos de altura geopotencial en 500 hPa. Las áreas sombreadas muestran el campo promedio de altura geopotencial para cada uno de los grupos. En esta figura se muestran los clusters 5(e),6(f),7(h) y 8(h). El triángulo de color negro representa la ubicación de Antofagasta.

C	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
C1	1	-	-	-	-	-	2	1	3	-	-	-	7
C2	-	-	-	-	-	-	3	3	3	-	-	-	9
C3	-	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-	-	3
C4	-	-	-	-	1	2	2	7	8	1	2	-	23
C5	2	1	-	-	-	3	-	3	2	1	-	1	13
C6	1	-	1	-	4	-	2	1	2	1	1	-	13
C7	-	-	1	1	1	3	2	-	7	2	2	-	19
C8	-	-	1	1	-	1	2	1	3	-	1	-	10

Cuadro 3.14: Distribución mensual de eventos de precipitación correspondientes a cada uno de los 8 clusters.

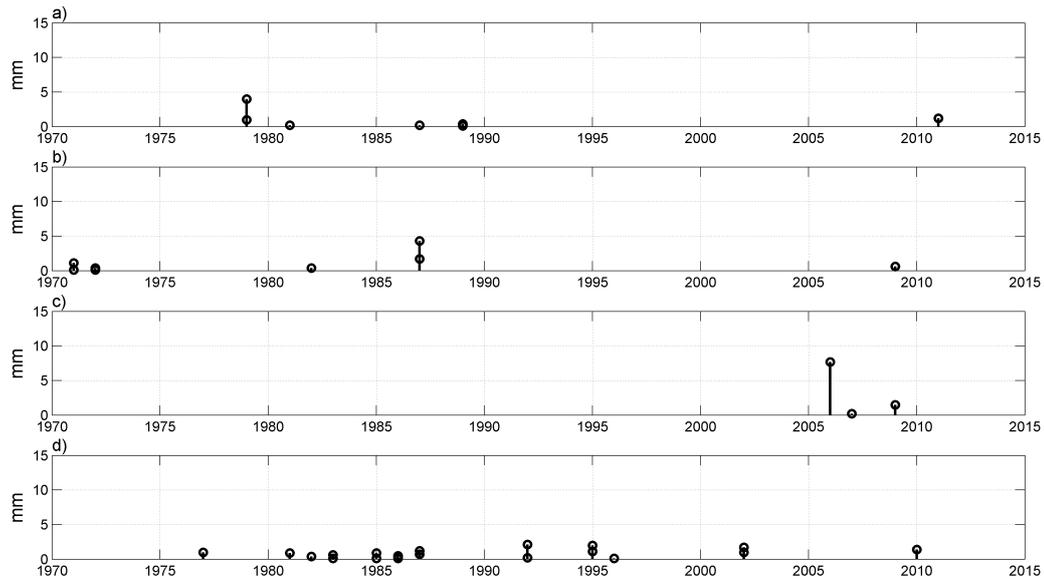


Figura 3.20: Variabilidad interanual de los eventos de precipitación y la cantidad respectiva de agua caída en cada evento de Antofagasta entre 1970 y 2014 de los clusters 1,2,3 y 4.

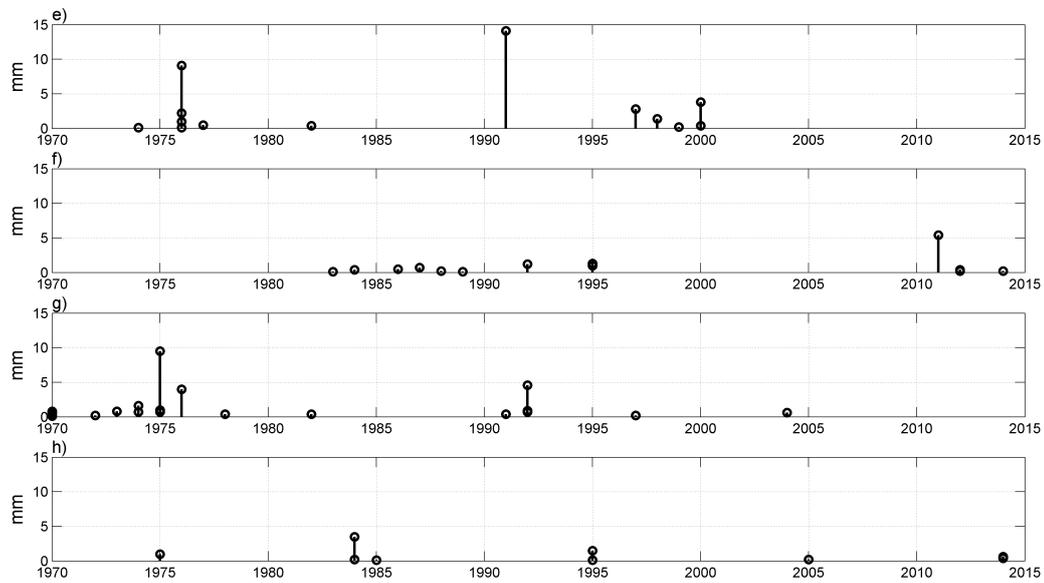


Figura 3.21: Variabilidad interanual de los eventos de precipitación y la cantidad respectiva de agua caída en cada evento de Antofagasta entre 1970 y 2014 de los clusters 5,6,7 y 8.

Las figura 3.19 y 3.20 muestran los 8 clusters obtenidos con el método K-means. La distribución casi totalmente zonal de la altura geopotencial mostrada en el cluster 4 (figura 3.19d) sobre el Pacífico suroriental y gran parte del cono sur de sudamérica, es la configuración que más veces se repite entre los campos de altura geopotencial. Representa aproximadamente 24 % de los eventos y se distribuye en los meses de invierno y primavera, aunque con mayor frecuencia en agosto y septiembre. Las precipitaciones asociadas a los eventos de este cluster (figura 3.21d) tienen una media de 0,7 *mm*, y su variabilidad interanual muestra que la mayor cantidad de eventos se concentra en la década de 1980.

El cluster 7 (figura 3.20g) es la segunda configuración que más veces se repite entre los campos de altura geopotencial. Los 19 eventos (20 % del total) de este cluster, se distribuyen en gran parte del año, excepto en los meses de verano. Este campo medio es similar al observado en el cluster 4, con la diferencia de que en el cluster 7, la alta en altura que está sobre Antofagasta se ve desplazada hacia el este y la distribución de la altura geopotencial al sur de la región presenta un pequeño valle en su estructura. La media de las precipitaciones de este cluster es de 1,7 *mm*, sin embargo, contiene tres eventos que registraron una cantidad superior a la media anual en Antofagasta, siendo el de mayor cantidad el evento del 20 de junio de 1975 que dejó 9,5 *mm*.

Los clusters 5, 6 y 8 muestran vaguadas de distintas profundidades y orientaciones. Las dos primeras son vaguadas poco profundas, con ejes en dirección noreste y noroeste respectivamente y que no alcanzan a tener influencia sobre Antofagasta. Cada una de ellas representan a 14 % de los eventos y su distribución mensual muestra que estos clusters son los únicos que cuentan con eventos durante los meses de verano, aunque el cluster 6 presenta sólo un evento en enero. La variabilidad interanual de las precipitaciones del cluster 5 muestra precipitaciones de distintas magnitudes en los últimos 40 años, las cuales varían desde eventos muy débiles (0,1 *mm*) a eventos muy intensos para la región, como la tormenta del aluvión de 1991 (14,1 *mm*). En el cluster 6 predominan los eventos débiles, cuya media no supera 1 *mm* de precipitaciones. Otro aspecto destacable es el hecho de que existen brechas de aproximadamente 15 años donde no se registraron eventos pertenecientes a este cluster. La vaguada más profunda y que posee un eje inclinado hacia el noreste es la correspondiente al cluster 8. En este caso, Antofagasta queda bajo la zona de prevaguada, situación que representa a 10 % de los eventos en total y que es ligeramente más frecuente durante los meses de invierno. Interanualmente los eventos de precipitación se distribuyen a sólo un par de eventos en cada década y presentan una media de 0,8 *mm*.

El campo medio de altura geopotencial correspondiente al cluster 3 (figura 3.19c) muestra una baja segregada en altura sobre Antofagasta. Sólo 3 eventos muestran este tipo de configuración, y ocurrieron en la segunda mitad de la década del 2000. La intensidad de las precipitaciones señala que los tres eventos son diferentes, ya que este grupo presenta un evento intenso (7,7 *mm*), uno débil (1,5 *mm*,) y por último uno que apenas registró agua caída (0,2 *mm*).

Los clusters 1 y 2 coinciden en que representan las configuraciones menos comunes entre los eventos (7% y 9% respectivamente). Ambos campos medios muestran a Antofagasta bajo la influencia de una alta presión en altura, situación sinóptica que se concentra entre eventos de julio y septiembre. Aunque, la alta en altura representada en el cluster 2 presenta un desplazamiento hacia el sur que alcanza latitudes más altas que la observada en el cluster 1, y que influye en la distribución de las isohipsas ubicadas al sur de ésta. Tanto la variabilidad interanual de cada cluster, como sus respectivas precipitaciones, también son bastante similares. Ambos grupos poseen eventos distribuidos a lo largo de los 45 años de análisis, pero con brechas importantes de tiempo sin registrar eventos. Las precipitaciones de estos clusters también tienen comportamientos bastante parecidos, puesto que tienen una media de 1 mm, sus eventos más intensos son de aproximadamente 4 mm y el resto de eventos lo constituyen en su mayoría precipitaciones débiles que no superaron 1 mm.

3.4.3.1. Ciclo diario.

De manera análoga a lo realizado en la sección 3.4.1, se determinó el ciclo diario que presenta la capa más baja de la atmosfera durante el desarrollo de eventos de precipitación, correspondientes a cada uno de los 8 clusters. El significado de las categorías mostradas en las figuras 3.23 y 3.24 son equivalentes a las que muestra el cuadro 3.13.

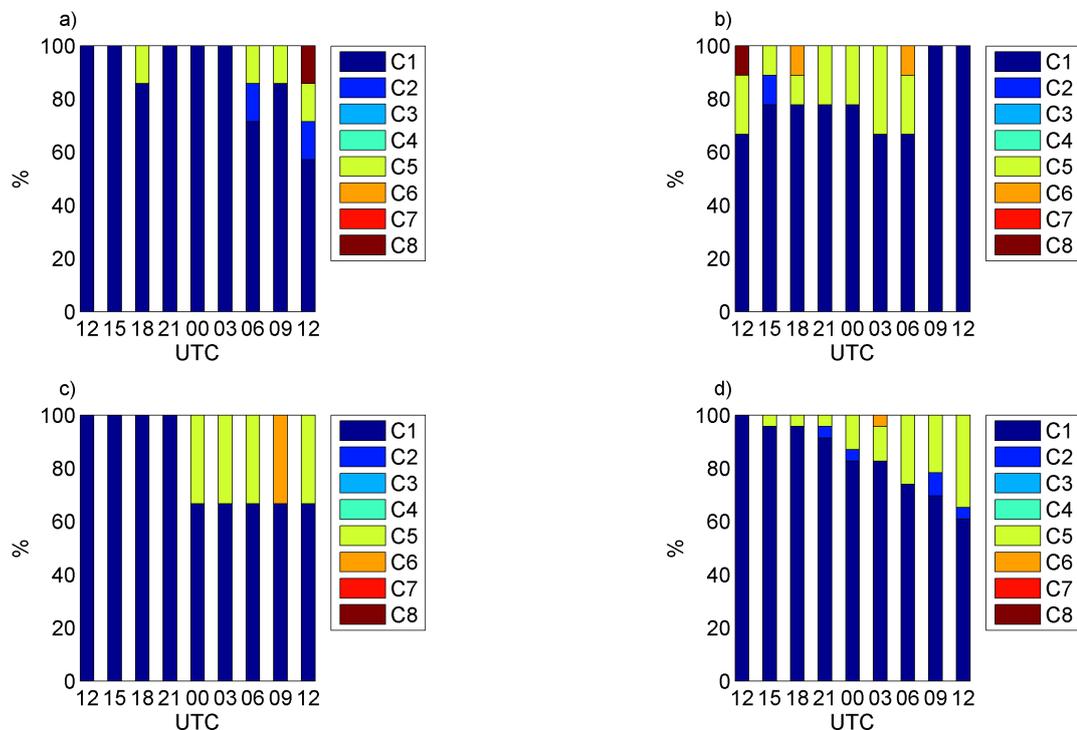


Figura 3.22: Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta ($23.4^{\circ}S$, $70.4^{\circ}W$) para los eventos correspondientes al cluster 1(a), cluster 2(b), cluster 3(c) y cluster 4(d) para el periodo 1970 - 2012.

