

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“PATRONES SINÓPTICOS DE UNA DANA ASOCIADOS A LA
OCURRENCIA DE NEVADAS EN LA SIERRA CENTRAL Y SUR
DEL PERÚ”**

Presentada por:

Kelita del Rocio Quispe Vega

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima - Perú

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“PATRONES SINÓPTICOS DE UNA DANA ASOCIADOS A LA
OCURRENCIA DE NEVADAS EN LA SIERRA CENTRAL Y SUR
DEL PERÚ”**

Presentada por:

Kelita del Rocio Quispe Vega

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
PRESIDENTE

Mg.Sc. Ever Menacho Casimiro
MIEMBRO

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Mg.Sc. Victoria Calle Montes
ASESORA

Mg.Sc. Nelson Quispe Gutierrez
CO-ASESOR

DEDICATORIA

*A Dios, por permitir seguir adelante con este trabajo, hasta el final.
A mis padres, quienes siempre me apoyaron incondicionalmente a lo largo de mi
carrera universitaria y profesional. Gracias por su paciencia.
Al pequeño niño que llegó a mi vida a traer alegría, mi sobrino Jeremy.*

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, por permitirme el uso de la información meteorológica.

A mi maestro y jefe Nelson Quispe, por sus enseñanzas continuas, apoyo y formación en mi vida profesional, así como en la finalización de este trabajo.

A mi gran colega Martí Bonshoms, por el continuo asesoramiento y apoyo.

A mi asesora Victoria Calle, por sus continuos consejos y sugerencias.

Al jurado calificador de la tesis, el profesor Franklin Unsihuay, Ever Menacho y Eusebio Cisneros, por sus sugerencias y apoyo.

A mis compañeros de trabajo y grandes amigos, gracias por el apoyo y amistad brindada durante todo este tiempo. Por tomarse el tiempo para leer y ayudarme a mejorar este trabajo. Gracias totales...

Tesis realizada en el marco del proyecto
CRYOPERU CIENCIA ACTIVA 144-2015.



INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	Precipitación	3
2.1.1	Nieve.....	3
2.2.	Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA).....	4
2.1.2	DANA en el Pacífico Suroriental	5
2.3.	Cordillera Andina	6
2.1.3	Andes de Sudamérica	6
2.1.4	Clima en los Andes de Sudamérica	9
2.1.5	Andes de Perú.....	13
2.4	Tendencia cuasigeostrófica.....	14
2.4.1	Ecuaciones Fundamentales.....	14
a.	Ecuación de movimiento	14
b.	Ecuación hidrostática	14
c.	Ecuación de la continuidad	15
d.	Ecuación de la energía termodinámica	16
2.4.2	Ecuación de la vorticidad	16
2.4.3	Vorticidad potencial	17
2.4.4	Ecuación de la tendencia geopotencial.....	17
2.5	Patrones Sinópticos del clima en Sudamérica	18
2.6	Agua en la atmósfera	20
2.6.1	Humedad relativa (HR)	20
2.6.2	Humedad específica (q).....	20
2.6.3	Relación mezcla (w)	20
2.6.4	Agua precipitable.....	21
2.7	Estadística	21
2.7.1	Frecuencia absoluta	21
2.7.2	Frecuencia relativa (ni)	22
2.7.3	Media móvil centrada	22

III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1	Materiales.....	23
3.1.1	Zona de estudio.....	23
3.1.2	Información de estaciones meteorológicas.....	24
3.1.3	Datos de análisis y reanálisis.....	27
3.2	Métodos.....	28
3.2.1	Identificación de eventos de nevadas y DANA en los Andes del Perú en un periodo de 10 años (julio 2004 – agosto 2013).....	29
a.	Identificación de DANAS.....	29
i.	Selección de cuadrantes de estudio.....	29
ii.	Cuantificación de DANA.....	30
iii.	Análisis espacial y temporal de las DANAS.....	30
b.	Identificación de nevadas.....	30
i.	Recopilación de información y cuantificación de eventos.....	30
ii.	Frecuencia temporal de nevadas.....	31
iii.	Zonificación de áreas de nevadas.....	32
iv.	Comportamiento “climatológico” anual y mensual.....	34
c.	Identificación de nevadas favorecidas por DANAS.....	34
3.2.2	Identificación de patrones de una DANA que apoye la generación de nevadas	34
3.2.3	Identificación de circulaciones que favorecen la generación de nevadas	35
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1	Identificación de eventos de nevadas y DANA en los Andes peruanos en un periodo de 10 años (2004 – 2013).....	36
4.1.1	Identificación de DANAS.....	36
4.1.2	Identificación de nevadas.....	40
a.	Recopilación de información y cuantificación de eventos.....	40
b.	Frecuencia temporal de nevadas.....	40
c.	Zonificación de áreas de nevadas.....	41
d.	Comportamiento “climatológico” anual y mensual.....	47
4.1.3	Identificación de nevadas favorecidas por DANAS.....	50
4.2	Identificación de patrones de una DANA que apoye la generación de nevadas	52

4.3	Identificación de circulaciones que favorecen la generación de nevadas.....	57
4.3.1	Circulación promedio para la generación de nevadas por zonas en los Andes peruanos	57
4.3.2	Anomalías de temperatura y humedad	62
4.3.3	Circulaciones favorables para las nevadas en los Andes.....	63
4.3.4	Modelo conceptual para la generación de nevadas en los Andes.....	70
a.	Andes Centrales	70
b.	Andes Sudoccidentales	71
V.	CONCLUSIONES	74
VI.	RECOMENDACIONES	76
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
VIII.	ANEXOS	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 01: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de SENAMHI.....	26
Tabla 02: Criterio de selección de estaciones meteorológicas por zonas de nevadas	33
Tabla 03: Número de eventos por patrones de DANA identificados que favorecen los eventos de nevadas (superior) y porcentajes (inferior).....	.53
Tabla 04: Número de eventos por patrones identificados que favorecen los eventos de nevadas (superior) y porcentajes (inferior).....	.64

INDICE DE FIGURAS

Figura 01: Etapas de la DANA. (Nieto et al., 2005)	5
Figura 02: Altura de los principales nevados y volcanes de la cordillera de los Andes. (Adaptado de Salaverry, 2006).....	8
Figura 03: Regiones ecológicas latitudinales y altitudinales de la cordillera de los Andes (Adaptado de Salaverry, 2006).....	9
Figura 04: Zonas ecológicas de América del Sur (FAO, 2000)	11
Figura 05: Corte latitudinal de viento zonal promedio de 80°-60°W para el verano (DEF, izquierda) e invierno (JJA, derecha). Intervalos positivos de 10 m/s (líneas verdes) Intervalos negativos de 5m/s (líneas rojas) Viento del este en shaded. Topografía de los Andes en marrón. (Garreaud, 2009).....	12
Figura 06: Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles altos (Adaptado de Satyamurty et al. 1998).....	18
Figura 07: Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles bajos (Adaptado de Satyamurty et al. 1998).....	19
Figura 08: Zonas de estudio. R1: Área de DANA. R2: Área de nevadas. R3: Área de circulaciones sinópticas.	23
Figura 09: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas convencionales de SENAMHI (Ver Cuadro 01).....	25
Figura 10: Diagrama de flujo de la metodología.....	28
Figura 11: Cuadrantes de estudio de la DANA.	29
Figura 13: Porcentaje de DANA por cuadrante de estudio. Ver figura 11.....	37
Figura 14: Mapa de ubicación del núcleo de las DANA en el periodo de estudio. Posición marcada en base al mínimo de VP (<-1.6 UVP)	37
Figura 15: Ubicación de las DANA en la estación de verano (DEF).....	38
Figura 16: Ubicación de las DANA en las estaciones de otoño (MAM)	38
Figura 17: Ubicación de las DANA en las estaciones de invierno (JJA).....	39
Figura 18: Ubicación de las DANA en las estaciones de primavera (SON).....	39
Figura 19: Anomalía de presión en los meses de invierno (julio – agosto) del 2004. FUENTE: NCEP/NCAR	40
Figura 20: Mapa de frecuencia del número de eventos de nevadas totales en base a la información de 10 años. El tamaño indica la densidad de eventos.	42
Figura 21: Mapa de frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de verano.....	43
Figura 22: Mapa frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de otoño.	44

Figura 23: Mapa frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de invierno.....	45
Figura 24: Mapa de frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de primavera	46
Figura 25: Número total de nevadas anuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR)47	
Figura 26: Número total de nevadas anuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR) y cobertura. Ordinarias (izquierda) y generalizadas (derecha).....	47
Figura 27: Comparación entre la media móvil de los eventos de nevadas totales mensuales (barras azules) e índice ONI (línea roja).....	48
Figura 28: Número total de nevadas mensuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR)	49
Figura 298: Número total de nevadas mensuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR) y cobertura. Ordinarias (izquierda) y generalizadas (derecha).....	50
Figura 30: Eventos de nevadas favorecidos por DANA (mensuales) por zonas de estudio CEN (superior izquierda), SOC (superior derecha) y SOR (inferior)	52
Figura 31: Patrón atmosférico (1: superior, 2: inferior) que favorece las nevadas en los Andes en base a la altura geopotencial promedio de los eventos.	55
Figura 32: Patrón atmosférico (3: superior, 4: inferior) que favorece las nevadas en los Andes en base a la altura geopotencial promedio de los eventos.	56
Figura 33: Promedio de viento y relación de mezcla de los eventos de nevadas en el centro (CEN).....	59
Figura 34: Promedio de viento y relación de mezcla de los eventos de nevadas en el sur occidental (SOC)	60
Figura 35: Promedio de viento y relación de mezcla de los eventos de nevadas en el sur oriental (SOR)	61
Figura 36: Gráfico temporal del porcentaje de humedad promedio desde los 70°W a 80°W.....	62
Figura 37: Patrón 1. Viento en 500 hPa (superior). Anomalías de agua precipitable (medio) Anomalía de humedad específica en 500 hPa (abajo)	67
Figura 38: Patrón 2. Viento en 500 hPa (superior). Anomalías de agua precipitable (medio) Anomalía de humedad específica en 500 hPa (abajo)	68
Figura 39: Patrón 3. Viento en 850 hPa.....	69
Figura 40: Modelo conceptual para nevadas en la sierra central. Niveles altos en color azul, niveles bajos en color verde.	70
Figura 41: Perfil vertical favorable para nevadas en la sierra central. Alto contenido de relación de mezcla (verde) presencia de flujos del norte (Puntos rojos y flecha verde) 71	
Figura 42: Modelo conceptual para nevadas en la sierra occidental sur. Niveles altos en color azul, niveles medios en color negro.	72