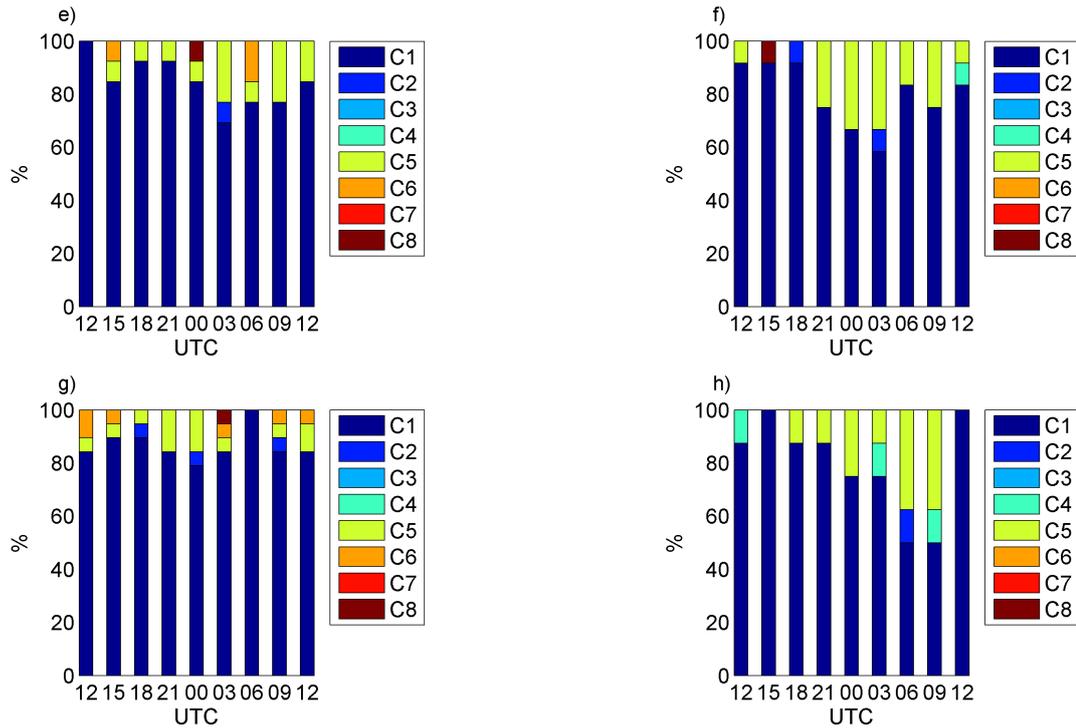


Figura 3.23: Distribución de la frecuencia de las claves registradas cada tres horas, que representan el “tiempo presente” en la estación de Antofagasta ($23.4^{\circ}S$, $70.4^{\circ}W$) para los eventos correspondientes al cluster 5(e), cluster 6(f), cluster 7(g) y cluster 8(h) para el periodo 1970 - 2012.

La figura 3.23d muestra el ciclo diario que presenta la atmósfera baja durante el desarrollo de precipitaciones en el cluster 4, el cual es el que agrupa una mayor cantidad de eventos (24% del total). La distribución del “tiempo presente sinóptico” muestra que, de las categorías que representan algún tipo de estado de la atmósfera que dejó algún registro de agua caída (niebla, llovizna, lluvia, tormenta, etc), las que más predominan son las que corresponden a la categoría 5 (principalmente lloviznas débiles). Su frecuencia supera el 20% desde la madrugada, hasta un par de horas posterior al amanecer en Antofagasta. Un comportamiento similar muestran los clusters 1, 3 y 8. El primero de éstos presenta un ciclo diario donde, entre 0600 y 1200 UTC, aparecen categorías que representan claves de lloviznas intermitentes (clave 50, ver Anexo I) de distintas intensidades. El ciclo diario del cluster 3 (fig. 3.23c) sugiere que los eventos que representan una baja segregada en altura sobre Antofagasta (fig. 3.19c) ocurrieron durante la madrugada, y la diferencia entre las magnitudes de las precipitaciones registradas (fig. 3.21c) tiene que ver con el dispar comportamiento de la atmósfera durante los 3 eventos que conforman este cluster. Este comportamiento se ve reflejado en que el evento más intenso ($7,7\text{ mm}$) tiene registros de lloviznas débiles y de lluvia continua (clave 61) entre 0300 y 0900 UTC. El evento que registró $1,5\text{ mm}$ presenta claves de lloviznas débiles y neblina durante la madrugada, y finalmente el evento más débil de este cluster ($0,2\text{ mm}$) solo presenta un registro de bruma en 1200 UTC. En la distribución de claves de “tiempo presente” del cluster 8, se observa que las de categoría 5 son frecuentes entre 1800 y 0900 UTC, y predominan durante la madrugada (37.5%). La clave 50 (llovizna intermitente

débil) es la que presenta una mayor cantidad de registros durante estos eventos.

El ciclo diario del cluster 2 muestra que la mayoría de las claves se distribuyen después del mediodía hasta horas posteriores a la medianoche en Antofagasta. Se presentan claves de categoría 5 (principalmente lloviznas débiles), así como también de categoría 6 (lluvias de distintas intensidades) e incluso un registro correspondiente a la categoría 8 (clave 80: chubascos débiles).

Los cluster 5 y 7 presentan un ciclo diario bastante similar en cuanto a la distribución temporal de claves que representan precipitación. Al igual que como se ha observado en los ciclos diarios de los demás clusters, registros asignados a la categoría 5 son los que más abundan, mayoritariamente de las claves 50 (llovizna débil intermitente) y 55 (llovizna fuerte continua). Durante el desarrollo de eventos en ambos clusters, se registraron en reiteradas ocasiones claves de categoría 6 (lluvias de distintas intensidades), las cuales en la distribución del cluster 7, se observa que ocurrieron entre el amanecer y posterior al mediodía.

Finalmente el ciclo diario del cluster 6 muestra que las precipitaciones, fundamentalmente lloviznas, se distribuyen a lo largo de todo día pero con porcentajes más altos de registros en horas precedentes a medianoche.

3.4.4. Espesor de la nubosidad.

Como ya se ha mencionado en secciones anteriores, la capa límite marina (CLM) en el sector subtropical del Pacífico Suroriental está limitada verticalmente por una inversión térmica que persiste durante todo el año, la cual está asociada al movimiento descendente y adiabático del aire denominado como subsidencia. Inmediatamente bajo esta capa de inversión, generalmente se observa una cubierta de nubes estrato-cumuliformes cuya base coincide con el nivel de condensación por mezcla turbulenta en el seno de la CLM. A partir de esto, y utilizando la información disponible de alturas, tanto de la base de la inversión térmica como también de la base de la nubosidad, se determinó la variación del espesor de ésta durante un evento de precipitación para cada uno de los clusters obtenidos a través de la comparación de las variables antes mencionadas.

Es importante detallar que debido a que los datos correspondientes a la altura de la base de la inversión tienen una resolución temporal de un dato por día (1200UTC), se optó por determinar el promedio cada 24 horas de los datos de altura de la base de las nubes para poder comparar ambos datos durante el periodo 1970-2013. Además, es necesario recordar que para llevar a cabo este análisis se utilizaron los perfiles verticales de temperatura que presentan una capa de inversión térmica en su estructura y que pasaron los filtros detallados en la sección 3.4.2.

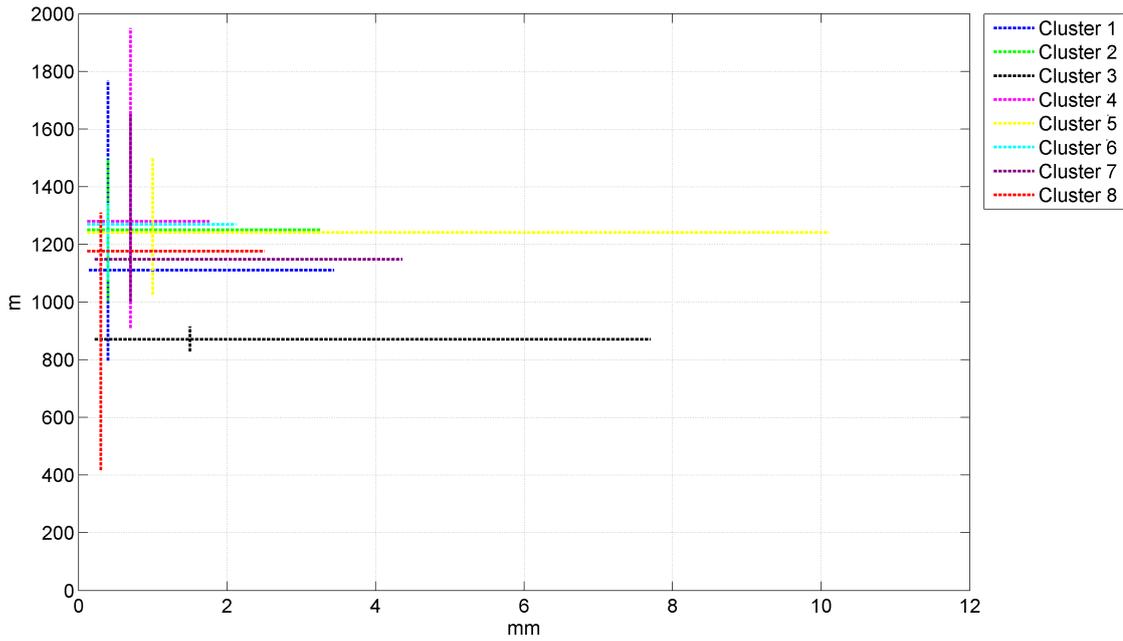


Figura 3.24: Percentiles 10, 50 y 90 de los datos de altura de la base de la inversión por subsidencia (eje y) y de la precipitación correspondiente (eje x) a los eventos que pertenecen a cada uno de los ocho clusters obtenidos para el periodo 1970-2013. Los percentiles 10 y 90 corresponden a los extremos de las líneas horizontales (precipitación) y verticales (base de la inversión), mientras que el 50 se muestra como la intersección de las líneas verticales y horizontales.

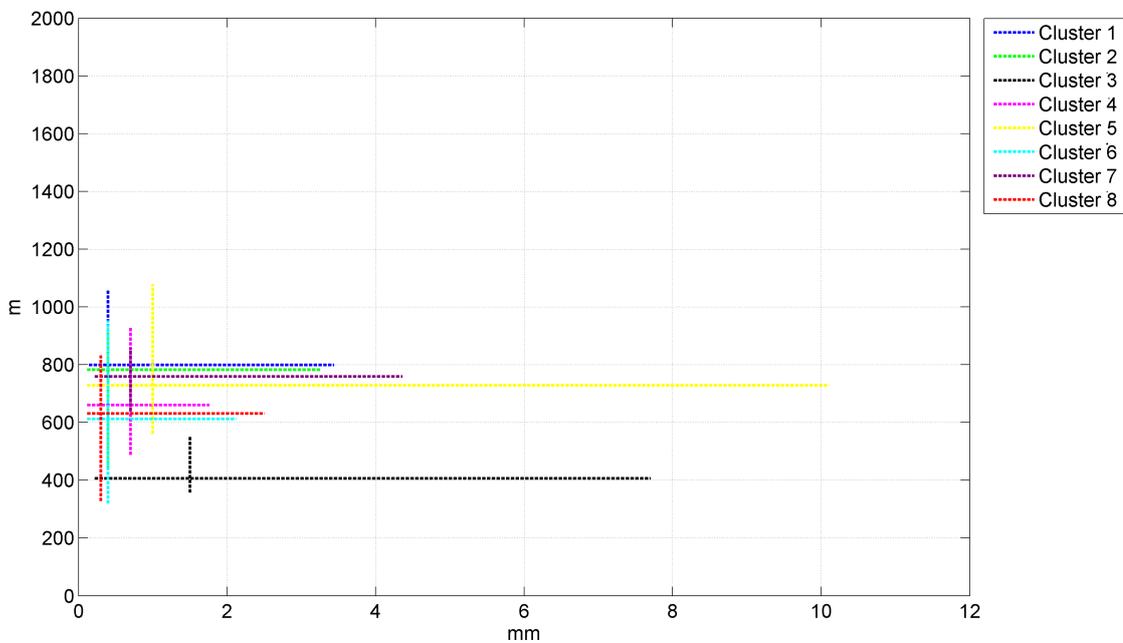


Figura 3.25: Percentiles 10, 50 y 90 de los datos de altura de la base de la nubosidad (eje y) y de la precipitación correspondiente (eje x) a los eventos que pertenecen a cada uno de los ocho clusters obtenidos para el periodo 1970-2013. Los percentiles 10 y 90 corresponden a los extremos de las líneas horizontales (precipitación) y verticales (base de la nubosidad), mientras que el 50 se muestra como la intersección de las líneas verticales y horizontales.

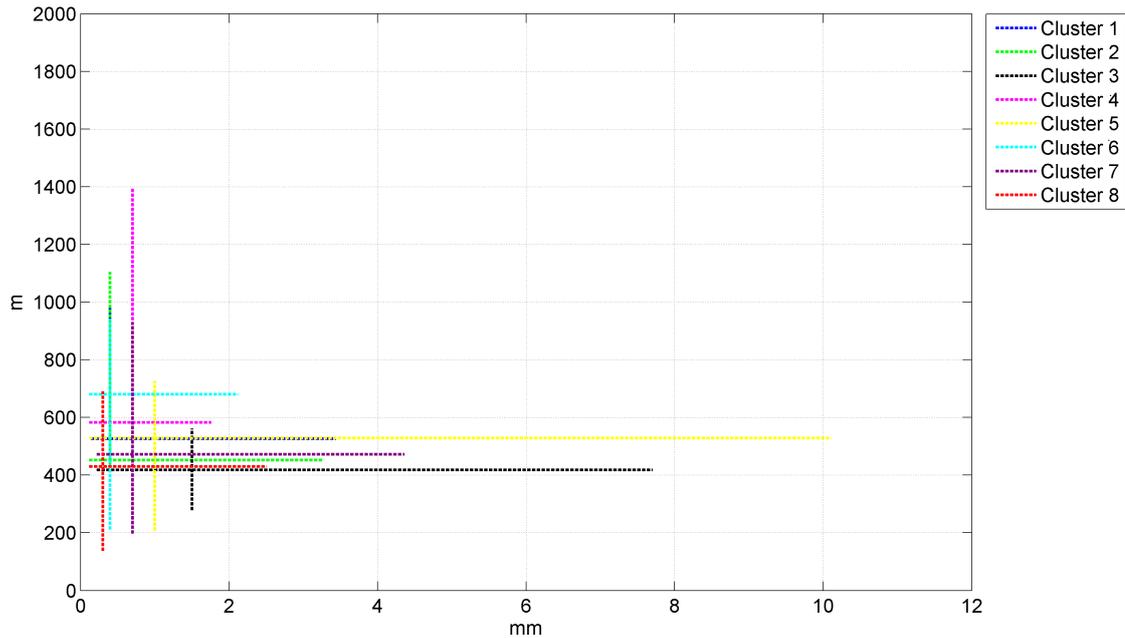


Figura 3.26: Percentiles 10, 50 y 90 del espesor resultante de la nubosidad (eje y) y de la precipitación correspondiente (eje x) a los eventos que pertenecen a cada uno de los ocho clusters obtenidos para el periodo 1970-2013. Los percentiles 10 y 90 corresponden a los extremos de las líneas horizontales (precipitación) y verticales (espesor), mientras que el 50 se muestra como la intersección de las líneas verticales y horizontales.

Las figuras 3.24, 3.25 y 3.26 muestran las variables expresadas en percentiles. Un percentil es una medida estadística que corresponde al valor de una variable y que indica el porcentaje de datos, ordenado previamente de menor a mayor, que están por debajo de dicho valor. Según la figura 3.24, el cluster 2 (verde), 4 (magenta), 5 (amarillo) y 6 (cian), poseen una mediana cuyo valor es cercano al de la media de la altura de la base de inversión de todos los perfiles seleccionados (aprox. 1260 m.). Es decir, el 50% de los perfiles correspondientes a estos grupos, poseen una inversión térmica cuya base está sobre la media de todos los perfiles que presentan una capa de inversión. Por otra parte, la figura 3.25 muestra que los datos de altura de la base de las nubes de los clusters 3, 4, 6 y 8 poseen una mediana que está bajo la altura de la base de la nubosidad media (700 m) que presentan los perfiles con una inversión térmica en su estructura. Finalmente, la figura 3.26 muestra el espesor de la nubosidad que resulta al comparar los datos mostrados en las figura 3.24 y 3.25. El espesor promedio de la nubosidad durante un evento de precipitación es de 580 m. Este valor es superado por el percentil 50 de los clusters 4 (magenta) y 6 (cian), aunque a estos hay que añadir el cluster 2 (verde) y el cluster 7 (púrpura), los cuales también presentan un porcentaje importante de eventos que presentan un espesor de la nubosidad mayor al valor promedio.

3.5. Análisis de Compuestos.

El análisis de compuestos permite estudiar distintas características y comportamientos asociados a la dinámica atmosférica presente durante los eventos de interés para este trabajo. Como se señaló en la sección 2.6., al aplicar el método K-means se utilizó como atributo de agrupamiento los campos de altura geopotencial en 500 hPa para cada evento de precipitación entre 1970 y 2014. Los campos medios resultantes a partir de este método fueron utilizados como característica inicial para este análisis puesto que el comportamiento que en ellos se ve reflejado expresa la condición sinóptica bajo la cual está sometida una región, tanto a nivel de superficie como en niveles más altos de la atmósfera. Por esta razón se utilizaron compuestos de magnitud media y dirección del viento en 300 hPa y compuestos de presión media a nivel del mar para cada uno de los ocho clusters obtenidos. Además, se agregaron al análisis perfiles verticales, tanto de humedad relativa, así como también de temperatura potencial equivalente, con el fin de encontrar un comportamiento particular de estas variables asociado a alguno de los clusters.

Los compuestos correspondientes al cluster 1 (figura 3.27), muestran a Antofagasta bajo una “alta” de altura geopotencial en 500 hPa (figura 3.27a), y vientos del oeste predominantes en 300 hPa. El ASPS se ve desplazado hacia el sur, pero la intensidad de su núcleo no está alterada (figura 3.27b). La humedad relativa en superficie es mayor al 85 % en la mayoría de los casos, llegando a valores cercanos al 100 % entre 1000 y 1800 m de altura. Los perfiles de temperatura potencial equivalente muestran sólo dos perfiles (negro y amarillo) con un gradiente negativo con la altura (disminución de $4^{\circ}C$ aprox.) que corresponden a eventos débiles de 1 mm y 0,2 mm respectivamente.

La figura 3.28a (cluster 2) también muestra a Antofagasta bajo la zona de mayor altura geopotencial en 500 hPa, también con vientos del oeste pero más intensos que los mostrados en el caso anterior. Además, al igual que en los compuestos del cluster 1, se aprecia una circulación anticiclónica en el extremo norte de Chile. El centro del ASPS (figura 3.28b) se encuentra cercano a $30^{\circ}S$ y el mayor valor de presión observado en él no supera 1020 hPa. Los perfiles verticales muestran que la humedad relativa en superficie fluctúa entre 70 y 80 % y alcanza valores mayores al 90 % sobre la capa de 800 m de altura. Sólo un perfil muestra un gradiente negativo de temperatura potencial equivalente (rojo) que supera un umbral de $2^{\circ}C$ de disminución con la altura y corresponde a un evento donde precipitaron 0,4 mm.

Los compuestos obtenidos para el cluster 3 muestran un vórtice ciclónico en altura, o baja segregada, de los vientos del oeste ubicada sobre Antofagasta. Además, la magnitud del viento en 300 hPa muestra una corriente en chorro desarrollándose en este nivel, donde el sector norte de su entrada está posicionado sobre Antofagasta. La humedad relativa aumenta con la altura alcanzando valores cercanos al 100 % sobre aproximadamente 700 m. Mientras que en los de temperatura potencial equivalente se observa que el perfil del evento del 30 de agosto de 2006 presenta una capa con un gradiente negativo de θ_e que alcanza $4^{\circ}C$ de disminución. Este evento registró 7,7 mm de agua caída.

La figura 3.30 muestra una configuración para el cluster 4 donde la altura geopotencial en 500 hPa muestra una distribución prácticamente zonal en la región (figura 3.30a). Una vez más, al igual que en los compuestos obtenidos para el cluster 1 y 2, Antofagasta se encuentra bajo la mayor altura geopotencial en este nivel de la atmósfera, donde predominan vientos del oeste, con una circulación anticiclónica en la zona norte de Chile. La figura 3.30b muestra un ASPS debilitado y desplazado levemente hacia el sur cuyo núcleo se encuentra cercano a $34^{\circ}S$. La humedad relativa muestra una diversidad en su comportamiento vertical, aunque un número importante de eventos supera el 90 % de humedad en superficie y su valor aumenta progresivamente hasta alturas sobre 1500 m. Pese a que este cluster es el que presenta una mayor cantidad de eventos, sólo dos de ellos presentan perfiles con un descenso con la altura de θ_e . Sin embargo, estos eventos son categorizados como débiles debido a que la precipitación registrada en ellos no supera 1 *mm*.

Una vaguada cuyo eje posee una leve dirección noreste es lo que se aprecia en la configuración sinóptica obtenida para el cluster 5 (figura 3.31a). Sin embargo, Antofagasta no se ve influenciada por ella. Sobre la zona de estudio se observan vientos del noroeste en 300 hPa con una magnitud que oscila entre 16 y 18 nudos. El ASPS (figura 3.31b) se observa muy debilitado, donde su centro alcanza una presión mínima de 1016 hPa. Una cantidad importante de eventos de este cluster presenta una humedad relativa sobre el 85 % en superficie. Sin embargo, sólo un par de ellos alcanza valores cercanos al 100 % al aumentar la altura. Ninguno de los perfiles de temperatura potencial equivalente muestra un gradiente negativo con el aumento de la altura. Otra vaguada, pero esta vez con un eje en dirección noroeste (figura 3.32a), se observa en la configuración sinóptica del cluster 6. Podemos decir que Antofagasta se encuentra en el límite entre el eje de la vaguada y la zona de prevaguada. Predominan vientos del oeste en las capas más altas de la atmósfera, con una magnitud media de 19 nudos. El ASPS mantiene su intensidad característica pero se ve desplazado hacia el sur (figura 3.32b). En general, los perfiles de humedad relativa muestra una tendencia a aumentar su valor con la altura hasta un límite cercano a los 1000 m. Sólo dos perfiles de θ_e pueden ser declarados como potencialmente inestables. Estos perfiles corresponden a los eventos del 30/01/1987 y del 21/08/1989, los cuales registraron una precipitación de 0,7 *mm* y 0,1 *mm* respectivamente.