Figura 43: Perfil vertical favorable para nevadas en la sierra occidental sur. Alto contenido de relación de mezcla (verde) presencia de flujos del norte (Puntos rojos y flecha verde). Masa fría del Pacífico (flecha verde) Masa húmeda de la Amazonía. 73

Figura 44: Perfil vertical de la DANA. Ingreso de aire estratosférico (ozono). Jet stream asociado a la DANA (viento en shaded, color amarillo y anaranjado). Temperatura potencial (líneas) indicando el núcleo frío en niveles altos – medios. 73

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Distribución anual de las DANA en base a la vorticidad potencial (VP).....	83
Anexo 2: Promedio de eventos por área de estudio (CEN, SOC, SOR) para la determinación de patrones de DANA.....	84
Anexo 3: Perfil vertical del viento para los eventos CEN (corte en 7°S).....	85
Anexo 4: Anomalías de temperatura en niveles altos (200 hPa). Eventos SOC	87
Anexo 5: Anomalía de agua precipitable en eventos SOC.....	89
Anexo 6: Anomalía de agua precipitable en eventos SOR.....	91

RESUMEN

En el presente trabajo, se analizaron los patrones sinópticos de circulación que favorecen la generación de nevadas en los Andes peruanos, en especial, las Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANA). Este sistema, que se caracteriza por tener una estructura fría en los niveles altos y medios de la atmósfera, favorece la advección de aire frío en la Cordillera de los Andes, lo que permite la presencia de la isoterma de los 0°C en la superficie o cercano a ella favoreciendo las precipitaciones sólidas. El periodo de estudio fue de 10 años, abarcando desde el 2004 al 2013.

El registro de nevadas se obtuvo de modo empírico, basándose en la información que nos brindan los observadores meteorológicos de las estaciones convencionales de la jurisdicción del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Asimismo, en base a la metodología utilizada por Quispe (2006) y adicionando el condicional de no encontrar isohipsas cerradas en 925 hPa, se realizó la identificación de DANA en el periodo de estudio.

En cuanto a las nevadas, se encontró que suelen ser más frecuentes en los meses de verano, en especial para la zona de los Andes centrales, y en los meses de invierno, en la zona sur.

Se determinó que el 17 por ciento de las DANAS contabilizadas (50 DANAS) favorecieron la generación de nevadas. En base a esto, al realizar el análisis sinóptico, se obtuvo cuatro patrones sinópticos de DANA y tres patrones de circulaciones atmosféricas adicionales relacionados con la humedad (circulación antihoraria en niveles medios, flujos del norte en niveles bajos relacionados con el LLJ y flujo de nortes en la costa del Pacífico). Esto resolvió que, una característica importante para la generación de nevadas es la advección de humedad en niveles medios y bajos, proveniente de la cuenca Amazónica, que logra ser canalizada por los Andes.

PALABRAS CLAVES: DANA, nevadas, Andes

ABSTRACT

In this research, synoptic patterns which generate snowfall were analyzed, specially the cut off. This system, whose main characteristic is the cold core in upper levels, stimulates cold advection to the Andes, allowing the presence of temperatures close to 0°C in surface. The study period was 10 years, from 2004 to 2013.

The snowfalls were quantified by empirical method, based in the information from the meteorological observers working in the weather stations from SENAMHI. Likewise, the DANA's identification was based on Quispe (2006) method and extra conditional: closed geopotential high in 925 hPa.

About snowfalls, they occur frequently in summer, especially in central Andes, but in the South, they occur in winter.

It was determined that 17% from the DANAS (50 in all) have stimulated snowfalls. Hence, after the synoptic analysis, four Dana's patterns and three additional atmospheric circulation related to humidity were obtained. This resolved to, the main characteristic for snowfall is the humidity in médium levels, which is advected by the Amazon and is channeled by the Andes.

KEY WORDS: cut-off, snowfall, Andes

I. INTRODUCCIÓN

En Perú, en los últimos años se han registrado miles de pérdidas económicas en el sector agrícola, turismo, transporte y vivienda, así como daños en la salud debido a intensos eventos de nevadas que suelen registrarse en las regiones central y sur del país. Las nevadas en el Perú son precipitaciones sólidas que se presentan con mayor frecuencia en los Andes, en especial en las zonas ubicadas por encima de los 4000 m.s.n.m. El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) en el 2013 indicó que, en un periodo de 10 años (del 2004 al 2013) se ha registrado un total de 700 emergencias por nevadas. Se calcula que estos eventos han afectado a un total de 465 203 personas dejando un total de 9 065 personas damnificadas; siendo la población más afectada la de la región de Puno, la cual registró, en daños materiales, un total de 27 444 viviendas afectadas y 875 viviendas destruidas.

Las nevadas que han ocurrido en los Andes peruanos en los últimos años fueron generadas por la presencia de vaguadas profundas de alta atmósfera (nivel de 200 hPa~12km) las cuales se desplazaron por el Pacífico sudoriental y cruzaron el continente sudamericano al noroeste de Chile y sudoeste de Perú, estas vaguadas, en algunas ocasiones lograron formar Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANA) las cuales son circulaciones cerradas en la media y alta tropósfera formadas por la estrangulación de una vaguada profunda (Nieto, 2005), siendo similares a una burbuja de aire frío. Al encontrarse la vaguada o DANA cercana al territorio peruano, en el Pacífico sur oriental (suroeste de Perú), interactúan con las condiciones necesarias de humedad, y junto a una serie de procesos dinámicos y termodinámicos logran generar los eventos de nevadas. (Quispe, 2005)

Fuenzalida (2005), realizó una investigación sobre la climatología de las DANA en el hemisferio sur determinando tres continentes donde suelen formarse: África, Australia y Sudamérica. Así mismo, estableció que son más frecuentes en invierno con un mínimo en verano (debido al debilitamiento del jet stream en el último periodo mencionado).

Garreaud y Fuenzalida (2007), así como Everson y Gan (2008) coincidieron en que los Andes probablemente retrasan el decaimiento de las DANAS por el bloqueo del flujo cálido y húmedo de la Amazonía. Godoy (2006) afirmó que los Andes no afectan en el proceso de formación de las DANA; sin embargo, sí en su estructura y duración.

Debido a las cuantiosas pérdidas que se vienen registrando por la ocurrencia de nevadas, en el presente trabajo se realizó el estudio de los patrones sinópticos y mecanismos físicos de las DANAS ubicadas al suroeste de Perú en un periodo de 10 años desde junio del 2004 hasta agosto del 2013. Se identificó eventos de nevadas registradas en 35 estaciones meteorológicas de la red de SENAMHI, utilizando cualitativamente los apuntes de las planillas; luego, se procedió a identificar y cuantificar DANAS; una vez determinados ambos parámetros, se realizó el análisis de los patrones sinópticos y variables meteorológicas en base a la información del Análisis NCEP de resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y con una resolución temporal de 6 horas y 26 niveles de presión.

La realización de este trabajo apoyará los pronósticos de nevadas en las regiones central y sur de los Andes peruanos, permitiendo identificar con mayor precisión las fechas, extensión y regiones afectadas por las nevadas beneficiando a la población altoandina, permitiendo que las entidades correspondientes tomen las acciones necesarias y se logre mitigar las pérdidas que sufren tras un evento como este.

En el presente estudio se planteó un objetivo general y dos específicos:

Objetivo general: Identifica patrones sinópticos relacionados con las DANAS para la generación de nevadas en los Andes peruanos.

Los **objetivos específicos** fueron:

- Identificar los eventos de DANA y nevadas para el periodo de 10 años, desde julio 2004 a agosto 2013.
- Identificar las circulaciones que favorezcan los eventos de nevadas en los Andes peruanos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.Precipitación

Es toda forma de agua que tiene origen en las nubes y logra llegar hasta la superficie del suelo. Puede ser lluvia, granizada, llovizna, etc. Pueden clasificarse en convectivas, orográficas o de convección forzada, ciclónicas, frontales, etc. En la sierra del Perú, suelen predominar las precipitaciones de origen orográfico; a diferencia de la selva, donde la mayoría de los casos es de origen convectivo (producto del ascenso por diferencia de densidad del aire cálido y húmedo de la superficie). (García, 1994)

2.1.1 Nieve

Barry (1999), afirmó que «la nieve se produce cuando el nivel de congelación está tan cerca de la superficie que los conglomerados de cristales de hielo no tienen tiempo de fundirse antes de llegar al suelo»

El tipo de cristal dependerá de la humedad relativa y la temperatura del aire. Existen muchos tipos de cristales, pero los que predominan son las dendritas, similares a un helecho ramificado, esto se debe a que la diferencia de saturación de la presión de vapor entre el hielo y agua alcanza su máxima diferencia en la temperatura favorable para la formación de dendritas (-12°C a -16°C). Sin embargo, los cristales de hielo están expuestos a diferentes cambios de temperatura y humedad por lo que muchos de ellos se unen para generar copos más grandes logrando asumir patrones más complejos. El incremento de tamaño ocurrirá cuando los copos de nieve se encuentren ligeramente por encima de cero y sufran derretimiento a medida que van descendiendo generando la formación de una capa de agua alrededor, esto permitirá que se adhiera a otros copos de nieve logrando alcanzar varios centímetros de tamaño. (Donald, 2009)

2.2. Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA)

Martín (2003) presentó un trabajo sobre el origen conceptual e histórico de la DANA. Mencionó que el origen se remonta a 1886, donde es denominado como “*gota de aire frío*” (traducido) en la escuela alemana, por ello en España es conocida como “*gota fría*”, término que se fue perdiendo debido a los nuevos enfoques que se consideraron, empezando con Palmen (1949) y, Palmen y Newton (1969). Al pasar de los años, y al continuar con su estudio, la terminología anglosajona la denominó “cut-off low”, cuya traducción es depresión o baja aislada, por ello, meteorológicamente se le denominó en español como “Depresión Aislada de Niveles Altos”.

La DANA fue definida por Palmen y Newton (1969) como un sistema ciclónico cerrado en alta tropósfera por la profundización de una vaguada. El sistema ciclónico se segrega y se forma sobre el flanco ecuatorial del jet polar o subtropical.

Hoskins et. al (1985), lo definieron como un sistema generado en la alta tropósfera por procesos de fuerte ondulación y aislamiento del jet stream reflejándose luego en niveles medios o bajos.

Cleofé et. al (2000), la definió como un sistema que es formado cuando una vaguada de latitudes medias penetra en los trópicos con una inclinación meridional bien acentuada, esa inclinación hace que la parte norte, que tiene velocidades de desplazamiento menor, se atrase hasta que se desprenda completamente.

Rondanelli et. al (2002), afirmó que la DANA conduce a la caída de la tropopausa generando mezcla entre los gases estratosféricos y troposférico. Debido a esto se genera una contaminación de gases estratosféricos como el ozono.

Nieto et. all, en el 2005 realizó la división por etapas de una DANA (figura 1), manifestando que el ciclo de vida de este sistema puede ser dividido en cuatro etapas:

- 1º Etapa – vaguada en niveles altos: Acercamiento de la onda potencialmente inestable en la tropósfera media y alta incrementando su amplitud y disminuyendo

su longitud. La onda de temperatura se sitúa detrás de la onda geopotencial; por lo tanto, la advección fría ocurre dentro del área de la vaguada en niveles altos.

- 2° Etapa – Segregación: El incremento en la amplitud de la onda continúa y la vaguada se profundiza separándose y desplazando el aire frío hacia latitudes bajas. La consecuencia de este proceso es el desarrollo de una DANA en niveles altos.
- 3° Etapa – Baja segregada: El estrangulamiento ha finalizado y la baja segregada es ahora mucho más pronunciada. El campo de viento en 200 hPa y en algunos casos en 500 y 1000 hPa; muestran un buen desarrollo de una circulación cerrada proveniente del corte por flujos meridionales.
- 4° Etapa – Fase final: La DANA usualmente se fusiona con una vaguada profunda en altura y comienza a debilitarse. Fuertes movimientos verticales alrededor de la DANA producen mezcla turbulenta generando contaminación de ozono. Se le asocia también con vientos intensos, nevadas y disminución de temperaturas en regiones altas.

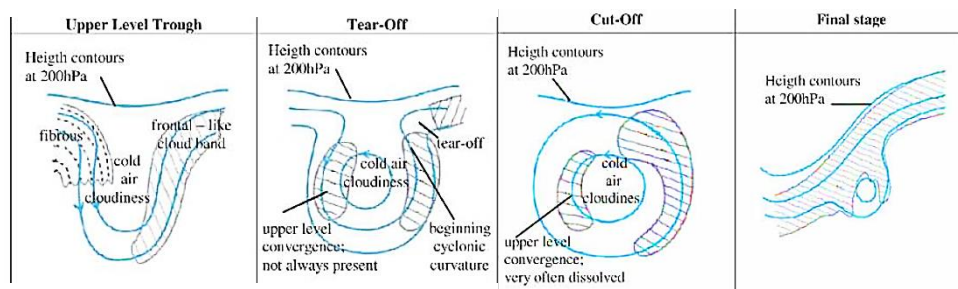


Figura 01: Etapas de la DANA. (Nieto et all, 2005)

2.1.2 DANA en el Pacífico Suroriental

Los primeros estudios de las DANA en Sudamérica iniciaron con climatologías, para luego ser analizados como casos estudio.

Fuenzalida (2005) realizó una climatología de las DANA en el hemisferio sur determinando que suelen formarse en tres continentes: África, Australia y Sudamérica. Así mismo, estas suelen presentarse en promedio, 40 veces por año, entre los 20°S-50°S con una densidad máxima en los 38°S. En Sudamérica, el ciclo es menos simétrico con un máximo en abril disminuyendo y registrando el menor número en febrero. Suelen ser más frecuentes en zonas cercanas a continentes.

Campetella (2006), en su estudio de climatologías, determinó una mayor frecuencia de DANA en el Pacífico en los meses de otoño y primavera, posicionándose en las costas de Chile y continente respectivamente. Así mismo el área de desarrollo será entre los 30°S – 45°S y 68°W – 80°W. En cuanto a la formación, determinó que el gatillador será un patrón de dipolo desarrollado debido a la intensificación de una dorsal.

Garreaud (2006) determinó que los Andes influyen en el comportamiento de la DANA. La cordillera retrasa la muerte de la DANA por el bloqueo de la afluencia de calor, humedad y aire del interior de continente, lo cual favorece su disipación debido a la generación de convección profunda que podrían iniciar. Este efecto explica parcialmente la máxima frecuencia de las DANAS observadas en el sureste del Pacífico determinado por Fuenzalida (2005).

Godoy (2006) realizó una simulación del ciclo de vida de una DANA comparándolo con y sin la cordillera presente. Determinó que los Andes no afectan el proceso de formación de una DANA; sin embargo, sí en su periodo de vida. El ciclo de vida de la DANA es más corto en la simulación sin cordillera que en la real (con cordillera presente).

2.3. Cordillera Andina

2.1.3 Andes de Sudamérica

Las principales características de los Andes fueron citadas por Salaverry (2007), donde mencionó a dos autores: Peñaherra del Águila (1986), quien señaló que la cordillera de los Andes presenta mayor variedad de zonas naturales y que es una de las zonas más accidentadas a nivel mundial; e Ibérico (1986), quien destacó su complejidad y diversidad de sus formaciones geológicas.

Salaverry (2007) indicó que “la cordillera de los Andes corre a partir de los 50° LS de sur a norte en la divisoria del territorio de Chile y Argentina y se desvía del sudeste al noreste en el territorio del Perú, a la altura del paralelo 18° LS hasta el paralelo 14° LS, en donde vuelve a cambiar de rumbo hacia el nor-noroeste hasta el paralelo 6° LS y continúa hacia el nor-noreste hacia Ecuador, Colombia y Venezuela”.

Asimismo, realizó una división de las zonas naturales de Sudamérica en: La faja costanera de la vertiente occidental, el macizo montañoso y sus cordilleras, la vertiente oriental y el zócalo continental. La división de interés para el presente estudio es el “macizo montañoso y sus cordilleras”, en la cual Salaverry (2007) incluyó elevaciones mayores a los 1000 msnm, que dividen los territorios de Chile y Argentina hacia el sur, con su zona altiplánica al norte de Bolivia y sur del Perú, cordilleras occidental y oriental, así como, cuencas y valles interandinos en el Perú, desde el Nudo de Vilcanota, pasando por el Nudo de Pasco hasta el Nudo de Loja en Ecuador y su continuación hacia el norte hacia Colombia y Venezuela. Es importante mencionar que el pico máximo de la Cordillera de los Andes es el Aconcagua, posicionado en los 6962 msnm y ubicado en la provincia de Mendoza, en el oeste de Argentina.

Salaverry (2007) consideró la clasificación de las eco-regiones de los Andes en base a lo establecido por Tapia (1996) distinguiendo cuatro condiciones ambientales diferentes a lo largo de la cordillera (figura 3):

- Andes verdes o Andes tropicales: desde Venezuela hasta el norte de Perú (de 10°N a 6°S). Región húmeda y tropical, modelada por la ITCZ y vientos continentales amazónicos.
- Andes amarillos, andes centrales o andes subtropicales: Desde los 6°S a 14°S (nudo de Vilcanota, Perú). Es casi la totalidad de territorio peruano
- Andes secos:
 - Andes altiplánicos: por encima de los 3800 msnm, al lado occidental de la meseta del Collao y la hoya del Lago Titicaca.
 - Andes desérticos: Delimitado por la cadena volcánica más extensa de los Andes (este) y la costa (oeste).
- Andes meridionales o templados: Sur de 24°S (Chile y Argentina).