Los compuestos del cluster 7 muestran una vez más a Antofagasta bajo la zona de mayor altura geopotencial en 500 hPa (figura 3.33a), pero esta vez con vientos del noroeste en 300 hPa que alcanzan una magnitud de 18 nudos. En esta configuración, la circulación anticiclónica en altura, vista en otros compuestos anteriores, se ve desplazada hacia el este posicionándose sobre territorio boliviano. La figura 3.33b, muestra un anticiclón desplazado levemente hacia el sur pero con un claro debilitamiento en su intensidad, siendo su valor máximo cercano a 1020 hPa. Al igual que los perfiles del cluster 6, en la mayoría de los casos la humedad relativa tiende a aumentar con la altura en la capa más próxima a la superficie, alcanzando un valor máximo a distintas alturas respectivamente. Sin embargo, hay un par de casos donde la humedad relativa disminuye a medida que la altura aumenta en los primeros

1000 m. Seis de los 19 perfiles correspondientes al cluster 7 presentan un gradiente negativo de θ_e con la altura. Sin embargo, todos corresponden a eventos que no superan 1 mm de precipitación.

Finalmente, los compuestos correspondientes al cluster 8 muestran una vaguada profunda sobre territorio chileno (figura 3.34a) cuyo eje tiene una dirección noroeste. Antofagasta se encuentra bajo la influencia de la prevaguada y cercano al sector norte de la entrada de una corriente en chorro en altura. Predominan vientos del noroeste cuya magnitud alcanza un valor entre 24 y 27 nudos. El ASPS se encuentra muy desplazado hacia el sur (figura 3.34b), donde su núcleo alcanza incluso los $39^\circ S$ y su intensidad se ve ligeramente disminuida llegando a 1023 hPa. La humedad relativa muestra un comportamiento similar al de los clusters 6 y 7, es decir, entre la superficie y 1000 m de altura predominan los perfiles donde la humedad aumenta con la altura aunque también hay un par de casos donde ocurre lo contrario. Los perfiles de temperatura potencial equivalente no muestran ningún evento con un gradiente negativo de θ_e importante.

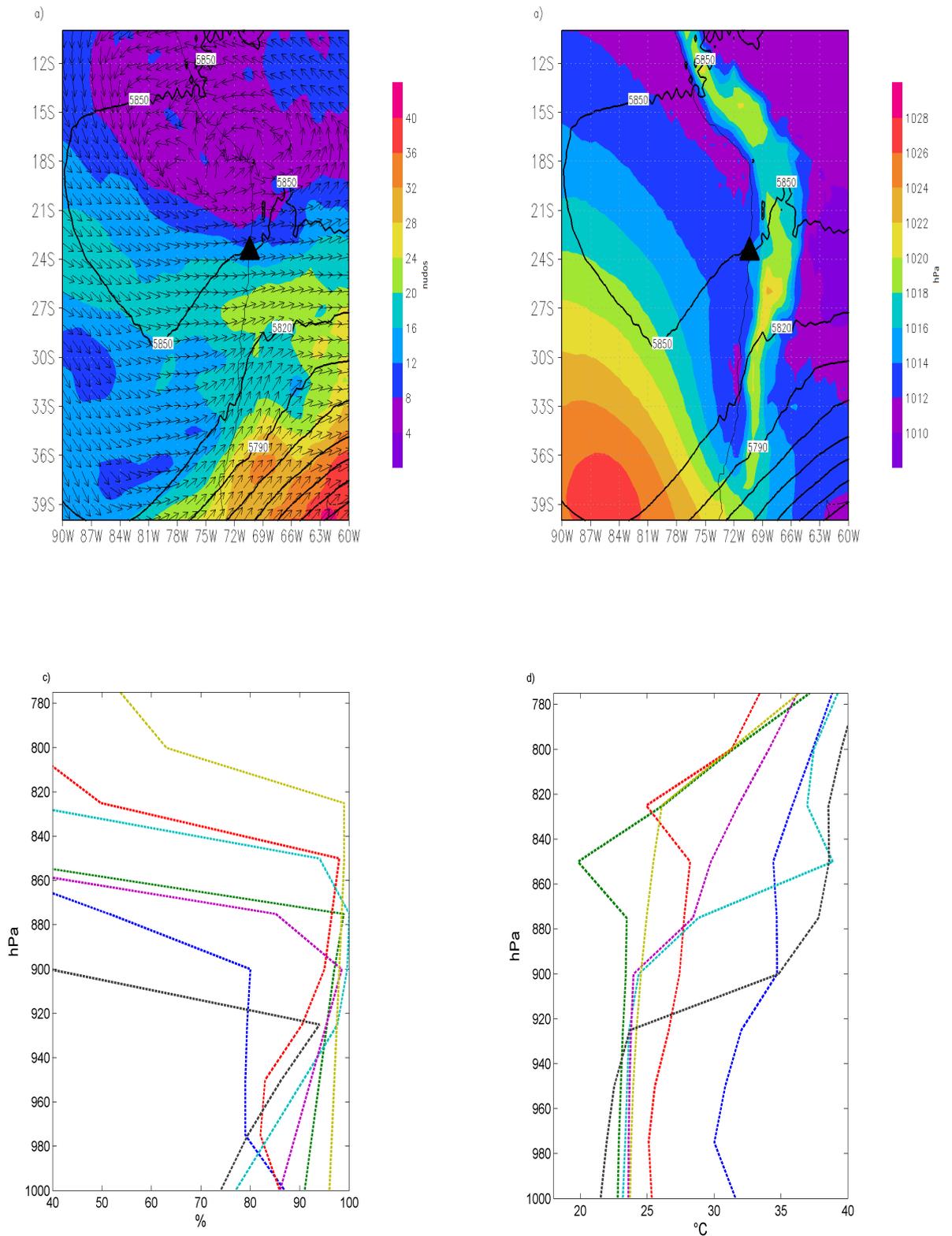


Figura 3.27: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 1, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

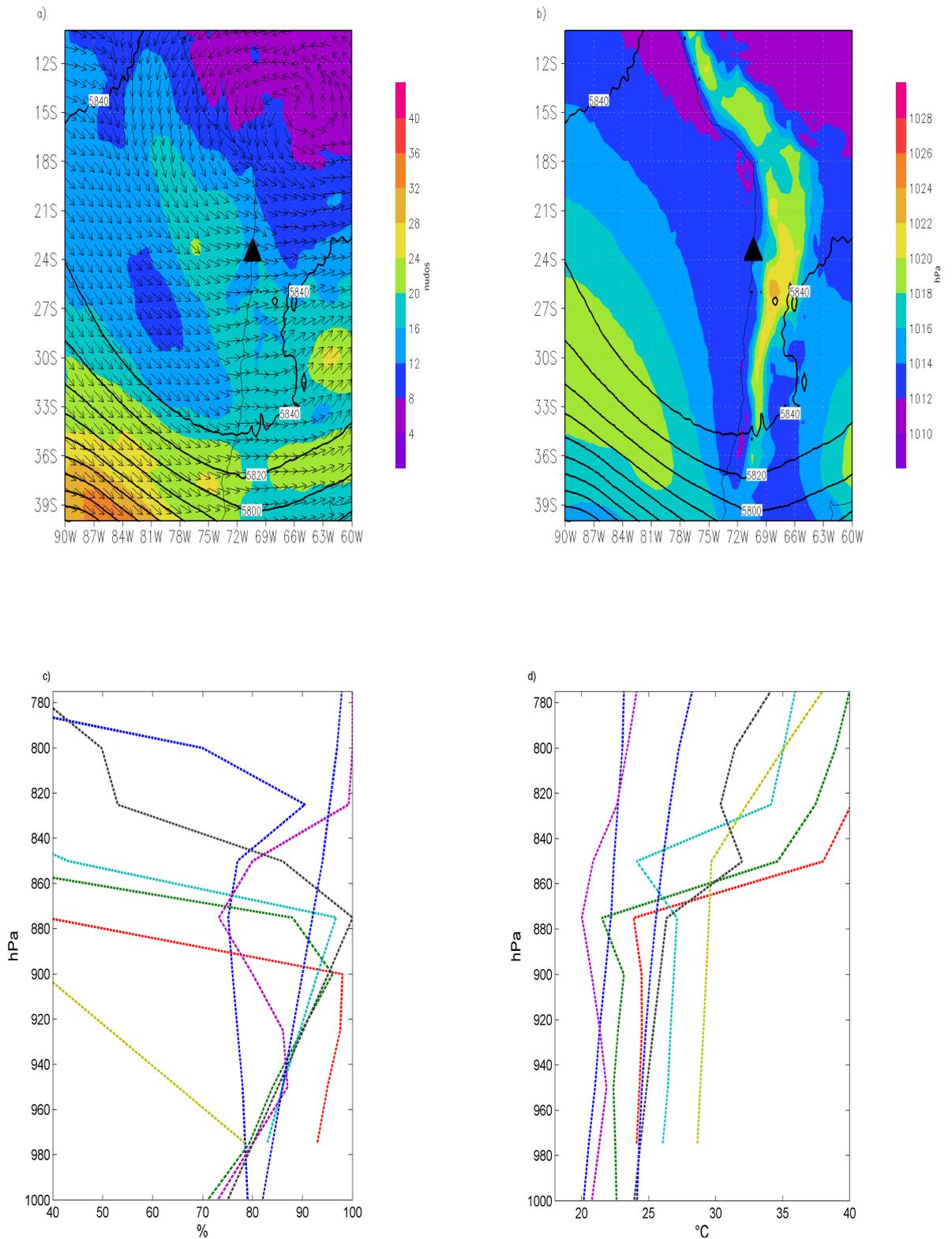


Figura 3.28: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 2, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