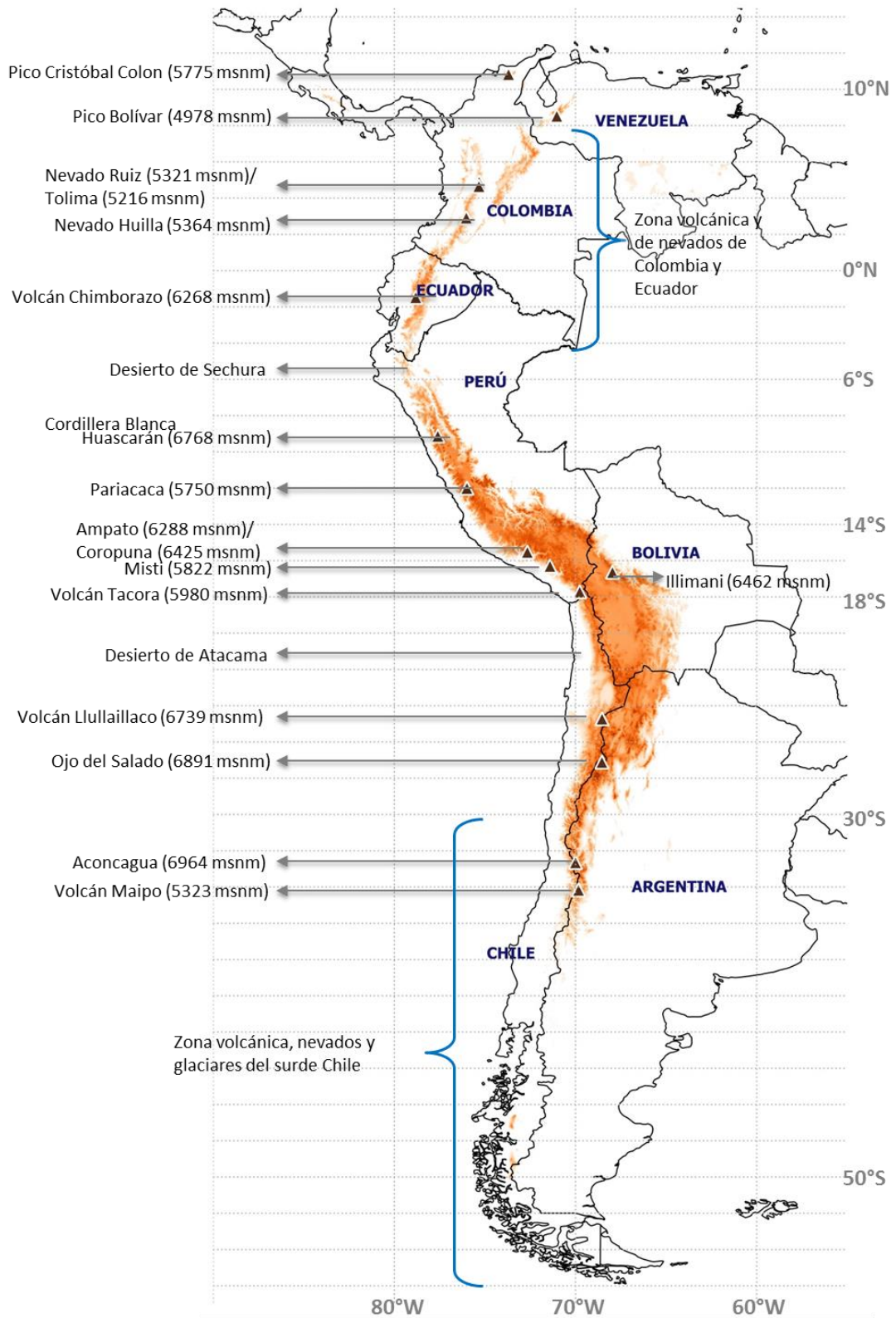


Figura 02: Altura de los principales nevados y volcanes de la cordillera de los Andes.

(Adaptado de Salaverry, 2006)

FUENTE: Elaboración propia

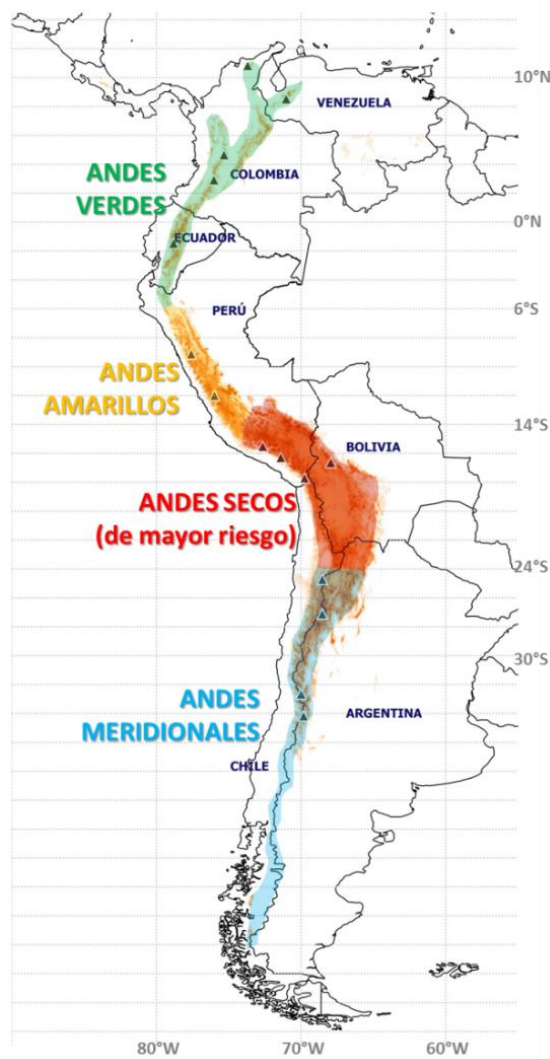


Figura 03: Regiones ecológicas latitudinales y altitudinales de la cordillera de los Andes
 (Adaptado de Salaverry, 2006)
 FUENTE: Elaboración propia

2.1.4 Clima en los Andes de Sudamérica

Garreaud (2009) y Walsh (1994), indican que los Andes desorganizan significativamente la circulación atmosférica debido a su longitud, continuidad y altitud, generando variaciones de mesoescala (variaciones de escalas horizontales por cientos de kilómetros) y a escala sinóptica (>1000km). Walsh (1994) realizó una simulación de la atmósfera sin la Cordillera obteniendo como resultado un cambio significativo en la circulación en 500 y 200 hPa especialmente en los vientos zonales. Asimismo, ambos autores concluyeron que la presencia de los Andes determina las condiciones climáticas a lo largo de las laderas este y oeste.

La FAO en el 2000, realizó una reducción de áreas en base a las zonas ecológicas en América del Sur determinando un total de 22 (Figura 4). Las de interés son los “sistemas montañosos tropicales”, “sistemas montañosos subtropicales” y “sistemas montañosos templados” los cuales son definidos a continuación:

- Sistemas montañosos tropicales: Se sitúan desde el norte de Colombia y Venezuela hasta aproximadamente los 29°S. La región es tropical, pero se caracteriza por el rango de temperaturas baja.

En los Andes septentrionales (Colombia y Venezuela) las precipitaciones son abundantes y oscilan entre los 1500 y 5000 msnm. Es frecuente la presencia de niebla. La temperatura puede caer hasta valores cercanos a los 10°C. No existe una estación seca en particular.

Al sur del Ecuador, se presenta un contraste marcado, húmedo hacia el oriente y seco o muy árido hacia el occidente. En los valles interandinos, las precipitaciones oscilan entre 1000 y 1500 msnm y la estación seca dura entre dos a cinco meses.

- Sistemas montañosos subtropicales: Se sitúan en los 26°S y 40°S entre los 1000 y 6962 m de altitud. Se caracteriza por tener un clima frío y con fuertes vientos. Las precipitaciones son bajas, generalmente inferiores a los 300mm. La estación seca se caracteriza entre primavera y verano (octubre – diciembre).

- Sistemas montañosos templados: Abarca la parte central de la Patagonia, situada hasta los 52°S y alcanza una altitud entre los 2000 y 3000 msnm. Las laderas occidentales son húmedas, mientras que la zona oriental es seca. Se caracteriza por presentar un clima frío, con nieve y viento.

En resumen, entre los 5°S-30°S (latitudes tropicales y subtropicales) predominan condiciones relativamente frías y áridas a lo largo de la costa del Pacífico (ladera oeste de los Andes); mientras que, condiciones cálidas, húmedas y lluviosas prevalecen sobre la ladera este. Garreaud (2009), menciona que este gradiente se revierte al sur de los 35°S, presentando bosques lluviosos templados a lo largo del sur de Chile y precipitaciones máximas sobre la ladera oeste de los Andes, mientras que, condiciones semiáridas hacia la ladera este hacia las estepas de la Patagonia de Argentina.

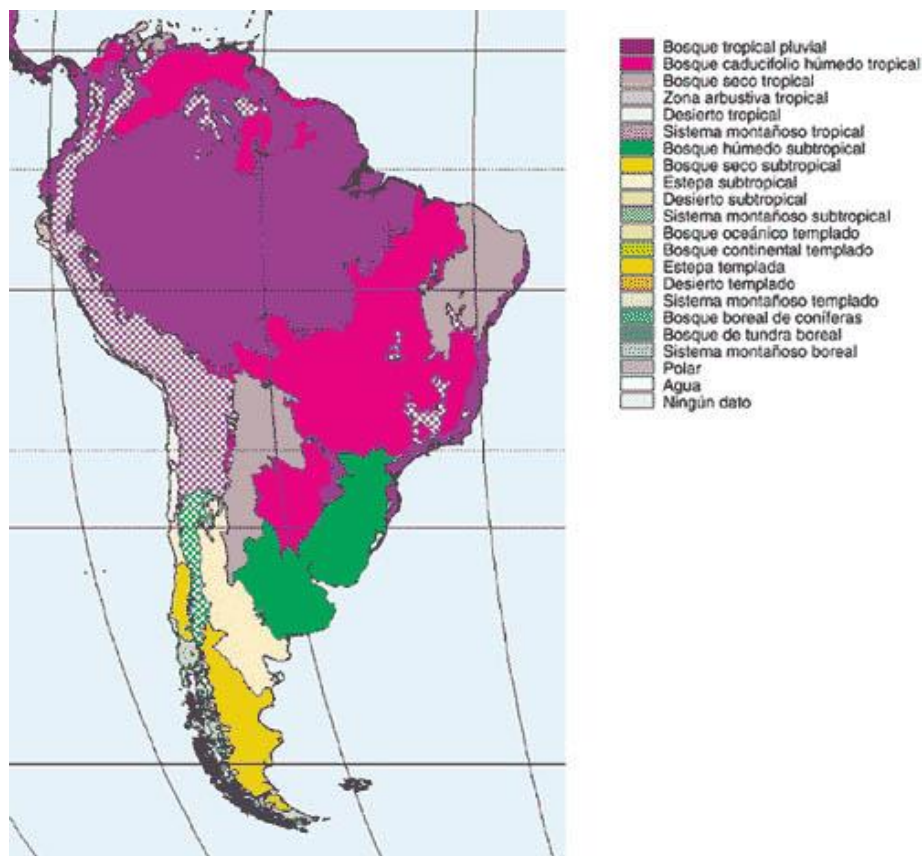


Figura 04: Zonas ecológicas de América del Sur (FAO, 2000)

Garreaud (2009) y Aceituno (2000), determinaron que los Andes centrales suelen presentar el periodo lluvioso en los meses de verano (de diciembre a marzo) con el pico máximo en el mes de febrero. Incluso, en promedio, el 60% de las precipitaciones de los Andes suele registrarse en estos meses. En un estudio reciente, Mohr (2014) utilizando el TRMM, verificó que los máximos valores en los Andes centrales suelen presentarse en los meses de verano, con los máximos acumulados en la zona oriental. Asimismo, en este periodo, Lenters (2000) y Garreaud (1999) determinaron que la mayor cantidad de precipitación en los Andes, en especial en el Altiplano, es convectiva y suele desarrollarse durante las tardes.

Al norte de los 2°S en los Andes, se presentan dos periodos de estaciones lluviosas (a finales de otoño y primavera) debido al desplazamiento de la ITCZ (Garreaud, 2009)

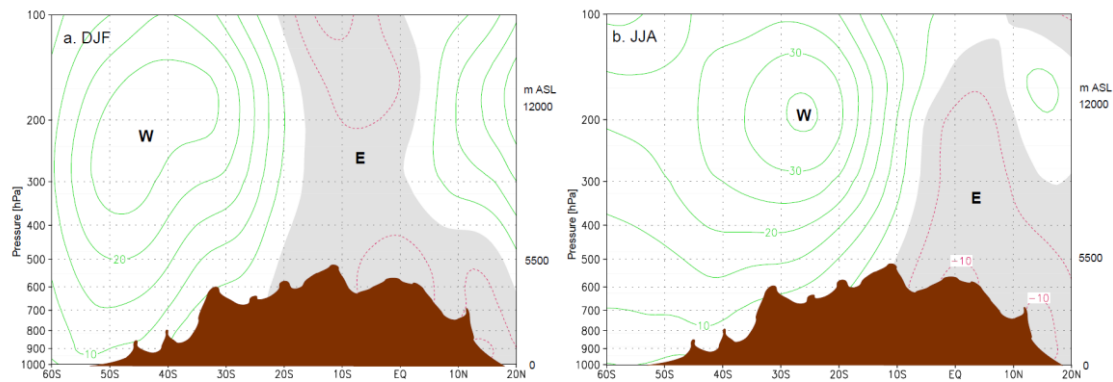


Figura 05: Corte latitudinal de viento zonal promedio de 80°-60°W para el verano (DEF, izquierda) e invierno (JJA, derecha). Intervalos positivos de 10 m/s (líneas verdes) Intervalos negativos de 5m/s (líneas rojas) Viento del este en shaded. Topografía de los Andes en marrón. (Garreaud, 2009)

Lenters (1999), determinó que la presencia y posición de Alta de Bolivia (AB) será un patrón fundamental para las precipitaciones; asimismo, en verano (enero) el jet de bajos niveles (LLJ) advecta aire húmedo y cálido hacia la zona de los Andes centrales favoreciendo el incremento de humedad. Esto es apoyado por Garreaud (2000) donde indica que el LLJ transporta el aire húmedo desde la cuenca Amazónica hacia la parte tropical del continente por el lado este alimentando la actividad convectiva. En el 2009, concluyó nuevamente que el aporte de humedad favorece las precipitaciones en los Andes, denominando a la circulación como Monzón Sudamericano.

Adicional a la circulación en niveles altos y bajos, Garreaud (1999) indicó que, en niveles medios, la presencia de una circulación antihoraria, reflejo de la AB, es una pieza clave para la generación de precipitaciones en los Andes debido a la advección de humedad (Figura 5). En el 2000, mencionó que la AB puede reflejarse incluso hasta en 700 hPa, en cuyos casos la advección de humedad es más intensa. Esto se reforzó con Aceituno (2000) y Garreaud (2003, 2009) donde volvieron a mencionar la presencia de esta circulación encargada del transporte de humedad por flujos del noreste/este. Asimismo, en los meses de invierno (junio – agosto) predominan los flujos del oeste, lo cual favorece el transporte de aire seco, inhibiendo las precipitaciones.

Otro de los patrones sinópticos que favorece la precipitación en los Andes, son las DANA. Godoy (2011) determina que la DANA suele presentar precipitación (líquida y sólida) durante su etapa de segregación y madurez.

Hacia el sur de los Andes, el principal factor que favorece las precipitaciones son los frentes (Barrett, 2009). El paso de los frentes fríos indica el transporte de aire húmedo desde el océano subtropical.

2.1.5 Andes de Perú

Pulgar (1941) definió una región natural como un área continua o discontinua, en la cual son comunes o similares el mayor número de factores del medio ambiente natural. Clasifica las regiones naturales del Perú tomando en consideración la altitud, relieve, clima, flora y fauna. El factor más importante que tomó en consideración fue la altitud, debido a la presencia de la Cordillera de los Andes.

"Se llama chala a las tierras que lindan con el mar en el lado occidental del declive andino; yunga a las tierras de clima cálido de los valles y quebradas que trepan al Ande inmediatamente después de la chala, y a los valles y quebradas de igual clima que se extienden en el declive oriental andino; quechua a las tierras templadas que se extienden en ambos declives; suni a las tierras frías; puna a los altiplanos muy fríos; janca a las cumbres nevadas o regiones blancas del país; rupa-rupa a las selvas altas ubicadas en el declive oriental de los Andes; y Amazonia o selva baja a la inmensa llanura por donde discurren los ríos que van a desembocar al Atlántico" (Pulgar, 1941). Las regiones de interés, que pertenecen a la Cordillera de los Andes, son: Suni (3500 – 4000 msnm), Puna (4000 – 4800 msnm) y Janca (4800 – 6768 msnm).

Rau (2010) determina que el comportamiento estacional de las precipitaciones medias mensuales varía desde los 0 mm/mes en los meses secos (junio – agosto) para el pacífico norte y acumulados mayores a los 200 mm/mes durante enero (época húmeda) en los Andes próximos a la vertiente Amazónica. Asimismo, indica que las estaciones localizadas por encima de los 3000 msnm presentan estacionalidad marcada, con altos valores en el periodo húmedo (enero -marzo) y los más bajos en el periodo seco (junio – agosto).

La circulación que favorece la precipitación en los Andes peruanos se relaciona con lo mencionado anteriormente, teniendo en consideración la AB, el LLJ y la circulación reflejada en niveles medios, encargada del transporte de humedad. Adicional a esto, Quispe (2006) analiza un evento de nevada intensa debido a una DANA determinando la formación de una frontogénesis en niveles altos por la llegada de este sistema generando las precipitaciones sólidas.

2.4 Tendencia cuasigeostrófica

Holton (2004), lo define como un análisis de sistemas sinópticos de latitudes medias como una consecuencia de las restricciones impuestas a los movimientos por la segunda ley de Newton, la continuidad de la masa y la conservación de la energía. Para ello, se desarrollaron las ecuaciones fundamentales utilizando el sistema de coordenadas isobáricas.

2.4.1 Ecuaciones Fundamentales

a. Ecuación de movimiento

Se define según la segunda ley de Newton: La aceleración de una partícula es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre un campo. Las ecuaciones horizontales aproximadas del movimiento en coordenadas isobáricas son:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial x} + fv \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial y} - fu \dots\dots\dots (2)$$

Donde: u: viento meridional (m/s), v: viento zonal (m/s), Φ : geopotencial (J/kg), f : Parámetro de Coriolis ($f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen}\phi$) y ϕ ; latitud, Ω : velocidad angular de la Tierra ($7,292 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)

b. Ecuación hidrostática

Holton (2004) definió la ecuación hidrostática donde representó el equilibrio entre la fuerza de gravedad y la componente vertical de la fuerza de gradiente de presión en ausencia de movimientos atmosféricos.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \dots\dots\dots (3)$$

Donde: P: presión (Pa), z: altura (m), ρ : densidad (kg/m³) y g: gravedad (9,8 m/s²).

Este equilibrio hidrostático (ec. 3) proporciona una excelente aproximación de la dependencia vertical del campo de presión a la atmósfera real. Para sistemas intensos a pequeña escala será necesario tener en cuenta variaciones del equilibrio hidrostático. Se resume que la presión en cualquier punto es simplemente igual al peso de la columna de aire de sección transversal.

$$p(z) = \int_z^\infty \rho g dz \dots\dots\dots (4)$$

Con frecuencia se utiliza el geopotencial en lugar de la altura geométrica; el geopotencial es definido como el trabajo requerido para elevar a la unidad de masa desde el nivel medio del mar hasta la altura z (unidades: J/kg²)

$$\Phi \equiv \int_0^z g dz \dots\dots\dots (5)$$

Considerando que: $d\Phi = g dz$ podemos expresar la ecuación hidrostática:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P} = -\frac{1}{\rho} \dots\dots\dots (6)$$

c. Ecuación de la continuidad

La ecuación de la continuidad menciona la conservación de masa de un fluido en diferentes volúmenes. Por lo que, la masa del fluido será constante ($\rho \cdot V = cte$), donde V es el volumen (m³).