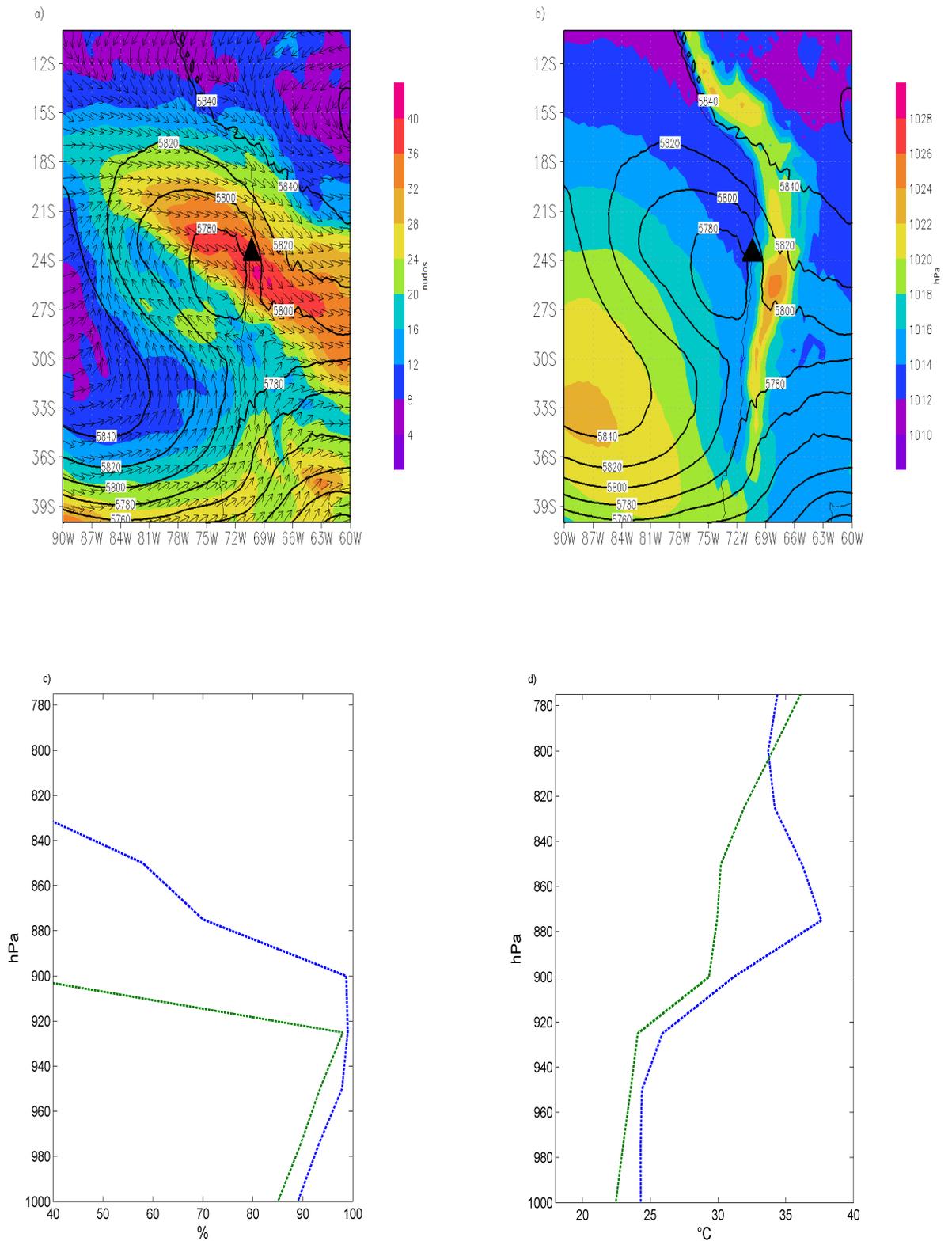


Figura 3.29: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 3, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

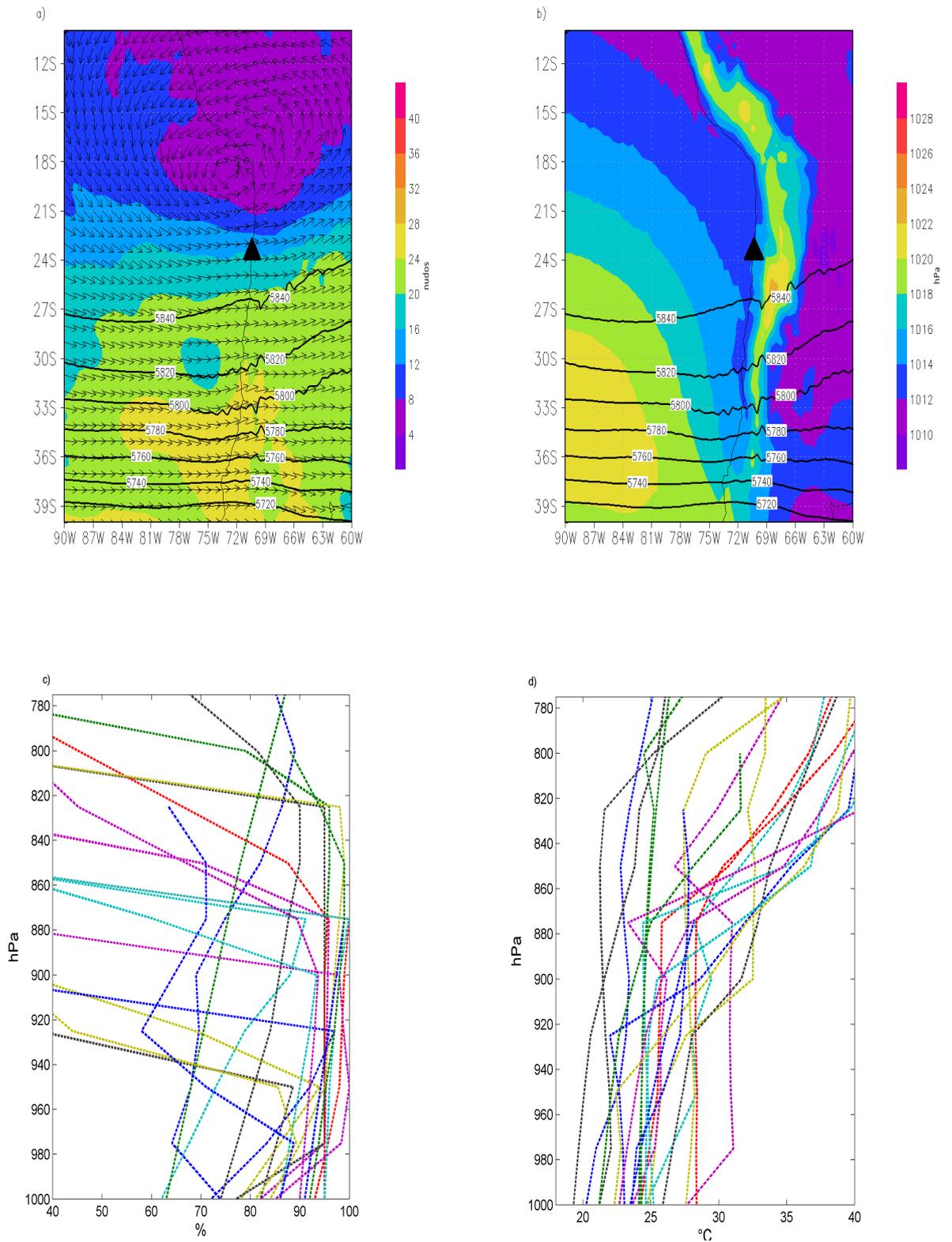


Figura 3.30: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 4, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

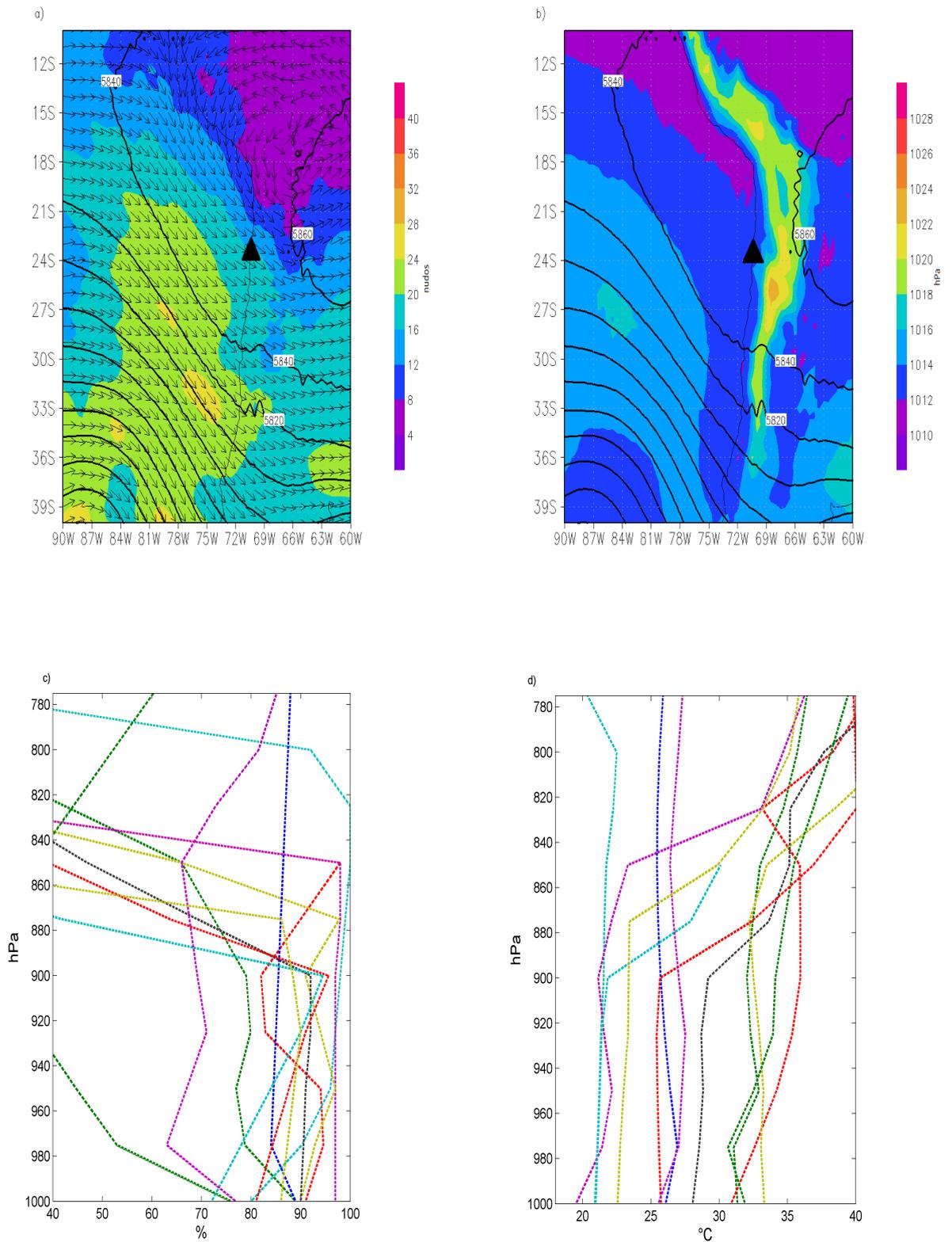


Figura 3.31: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 5, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