Por lo que:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

Obteniendo:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

Donde w: velocidad vertical.

d. Ecuación de la energía termodinámica

De acuerdo a la ecuación de la energía termodinámica:

$$\frac{dT}{Dt} = \frac{\sigma P}{R} w \dots\dots\dots (9)$$

Donde T: Temperatura (K), P: presión (Pa), R: constante de un gas atmosférico (287J/kg.K), σ

Expandiendo la derivada:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V}_g \cdot \nabla\right) T = \frac{\sigma P}{R} w \dots\dots\dots (10)$$

Se acuerdo a la ecuación hidrostática, la ecuación de la energía termodinámica se convierte a:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V}_g \cdot \nabla\right) \frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\sigma w \dots\dots\dots (11)$$

Distribuyendo el operador $\frac{\partial \Phi}{\partial p}$:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial p}\right) + \vec{V}_g \cdot \nabla \left(\frac{\partial \Phi}{\partial p}\right) = -\sigma w \dots\dots\dots (12)$$

2.4.2 Ecuación de la vorticidad

Es la medida de rotación de un fluido. Puede ser absoluta (rotación del fluido más la rotación de la Tierra) o relativa (rotación respecto a la Tierra, solo del fluido). Solo interesa la componente vertical. (Holton, 2004)

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \dots\dots\dots (13)$$

$$\eta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \dots\dots\dots (14)$$

Donde η : es la vorticidad absoluta.

La ecuación de la vorticidad cuasigeostrófica, despreciando los términos de advección vertical y de inclinación, vorticidad en comparación con Coriolis en el término de divergencia y aproximando la velocidad horizontal por el viento geostrófico en el término de advección y reemplazando la vorticidad relativa por su valor geostrófico.

$$\frac{\partial \zeta_g}{\partial t} = -V_g \cdot \nabla (\zeta_g + f) + f_0 \frac{\partial w}{\partial p} \dots\dots\dots (15)$$

2.4.3 Vorticidad potencial

Es una propiedad conservativa la cual representa la vorticidad y la variación de la temperatura potencial en una capa, conocida como estabilidad estática, la cual nos ayuda a determinar el ascenso o descenso de una masa. La vorticidad potencial indica que la vorticidad de una parcela solo puede ser cambiada por un cambio en su latitud y/o el cambio en la estabilidad estática (Holton, 2004).

$$PV = (\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} \text{ UVVP*} \dots \dots \dots (16)$$

*1UVVP equivale a $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/s} \cdot \text{kg}$

Definida en coordenadas isobáricas (Markowski):

$$PV = g[\nabla_p \times v_g + fk] \cdot \nabla \bar{\theta} \dots \dots \dots (17)$$

2.4.4 Ecuación de la tendencia de geopotencial

En base a la ecuación termodinámica y la ecuación de la vorticidad cuasigeostrofica, se determina la ecuación de la tendencia de geopotencial:

Según la relación:

$$\frac{\partial \zeta_g}{\partial t} = \frac{1}{f_0} \nabla^2 \Phi \dots \dots \dots (18)$$

Reemplazando en la ecuación de la vorticidad:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \Phi \right) = -V_g \cdot \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \Phi + f \right) + f_0 \frac{\partial w}{\partial p} \dots \dots \dots (19)$$

Igualando $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ en ambas ecuaciones y considerando que es definido como tendencia de geopotencial ($X \equiv \frac{\partial \Phi}{\partial t}$):

$$\left(\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) X = -f_0 V_g \cdot \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \Phi + f \right) + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left(-V_g \cdot \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) \dots \dots \dots (20)$$

2.5 Patrones Sinópticos del clima en Sudamérica

Satyamurty (1998) define las circulaciones sinópticas que predominan en Sudamérica. En niveles altos, se presenta la Alta de Bolivia (AB), patrón que es característico de verano el cual apoya las precipitaciones en la zona central de Sudamérica, la vaguada del noreste de Brasil (VNB) que interactúa con la AB. De la VNB se desprenden sistemas denominados Vórtices ciclónicos de niveles altos (VCAN). En el Pacífico, se suelen desplazar las vaguadas, las cuales son más profundas en el mes de invierno, que pueden favorecer la presencia de las Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANA) generadas por la estrangulación de las vaguadas. Así mismo, se presenta el Jet Stream que se clasifican en Jet Subtropical (JS), Jet Polar Norte (JPN) y Jet Polar Sur (JPS).

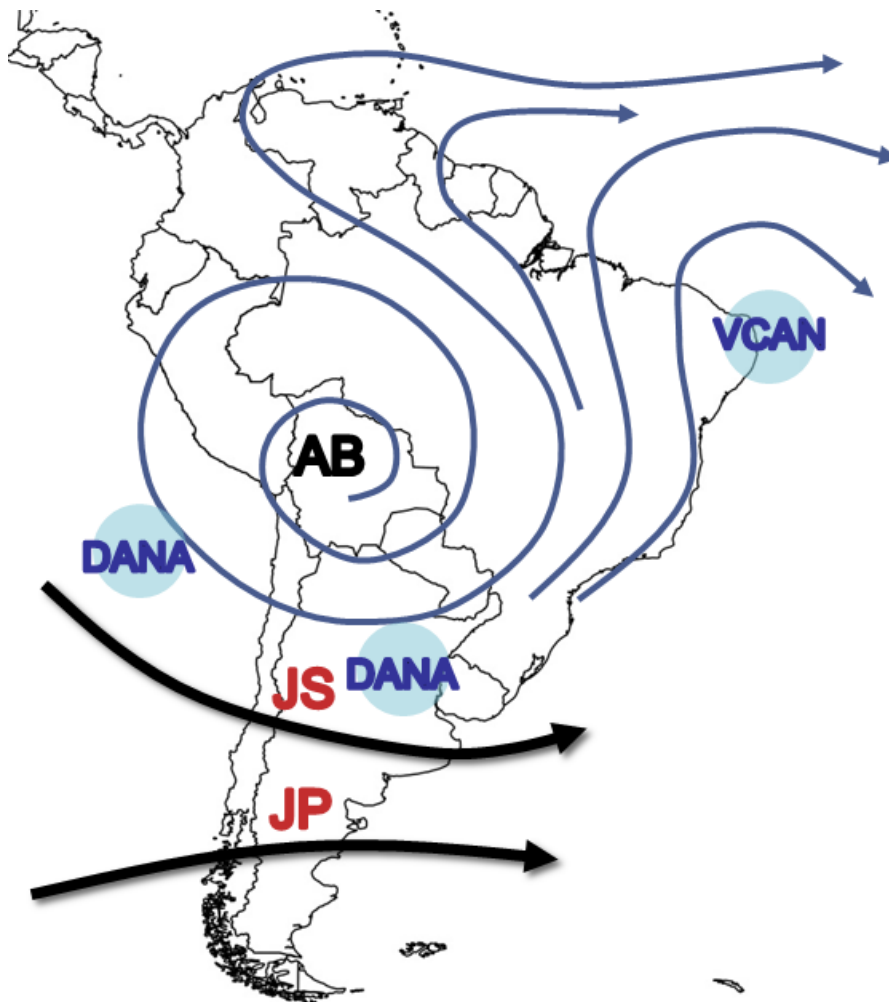


Figura 06: Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles altos (Adaptado de Satyamurty et al. 1998).

FUENTE: Elaboración propia.

En niveles bajos, predominan los anticiclones, que modulan los alisios. El Anticiclón del Pacífico Sur (APS), que presenta el núcleo más intenso en primavera y el más débil en otoño, más cercano a continente en invierno; así como, el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS) que modula el Jet bajos niveles (LLJ). También se presenta la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) que modula las precipitaciones en la zona ecuatorial y el norte de Perú. Suele desplazarse hacia el sur en los meses de verano. También se presenta el tres de bajas hacia latitudes extratropicales favoreciendo los frentes que se desplazan hacia el este.

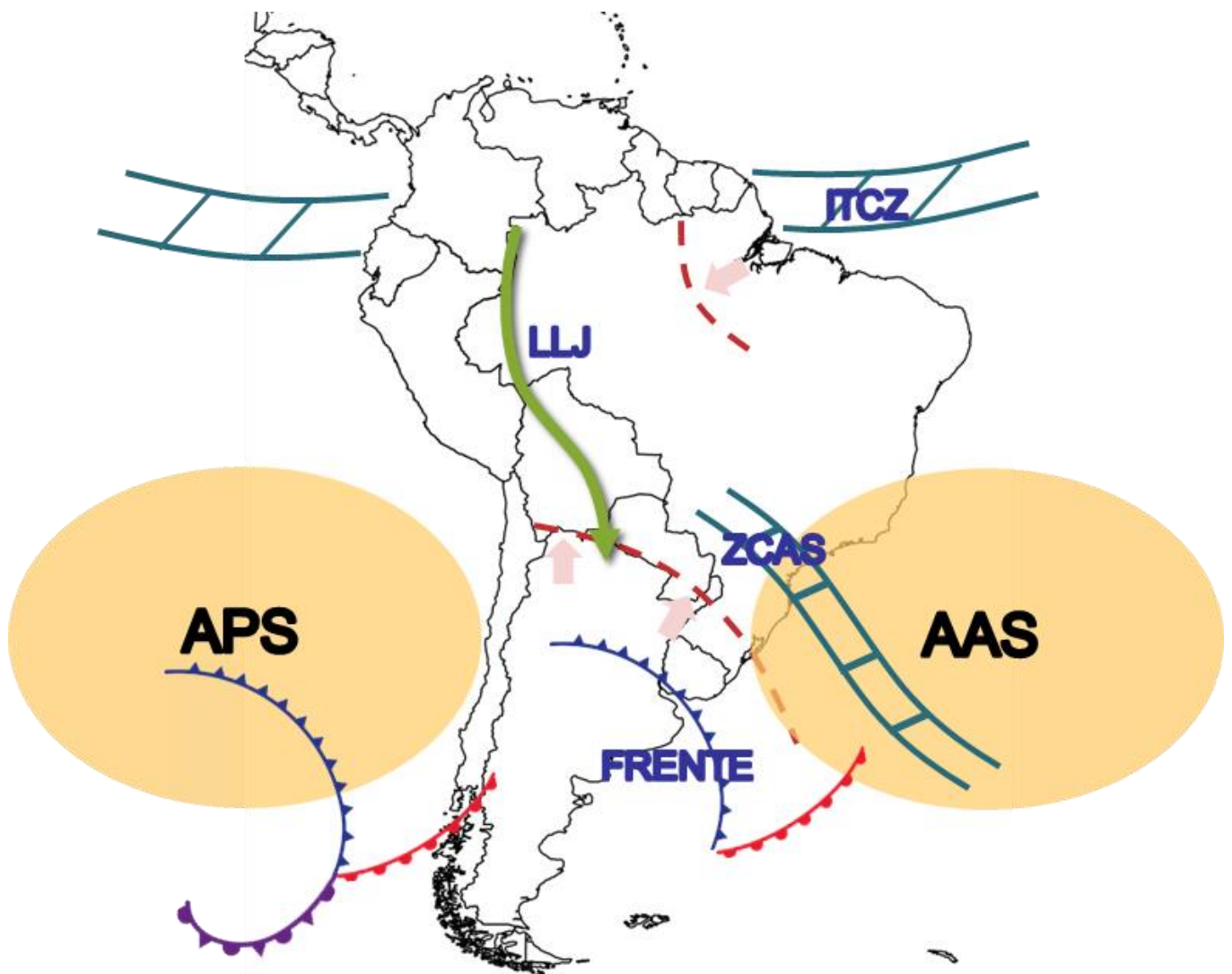


Figura 07: Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles bajos (Adaptado de Satyamurty et al. 1998)

FUENTE: Elaboración propia

2.6 Agua en la atmósfera

2.6.1 Humedad relativa (HR)

Es la relación (expresada en porcentaje) de la actual relación de mezcla (w) del aire con la relación de mezcla saturada (w_s) respecto a una superficie a la misma temperatura y presión. (Wallace & Hobbs, 2006)

$$HR = 100 \frac{w}{w_s} \dots\dots\dots (21)$$

2.6.2 Humedad específica (q)

Es la masa de vapor de agua (m_v) en una unidad de masa de aire. (Wallace & Hobbs, 2006)

$$q = \frac{m_v}{m_v+m_d} = \frac{w}{1+w} \dots\dots\dots (22)$$

2.6.3 Relación mezcla (w)

Es la cantidad de vapor de agua en un cierto volumen de aire que es definido según la relación de la masa de vapor de agua (m_v) con respecto a la masa de aire seco (m_d).

$$w = \frac{m_v}{m_d} \dots\dots\dots (23)$$

La relación de mezcla es usualmente expresada en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Si no se presenta condensación ni evaporación, la relación de mezcla de una parcela es constante. En los trópicos, la magnitud de w suele encontrarse en valores alrededor de los 20 g/kg. (Wallace & Hobbs, 2006)

Garreaud (2003) indicó que la convección en el altiplano se puede presentar con valores de 5 – 6 g/kg, los cuales son transportados desde la tropósfera baja.

2.6.4 Agua precipitable

El total de agua precipitable es el contenido de agua en una columna de unidad de corte extendido desde la superficie de la tierra al tope de la atmósfera. Matemáticamente si $x(p)$ es la relación de mezcla en el nivel de presión p , entonces el agua precipitable contenida en la capa entre las presiones p_1 y p_2 es:

$$W = \frac{1}{\rho g} \int_{p_2}^{p_1} x dp \dots\dots\dots (24)$$

Donde, ρ representa la densidad del agua y g es la gravedad.

En las tormentas, los montos de lluvia frecuentemente exceden el total del agua precipitable en la atmósfera. Esta diferencia es debido a la alimentación de vapor de agua de los alrededores de las tormentas. Existe una correlación entre los montos de precipitación generados por tormentas y agua precipitable de las masas de aire de los alrededores. (American Meteorological Society, 2015)

2.7 Estadística

2.7.1 Frecuencia absoluta

Es el número de veces que aparece un valor, se representa con f_i donde el subíndice representa cada uno de los valores. La suma de las frecuencias absolutas es igual al número total de datos, representado por N .

$$f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n = N$$

Equivalente a:

$$\sum_{i=1}^n f_i = N \dots\dots\dots (25)$$

2.7.2 Frecuencia relativa (n_i)

Es el resultado de dividir la frecuencia absoluta de un determinado valor entre el número total de datos. La suma de las frecuencias relativas es igual a 1.

$$n_i = \frac{f_i}{N} \dots \dots \dots (26)$$

2.7.3 Media móvil centrada

La media móvil se realiza con la finalidad de “suavizar” a las fluctuaciones aleatorias causadas por el componente irregular de la serie. Es recomendable suavizar cuando existen cambios bruscos o movimientos irregulares en la serie.

La media móvil centrada se realiza utilizando simétricamente los datos adyacentes. Por ejemplo, para realizar una media centrada de orden 3 mensual de julio de 1996, se utilizó el promedio de los meses de junio, julio y agosto de 1996. En general, la media móvil centrada de orden “s” va a estar definida por:

$$MC_t^s = \frac{y_{t+\frac{(s-1)}{2}} + \dots + y_{t+1} + y_t + y_{t-1} \dots + y_{t-\frac{(s-1)}{2}}}{s} \dots \dots \dots (27)$$

La principal ventaja de utilizar esta media móvil es que no se retrasará la evolución temporal de la variable, es decir, tanto la serie original como la media móvil centrada tendrán las mismas fechas t valores máximos y mínimos,

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Zona de estudio

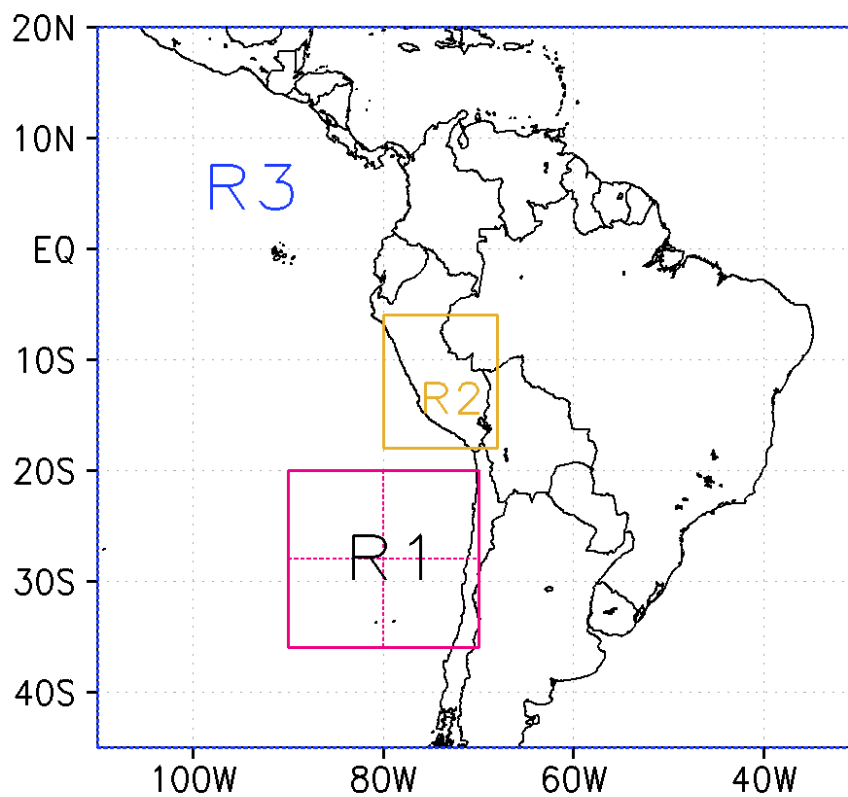


Figura 08: Zonas de estudio. R1: Área de DANA. R2: Área de nevadas. R3: Área de circulaciones sinópticas.

FUENTE: Elaboración propia

Para el análisis del presente trabajo, considerando el análisis de la DANA, nevadas y circulaciones sinópticas, se tomó tres regiones de estudio (Figura 8) las cuales se detallaron a continuación:

Para el análisis de las DANA (R1), se consideró el Pacífico oriental sur, desde los 110°W-75°W y 45°S-15°S. Se seleccionó esta área debido a los resultados de las climatologías realizadas por Fuenzalida et al (2005) y Campetella (2006). Así mismo, se dividió esta región en 4 áreas debido a la agrupación observada (densidad espacial) en los gráficos obtenidos de las climatologías mencionadas anteriormente.

Para las nevadas (R2), la región de estudio abarcó la zona central y sur de los Andes peruanos posicionados entre los 8°S – 18°S considerando las zonas por encima de los 3400 msnm de las regiones de Ancash, Huánuco, Lima, Pasco, Junín, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Puno, Arequipa, Moquegua y Tacna.

Para identificar las circulaciones sinópticas necesarias para la generación de nevadas en los Andes, se consideró una región más extensa (R3) que abarcó desde los 45°S – 20°N y 110°W – 30°W, tomando gran parte de Sudamérica y, en especial, la región de la cuenca Amazónica. Es importante mencionar que las circulaciones variaron de acuerdo a la estación del año, las cuales regulan el régimen pluviométrico en el territorio peruano, presentando los mayores acumulados de precipitación en los meses de verano.