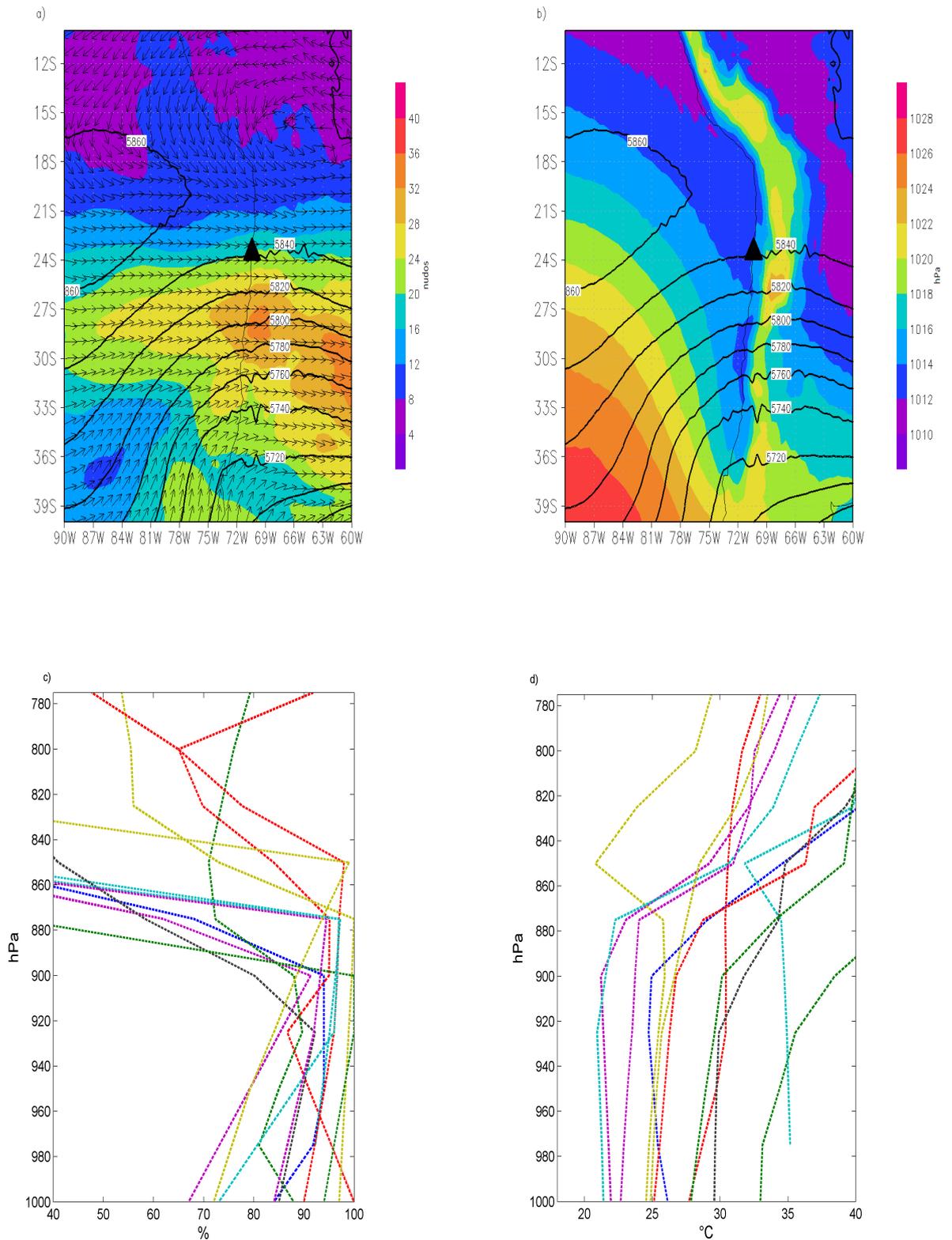


Figura 3.32: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 6, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

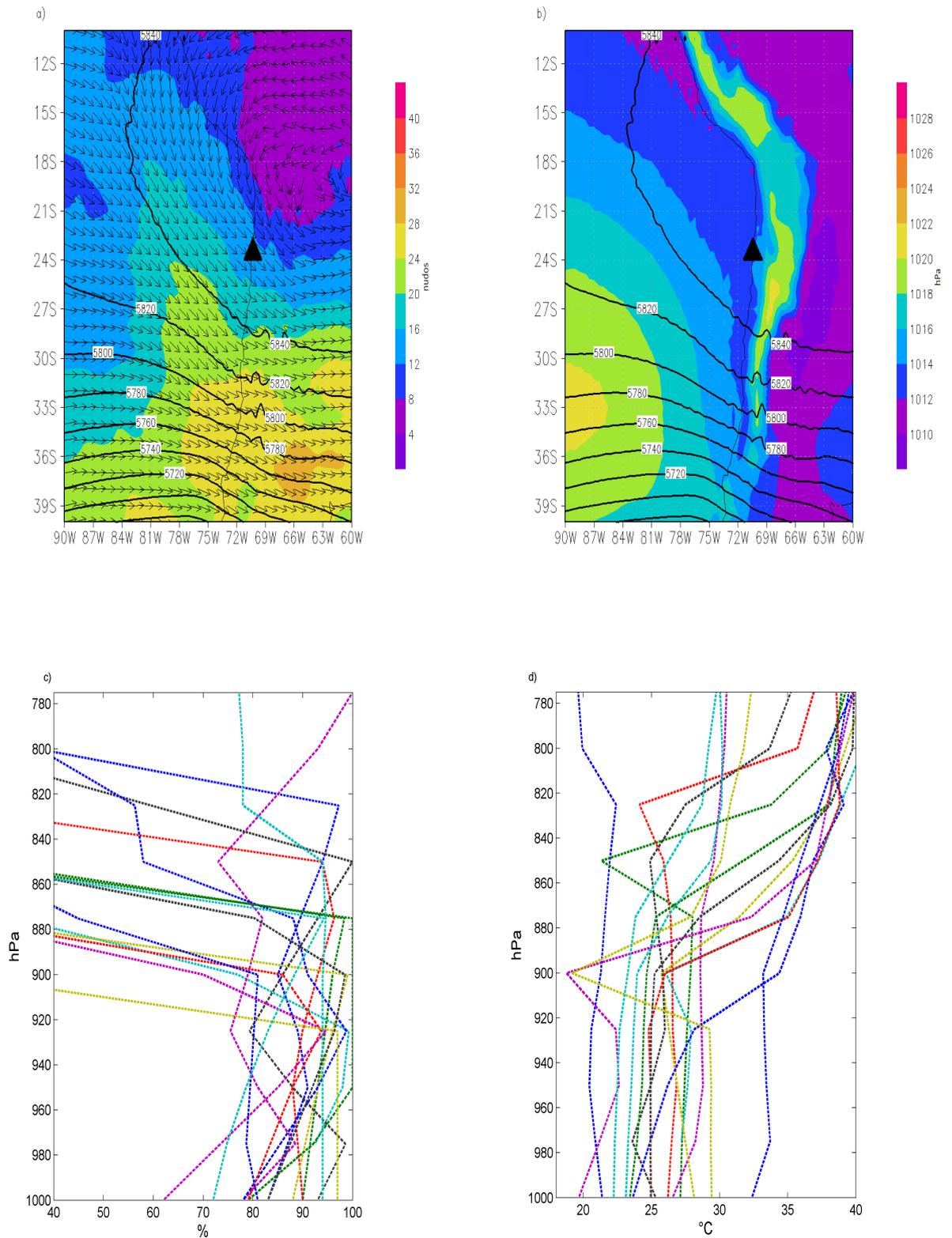


Figura 3.33: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 7, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

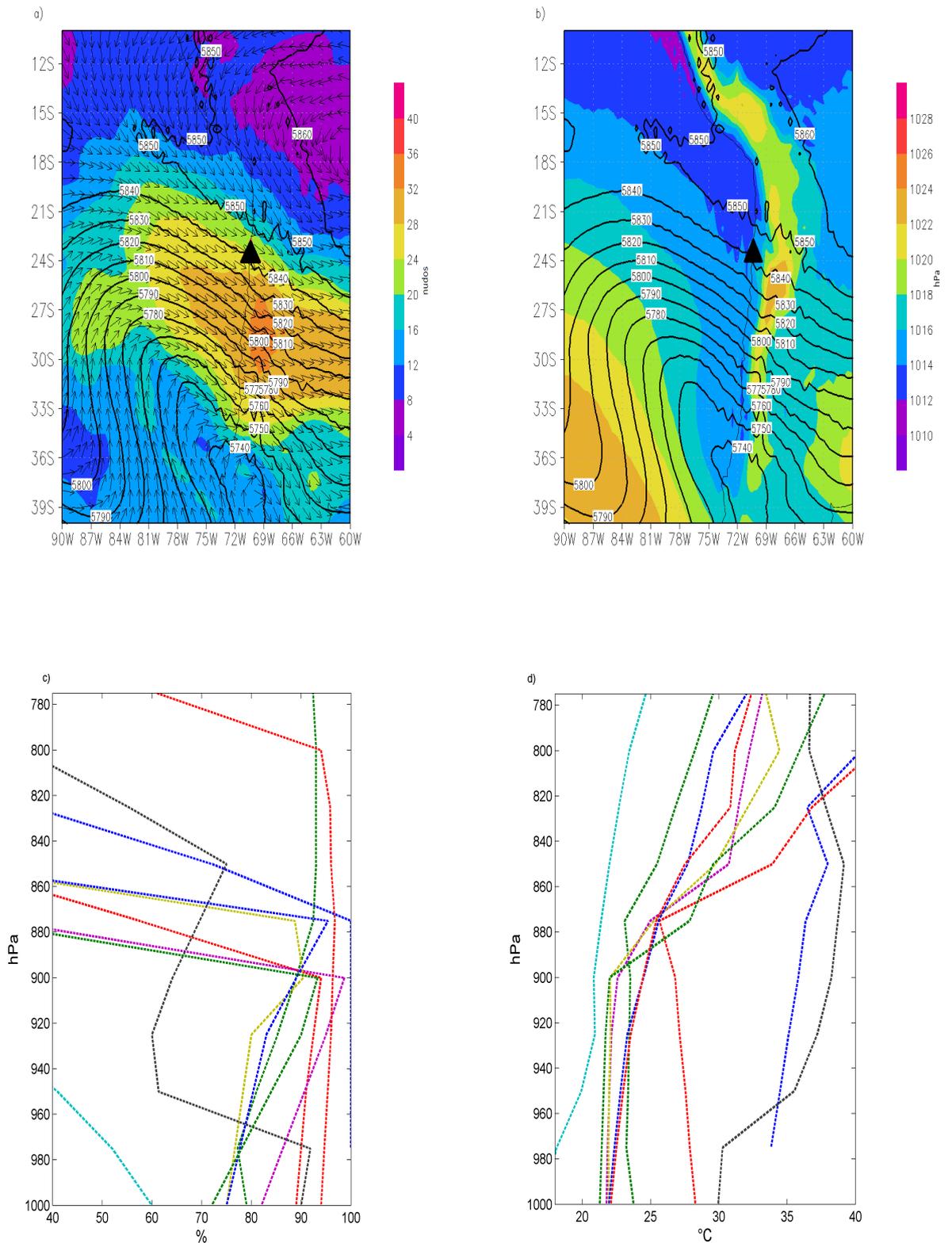


Figura 3.34: *Compuestos correspondientes a los eventos del cluster 8, conformados por: (a) magnitud media en nudos (sombreado) y dirección (vectores) del viento en 300 hPa y altura geopotencial media en metros (contornos) en 500 hPa, (b) presión media a nivel del mar en hPa (sombreado) y altura geopotencial media en 500 hPa en metros (contornos), (c) humedad relativa y (d) temperatura potencial equivalente.*

Capítulo 4

Discusión y Conclusiones.

4.0.1. Análisis de la precipitación en Antofagasta.

A partir de los registros captados por la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto Cerro Moreno en Antofagasta, se establece que entre 1970 y 2014 el 70 % de los eventos no supera 1 *mm* de precipitación. Mientras que sólo 9 eventos registraron, al menos, 4 *mm* de agua caída en un día, y sólo uno de ellos superó los 10 *mm*.

El dominio de eventos de precipitación con escasos registros de agua es explicado por el ciclo diario de éstos, el cual muestra que lloviznas durante la madrugada son el tipo de precipitación que predomina en la región. Ésto también está directamente relacionado con la magnitud media de la precipitación total asociada a cada uno de los clusters obtenidos (sección 3.4.3), la cual es del orden de 1 *mm*. Además se concluye que estas lloviznas corresponden a procesos locales debido a la escasa simultaneidad obtenida con localidades vecinas a Antofagasta.

4.0.2. Eventos El Niño y Eventos de precipitación en la costa de la región de Antofagasta.

Al observar los datos que representan la cantidad y magnitud de los eventos de precipitación en Antofagasta, y que ocurrieron bajo un evento El Niño (ENSO), no es posible concluir que existe una relación entre ellos. Los eventos 86-87, 91-92 y 94-95 (figura 3.4) son los únicos que presentan una precipitación acumulada que supera la media anual en la región. Sin embargo, al observar detalladamente cada uno de estos eventos observamos que las precipitaciones registradas durante el evento 94-95 (figura 3.5e) no ocurrieron bajo la influencia de la fase cálida de la Oscilación del Sur, puesto que las anomalías muestran valores cercanos a 0, e incluso se observan valores negativos durante los últimos meses del segundo año (evento La Niña). Mientras que los ENOS 86-87 (figura 3.5c) y 91-92 (figura 3.5d) sólo presentan un par de eventos con una magnitud importante, mientras que los demás (que no son una cantidad mayor a 8) conforman un grupo cuya precipitación media no supera 1 *mm*.

4.0.3. Análisis de eventos de precipitación en el Norte Grande de Chile.

El producto de reanálisis NCEP-CFSR (sección 2.1) era la opción más viable para poder obtener información del comportamiento de distintas variables meteorológicas y termodinámicas en diferentes niveles de altura para las localidades que componen el Norte Grande de Chile, puesto que, a diferencia de Antofagasta en Arica, Iquique, Calama y Copiapó no se cuenta con observaciones por lanzamientos de radiosondas. Sin embargo, los resultados obtenidos por los estadísticos de validación aplicados a los datos muestran que el reanálisis no representa el comportamiento de la atmósfera en la capa comprendida entre los primeros metros sobre la superficie y 800 *hPa*, por lo que el uso de este producto fue descartado al tratarse de la capa donde se ubica la capa de inversión térmica y la capa límite. No obstante, este producto puede ser usado para analizar el comportamiento de capas atmosféricas que estén sobre 800 *hPa*. Al no poder contar con esta información, no es posible realizar un análisis climatológico de los eventos de precipitación en las localidades antes mencionadas, los que además sabemos que no están relacionados espacial ni temporalmente entre sí como se puede concluir los resultados del análisis de simultaneidad de eventos de precipitación en el Norte Grande (sección 3.3).

4.0.4. Condiciones asociadas a un evento de precipitación.

A partir del análisis de compuestos y de los perfiles de temperatura, se puede concluir que hay una diversidad de condiciones asociadas a la ocurrencia de eventos de precipitación. Incluso si son vaguadas que llegan a la zona norte, o si se trata de bajas segregadas, el rango de montos de precipitación fluctúa desde lloviznas hasta la tormenta del aluvión de 1991. Esto muestra lo complejo que es la generación de lluvias en la zona desértica.

El análisis de agrupamiento (sección 3.4.3) muestra que las configuraciones sinópticas asociadas a un evento de precipitación en Antofagasta se pueden resumir en tres diferentes tipos. Se podría haber esperado que un tipo de cluster se llevara todos los eventos cuyas precipitaciones sean mayores a 4 *mm*. Sin embargo esto no sucedió, confirmando la diversidad de situaciones al ocurrir precipitación en esta región.

Los clusters 1, 2, 4 y 7 muestran la región bajo la influencia de una alta en altura, condición que según los resultados es común durante los meses de invierno en el hemisferio sur. Vaguadas de distintas profundidades e inclinación de sus ejes son representadas en los clusters 5, 6 y 8. Esta configuración también es habitual encontrarla en invierno, aunque hay excepciones en eventos que ocurrieron durante meses del verano austral. Finalmente tenemos un vórtice ciclónico de núcleo frío en altura, o baja segregada, sobre Antofagasta representado en el cluster 3. En el periodo de estudio considerado, se observa que este tipo de configuración ha dejado precipitaciones en la zona sólo en años posteriores a 2005 y su comportamiento, tanto en la influencia en la atmósfera como en la cantidad de agua caída

en cada evento, fue distinto en el desarrollo de éstos.

Esta diversidad de comportamientos también está presente cuando precipita bajo condiciones anómalas de no inversión. La lluvia más frecuente no supera 1 *mm*, aunque bajo este mismo comportamiento se registró el evento más intenso registrado entre 1970 y 2014. Por lo tanto, no es una condición exclusiva.

4.0.5. Comportamiento de la capa límite.

Los eventos asociados a un mayor espesor en la capa de nubosidad son los representados en el cluster 4 y en el cluster 6. Ésto significa que, en casi un 40% del total de casos de precipitación en la costa de la región de Antofagasta entre 1970 y 2014, existe una relación entre precipitaciones débiles, principalmente lloviznas, registradas de manera frecuente durante la noche y madrugada asociadas a un engrosamiento en la capa de nubosidad que cubre el cielo de la ciudad, y por lo tanto, un aumento en el espesor de la capa límite sobre Antofagasta. El hecho de que sean lloviznas el tipo de precipitación que predomina durante la noche se explica por el enfriamiento nocturno que provoca una mayor condensación en la atmósfera, y por lo tanto, una mayor formación de gotas en la capa de estratocúmulos. Sin embargo, hay un porcentaje importante de eventos donde no ocurre este aumento en la capa límite, lo que apunta también a la diversidad de comportamientos ante la ocurrencia de precipitación. Tal vez con una mayor frecuencia de lanzamientos durante el día podría verse algo más consistente y se podría llevar un análisis más exhaustivo del comportamiento de la nubosidad. Esto podría decir que los procesos son rápidos o de corta duración.

Anexo I: Tiempo Presente Sinóptico

Clave	Tiempo Presente
00 - 49	Sin precipitaciones en la estación en el momento de la observación.
00 - 19	Sin precipitación, niebla, niebla helada (excepto para 11 y 12), tempestad en polvo, tempestad de arena, ventisca baja o alta en la estación, en el momento de la observación o, excepto para 09 y 17, durante la hora precedente.
00	Ningún desarrollo nuboso observado u observable.
01	Nubes en general disipándose o haciéndose menos desarrolladas.
02	Estado del cielo sin cambios en su conjunto.
03	Nubes en general en formación o desarrollándose.
04	Visibilidad reducida por humo.
05	Bruma.
06	Polvo en suspensión en el aire, no levantado por el viento.
07	Polvo o arena levantado por el viento, pero sin torbellinos de polvo ni tempestad de polvo.
08	Torbellino(s) de polvo o arena bien desarrollado(s).
09	Tempestad de polvo o de arena.
10	Neblina.
11	Capa delgada de niebla helada en la estación (en bancos).
12	Capa delgada de niebla helada en la estación (más o menos continua).
13	Relámpagos visibles, sin oírse truenos.
14	Precipitación a la vista, que no llega al suelo.
15	Precipitación a la vista, pero distante (5 Km. de la estación).
16	Precipitación a la vista, que llega al suelo pero no en la estación.
17	Tormenta, pero sin precipitación.
18	Turbonadas.
19	Nubes en forma de embudo.

Cuadro 1: Claves 00 - 19 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).

20 - 29	Precipitación, niebla niebla helada o tormenta en la estación en el curso de la hora precedente pero no en el momento de la observación.
20	Llovizna, no en forma de chubascos.
21	Lluvia, no en forma de chubascos.
22	Nieve, no en forma de chubascos.
23	Lluvia y nieve o hielo granulado, no en forma de chubascos.
24	Llovizna o lluvia, no en forma de chubascos.
25	Chubasco(s) de lluvia.
26	Chubasco(s) de nieve o de lluvia y nieve.
27	Chubasco(s) de granizos, granizo pequeño, nieve granulada o de lluvia y granizo.
28	Niebla o niebla helada.
29	Tormenta (con precipitación o sin ella).
30 - 39	Tempestad de polvo, tempestad de arena, ventisca baja o alta.
30	Ha disminuido, tempestad de polvo o arena débil o moderada.
31	Sin cambio apreciable, tempestad de polvo o arena débil o moderada.
32	Ha comenzado o ha aumentado, tempestad de polvo o arena débil o moderada.
33	Ha disminuido, tempestad de polvo o arena fuerte.
34	Sin cambio apreciable, tempestad de polvo o arena fuerte.
35	Ha comenzado o ha aumentado, tempestad de polvo o arena fuerte.
36	Ventisca débil o moderada , generalmente baja.
37	Ventisca fuerte, generalmente baja.
38	Ventisca débil o moderada, generalmente alta.
39	Ventisca fuerte, generalmente alta.

Cuadro 2: Claves 20 - 39 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).

40 - 49	Niebla o niebla helada en el momento de la observación.
40	Niebla o niebla helada a la distancia, en el momento de la observación.
41	Niebla o niebla helada en bancos.
42	Cielo visible, niebla o niebla helada ha disminuido.
43	Cielo invisible, niebla o niebla helada ha disminuido.
44	Cielo visible, niebla o niebla helada sin cambios.
45	Cielo invisible, niebla o niebla helada sin cambios.
46	Cielo visible, niebla o niebla ha comenzado o espesado.
47	Cielo invisible, niebla o niebla ha comenzado o espesado.
48	Cielo visible, niebla queda deposita cencellada blanca.
49	Cielo invisible, niebla queda deposita cencellada blanca.
50 - 99	Precipitación en la estación en el momento de la observación.
50 - 59	Llovizna.
50	intermitente, llovizna débil en el momento de la observación.
51	continua, llovizna débil en el momento de la observación.
52	intermitente, llovizna moderada en el momento de la observación.
53	continua, llovizna moderada en el momento de la observación.
54	intermitente, llovizna fuerte en el momento de la observación.
55	continua, llovizna fuerte en el momento de la observación.
56	llovizna débil, engelante.
57	Llovizna moderada o fuerte engelante.
58	Llovizna y lluvia débil.
59	Llovizna y lluvia, moderada o fuerte.

Cuadro 3: Claves 40 - 59 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).

60 - 69	Lluvia.
60	intermitente, lluvia débil en el momento de la observación.
61	continua, lluvia débil en el momento de la observación.
62	intermitente, lluvia moderada en el momento de la observación.
63	continua, lluvia moderada en el momento de la observación.
64	intermitente, lluvia fuerte en el momento de la observación.
65	continua, lluvia fuerte en el momento de la observación.
66	Lluvia débil, engelante.
67	Lluvia moderada o fuerte, engelante.
68	Lluvia y nieve o llovizna y nieve débil.
69	Lluvia y nieve o llovizna y nieve, moderada o fuerte.
70 - 79	Precipitación sólida, pero no en forma de chubascos.
70	intermitente, caída de copos de nieve débil en el momento de la observación.
71	continua, caída de copos de nieve débil en el momento de la observación.
72	intermitente, caída de copos de nieve moderado en el momento de la observación.
73	continua, caída de copos de nieve moderado en el momento de la observación.
74	intermitente, caída de copos de nieve fuerte en el momento de la observación.
75	continua, caída de copos de nieve fuerte en el momento de la observación.
76	Prismas de nieve (con niebla o sin ella).
77	Granos de nieve (con niebla o sin ella).
78	Cristales de nieve aislados en forma de estrella (con niebla o sin ella).
79	Hielo granulado.

Cuadro 4: Claves 60 - 79 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).

80 - 89	Precipitación en forma de chubascos o precipitación con tormenta o después de una tormenta.
80	débil(es), chubasco(s) de lluvia.
81	moderado(s) o fuerte(s), chubasco(s) de lluvia.
82	violento(s), chubasco(s) de lluvia.
83	débil(es), chubasco(s) de lluvia y nieve.
84	moderado(s) o fuerte(s), chubasco(s) de lluvia y nieve.
85	débil(es), chubasco(s) de nieve.
86	moderado(s) o fuerte(s), chubasco(s) de nieve .
87	débil(es), chubasco(s) de nieve granulada o granizo pequeño.
88	moderado(s) o fuerte(s), chubasco(s) de nieve granulada o granizo pequeño.
89	débil(es), chubasco(s) de granizo.
90	moderado(s) o fuerte(s), chubasco(s) de granizo.
91	Lluvia débil en el momento de la observación, tormenta durante la hora precedente.
92	Lluvia moderada o fuerte en el momento de la observación, tormenta durante la hora precedente.
93	Nieve o lluvia y nieve o granizos débiles, tormenta durante la hora precedente.
94	Nieve o lluvia y nieve o granizo moderado o fuertes, tormenta durante la hora precedente.
95	Tormenta débil o moderada sin granizo, pero con lluvia y/o nieve, tormenta en el momento de la obs.
96	Tormenta débil o moderada con granizo, tormenta en el momento de la obs.
97	Tormenta fuerte sin granizo, pero con lluvia y/o nieve, tormenta en el momento de la obs.
98	Tormenta con tempestad de polvo o de arena, tormenta en el momento de la obs.
99	Tormenta fuerte con granizo, tormenta en el momento de la obs..

Cuadro 5: Claves 80 - 99 disponibles en el “informe de observación de superficie proveniente de una estación terrestre fija” (CLAVE FM 12-XII Ext. SYNOP, DMC).

Anexo II: Claves Diarias

1200	1500	1800	2100	0000	0300	0600	0900	1200	Año	Mes	Día	mm
2	5	5	5	50	2	2	2	1	1970	7	6	0,8
1	5	5	5	5	5	5	5	5	1970	11	6	0,1
1	2	2	3	2	50	5	5	2	1970	11	12	0,5
50	5	2	50	50	50	50	2	1	1971	8	20	1,1
3	1	1	5	3	2	2	2	5	1971	9	25	0,1
5	2	2	3	50	50	50	2	2	1972	8	3	0,3
2	50	51	50	2	5	2	2	2	1972	9	7	0,4
50	2	2	2	2	2	60	2	2	1972	9	16	0,1
5	5	5	5	2	2	2	2	50	1972	10	31	0,2
5	5	5	5	5	2	3	5	5	1973	6	6	0,8
5	50	50	50	55	5	5	5	5	1974	8	28	0,1
5	5	5	5	5	5	5	5	5	1974	9	10	0,7
5	5	5	5	5	2	2	50	5	1974	9	24	1,6
5	5	50	55	50	2	2	5	5	1975	3	18	1,0
5	5	2	50	1	2	2	2	2	1975	6	5	0,7
5	5	5	55	55	5	5	5	1	1975	6	20	9,5
2	5	2	2	2	2	2	2	1	1975	10	17	1,0
2	1	2	3	1	2	2	2	5	1976	1	6	0,1
3	2	2	2	3	55	1	3	2	1976	2	1	2,2
2	63	1	1	1	2	2	2	2	1976	8	18	9,1
2	2	2	2	1	2	2	50	50	1976	9	3	1,0
1	3	1	3	50	95	3	2	2	1976	9	11	4,0

Cuadro 6: Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 1970 - 1976.

1200	1500	1800	2100	0000	0300	0600	0900	1200	Año	Mes	Día	mm
3	2	3	21	1	1	1	2	2	1977	8	23	1,0
3	1	2	2	2	61	50	2	1	1977	11	21	1,0
2	1	2	2	2	2	50	2	2	1977	12	28	0,5
1	1	2	3	3	2	2	2	1	1978	9	16	0,4
3	2	1	1	3	3	21	2	1	1979	1	8	4,0
2	2	7	2	2	2	50	50	20	1979	9	28	1,0
3	3	50	1	1	3	1	2	2	1981	8	7	0,2
2	1	3	3	3	1	50	2	50	1981	9	29	0,9
1	1	1	2	3	2	2	2	1	1982	5	22	0,4
3	21	3	2	1	3	2	2	2	1982	8	28	0,4
2	1	3	3	2	2	60	2	1	1982	9	15	0,4
2	3	3	3	2	3	2	60	3	1982	9	26	0,4
3	1	3	3	1	2	3	2	50	1983	7	1	0,6
2	3	3	3	3	2	51	1	2	1983	9	12	0,1
1	1	3	3	53	1	2	2	1	1983	10	26	0,1
1	2	1	3	3	1	3	3	1	1984	3	11	0,4
3	2	3	3	2	2	50	50	1	1984	6	8	3,5
1	3	3	3	1	2	2	50	3	1984	11	21	0,2
3	1	3	3	2	1	25	1	2	1985	8	1	0,1
1	1	3	3	1	3	2	20	50	1985	8	7	0,1
2	1	1	3	1	2	2	2	1	1985	8	25	0,1
1	2	1	2	3	2	1	2	54	1985	8	26	0,9
2	1	2	3	3	2	2	50	20	1985	11	11	0,1
1	2	3	3	1	50	50	50	46	1986	5	19	0,5
3	2	1	2	3	1	50	2	2	1986	9	12	0,5
2	1	3	2	3	1	3	50	50	1986	9	13	0,1
3	50	1	3	50	2	2	1	1	1986	10	18	0,3
1	2	1	3	50	2	2	1	1	1987	1	30	0,7
1	1	1	3	3	3	2	2	2	1987	7	21	0,2
2	2	2	3	2	1	2	2	3	1987	7	27	1,7
80	3	63	2	3	1	2	2	2	1987	7	29	4,3

Cuadro 7: Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 1977 - 1987.

1200	1500	1800	2100	0000	0300	0600	0900	1200	Año	Mes	Día	mm
1	1	3	2	5	3	1	1	1	1987	9	13	0,7
1	1	1	2	3	2	50	2	51	1987	9	14	1,2
2	1	1	3	2	2	2	2	2	1988	7	2	0,2
2	3	1	2	10	51	10	2	5	1989	8	21	0,1
1	2	3	2	1	3	3	1	1	1989	9	22	0,4
1	1	3	3	3	2	2	2	54	1989	9	23	0,1
2	1	7	2	7	7	65	3	1	1991	6	18	14,1
1	1	3	3	1	2	2	2	50	1991	9	19	0,4
3	1	3	2	1	3	3	2	60	1992	4	1	0,7
60	61	21	1	1	2	2	2	1	1992	4	2	0,9
60	50	50	50	21	1	1	1	1	1992	5	29	4,6
2	2	3	2	3	2	2	2	3	1992	6	4	0,2
3	1	3	1	50	50	5	20	1	1992	6	30	2,1
2	2	2	52	50	20	1	3	1	1992	11	14	1,2
2	3	3	2	3	2	2	2	5	1995	5	20	1,3
5	1	3	50	50	50	50	50	50	1995	5	21	1,0
1	3	2	3	3	50	50	50	1	1995	7	25	1,5
1	2	1	3	2	2	2	3	1	1995	7	26	0,1
10	5	5	5	5	5	5	50	5	1995	9	6	1,1
1	3	1	3	3	2	51	50	50	1995	9	12	2
2	2	1	2	3	3	2	2	1	1996	8	29	0,1
50	1	2	1	3	2	3	1	1	1997	9	10	0,2
1	3	3	3	3	50	3	50	50	1998	1	1	2,8
2	1	1	3	17	25	2	2	2	1998	6	26	1,4
1	1	2	2	2	2	2	2	1	1999	8	22	0,2
1	3	2	3	80	51	1	2	1	2000	6	2	3,8
1	2	1	2	3	2	2	51	1	2000	10	4	0,4
3	5	50	52	20	50	2	50	1	2002	7	4	1,7
1	3	1	2	50	50	1	3	3	2002	8	28	1,0
2	2	1	2	2	60	2	21	2	2004	7	27	0,6
43	10	5	10	50	45	50	45	10	2005	4	27	0,2
2	1	2	3	3	1	3	2	1	2005	9	13	0,2

Cuadro 8: Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 1987 - 2005.

1200	1500	1800	2100	0000	0300	0600	0900	1200	Año	Mes	Día	mm
5	5	3	3	3	51	50	61	2	2006	8	30	7,7
2	1	1	2	1	2	2	1	5	2007	7	8	0,2
2	1	3	5	51	10	10	1	50	2009	4	25	1,5
3	1	3	3	3	51	1	2	1	2009	7	21	0,6
5	2	2	3	2	2	2	2	53	2010	8	11	1,4
5	5	2	3	1	3	3	2	80	2011	7	7	1,2
51	80	20	51	2	51	2	3	1	2011	7	9	5,4
2	1	1	1	3	3	1	51	2	2012	9	7	0,2
5	5	5	2	3	2	2	2	2	2012	9	17	0,4

Cuadro 9: Distribución de las claves que representan tiempo presente sinóptico entre las 1200 y 1200 UTC de un evento de precipitación para el periodo 2006 - 2012.

Bibliografía

- [1] Bohren, C.F., B.A. Albrecht, 1998: Atmospheric Thermodynamics. Oxford Univ. Press, New York.
- [2] Dirección Meteorológica de Chile, 2001. Climatología de Chile.
- [3] Fuenzalida, H., 1980: Acerca de las fluctuaciones diarias de la capa límite en el litoral del norte de Chile. Congreso Internacional de Estudios de Zonas Áridas Y Semiáridas, La Serena, Enero de 1980.
- [4] García, 1982: Chile, esencia y evolución. Instituto de Estudios Regionales, Universidad de Chile, p, 27-35.
- [5] Garreaud, R. and Rutllant, J., 1996: Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993. *Atmósfera*, No. 9, p, 251-271.
- [6] Garreaud R., Rutllant J., 2006: Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del anticiclón del Pacífico sureste. *Revista Chilena de Ciencia y Tecnología del Mar*, 29(1), 5-13.
- [7] Lee, T., McPhaden, M., 2010: Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific.
- [8] Miller, 1976: The Climate of Chile. The In World survey of climatology. *Climates of Central and South America*. (W. Schwerdtfeger, Ed.), pp. 113-145.
- [9] Muñoz, R., Zamora, R., Rutllant, J., 2010: The Coastal Boundary Layer at the Eastern Margin of the Southeast Pacific (23.4°S,70.4°W): Cloudiness-Conditioned Climatology. American Meteorological Society 2011.
- [10] Murphy, A., 1988: Skill Scores Based on the Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient. *Monthly Weather Review*, vol. 116, 2419.
- [11] Ogaz, P., and H. Fuenzalida, 1981: Acerca de un paso frontal y sus manifestaciones en el litoral árido del norte de Chile. *Tralka* (1981), vol. 2, n°1, 19-38.
- [12] Parker, D.E, Jones, P.D., Bevan, A., Folland. C.K., 1994: Interdecadal changes of surface temperature since the late 19th century. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, p, 14373 - 14399.

- [13] Rutllant, J, Aceituno, P., Montecinos, A., 1992: Análisis comparativo de aspectos atmosféricos para los eventos El Niño/Oscilación del Sur de 1982-83, 1986-87 y 1991-92. Investigaciones Pesqueras, Vol. 37,p, 45-54, Chile.
- [14] Rutllant, J. and Fuenzalida, H., 1991: Synoptic aspects of the Central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation, International Journal of Climatology, Vol 11,p, 63-76.
- [15] Rutllant, J., Fuenzalida, H., Torres, R., Figueroa D., 1998: Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile,23°S): Experimento DICLIMA.
- [16] Rutllant J., R. Garreaud, 2005: Capa límite marina en el Pacífico suroriental subtropical durante el Crucero CIMAR-5. Revista Chilena de Ciencia y Tecnología del Mar, 28(1), 25-33.
- [17] Vargas, G., Ortlieb, L. and Rutllant, J., 2000: Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur.
- [18] Wilks, D.S., 2006: Statistical Methods In The Atmospheric Sciences. Second Edition, 280-282.
- [19] Zhang, Y., Wallace, J., Battisti, D.S., 1997: ENOS-like Interdecadal Variability: 1900-1993. Journal of Climate, Vol.10, p, 1004-1020.