3.1.2 Información de estaciones meteorológicas

Se recopiló información de temperatura, precipitación y observaciones de nevadas de las estaciones de la red de SENAMHI en el periodo del 2004 al 2013. Se consideraron las estaciones convencionales, las cuales cuentan con instrumentos meteorológicos para medir temperatura, precipitación, presión, humedad relativa, radiación y viento. Dichas mediciones son realizadas a las 00, 12 y 18 UTC por un observador meteorológico. También se utilizaron dos estaciones automáticas de SENAMHI las cuales se encuentran ubicadas en la región de Ayacucho.



Figura 09: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas convencionales de SENAMHI (Ver Cuadro 01)

FUENTE: Elaboración propia

Así mismo, la información de nieve se obtuvo de los registros de las “observaciones” anotadas en las planillas de las estaciones meteorológicas de SENAMHI. Se utilizó un total de 35 estaciones convencionales las cuales se ubicaron en las regiones de Ancash (1 estación), Pasco (1 estación), Junín (3 estaciones), Lima (2 estaciones), Huancavelica (2 estaciones), Ayacucho (1 estación), Puno (12 estaciones), Arequipa (7 estaciones) y Tacna (6 estaciones). La selección de estaciones se basó en la altitud y registro de anotaciones del observador. De acuerdo a la altitud, se consideraron 3 estaciones por debajo de los 3500 msnm, 9 entre los 3500 y 4000 msnm, 19 entre 4000 y 4500 msnm, y 4 por encima de los 4500 msnm.

Tabla 01: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de SENAMHI.

	DEPARTAMENTO	ESTACIÓN	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD
1	AREQUIPA	CABANOCONDE	3379	-71.96861	-15.61861
2	PUNO	OLLACHEA	3420	-70.4974	-13.8042
3	PUNO	CUYOCUYO	3494	-69.54222	-14.47444
4	TACNA	TOQUELA	3566	-69.94889	-17.66083
5	AYACUCHO	LA QUINUA	3650	-74.13528	-13.03389
6	AREQUIPA	CHIVAY	3661	-71.59694	-15.63806
7	PUNO	JULIACA	3820	-70.16944	-15.47444
8	AREQUIPA	SIBAYO	3827	-71.45306	-15.48556
9	JUNIN	LAIVE	3831	-75.35528	-12.25222
10	PUNO	PUNO	3840	-70.018	-15.8234
11	PUNO	PROGRESO	3905	-70.35556	-14.69472
12	PUNO	MAZOCRUZ	3970	-69.71167	-16.74556
13	PUNO	SANTA LUCÍA	4074	-70.60972	-15.71167
14	LIMA	CASAPALCA	4100	-76.23369	-11.64819
15	JUNIN	YAULI	4100	-76.08361	-11.66694
16	PUNO	CRUCERO	4130	-70.0238	-14.3626
17	AREQUIPA	PORPERA	4152	-71.31694	-15.35028
18	TACNA	CHUAPALCA	4177	-69.64361	-17.305
19	AREQUIPA	LA ANGOSTURA	4256	-71.64944	-15.17972
20	PASCO	CERRO DE PASCO	4260	-76.25417	-10.69444
21	TACNA	BOCATOMA	4260	-69.62628	-17.57986
22	AREQUIPA	CAYLLOMA	4299	-71.76694	-15.18361
23	PUNO	PAMPAHUTA	4320	-70.6775	-15.49139
24	PUNO	MACUSANI	4331	-70.42361	-14.06778
25	LIMA	MILLOC	4361	-76.35028	-11.57156
26	ANCASH	MILPO	4400	-77.23361	-9.88361
27	TACNA	VILACOTA	4440	-70.05083	-17.11833
28	AREQUIPA	IMATA	4445	-71.08778	-15.83667
29	PUNO	CRUCERO ALTO	4470	-70.91694	-15.76694
30	HUANCAVELICA	TUNEL CERO	4475	-75.08472	-13.25417
31	JUNIN	MARCAPOMACOCOA	4479	-76.32531	-11.40472
32	TACNA	PAUCARANI	4556	-69.77944	-17.525
33	TACNA	PAMPA UMALZO	4609	-70.42356	-16.875
34	PUNO	ANANEA	4660	-69.53453	-14.67872
35	HUANCAVELICA	CHOCLOCOCHA	5069	-75.03361	-13.10028
A1	AYACUCHO	SAN FELIPE	4391	-74.94522	-13.4577
A2	AYACUCHO	OCOLLO	4368	-74.54777	-13.285

FUENTE: SENAMHI

3.1.3 Datos de análisis y reanálisis

Se utilizó datos de reanálisis y climatología diaria del NCEP (National Center for Environmental Prediction) – NCAR (National Center for Atmospheric Research) con una resolución horizontal de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ y 8 niveles de presión con variación temporal de 6 h, en el periodo de junio 2004 a agosto 2013 para las variables viento, altura geopotencial, temperatura, humedad específica y agua precipitable. Así mismo, se utilizó el análisis del GFS (Global Forecast System) con $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de resolución horizontal, 26 niveles de presión y variación temporal de 6h en el mismo periodo. Para la realización de los gráficos se utilizó el visualizador GrADS.

Se decidió trabajar con los datos de análisis para determinar los patrones sinópticos, debido a que esta información es lo más cercano a las salidas de pronóstico, por lo que nos permitirá identificar y pronosticar con anticipación los eventos de nevadas en los Andes. Además, se usan los reanálisis para la determinación de anomalías debido a que presentan mayor resolución temporal que el análisis, contando con una gran data histórica.

3.2 Métodos

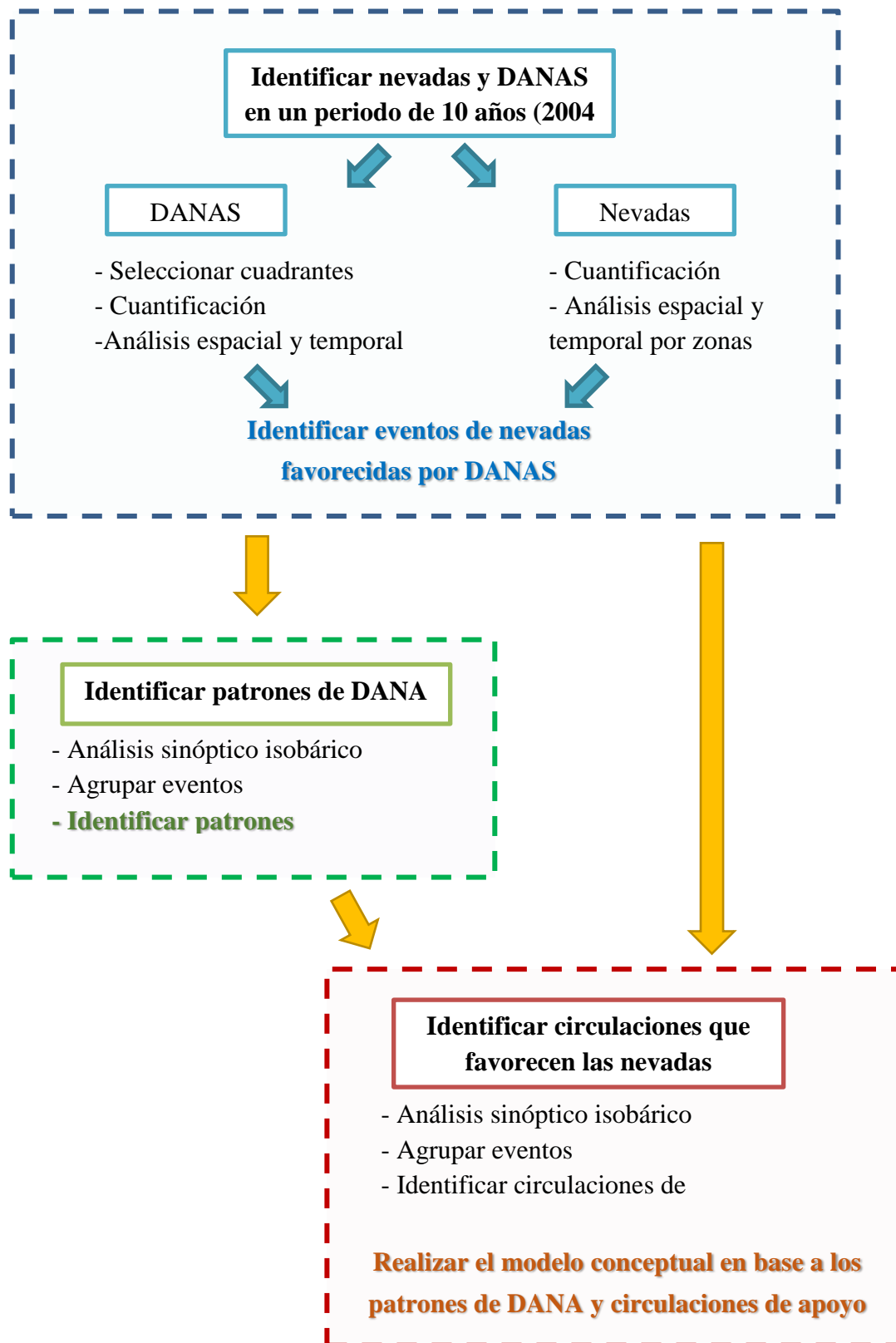


Figura 10: Diagrama de flujo de la metodología.

FUENTE: Elaboración propia

3.2.1 Identificación de eventos de nevadas y DANA en los Andes del Perú en un periodo de 10 años (julio 2004 – agosto 2013)

Para realizar el primer objetivo secundario, se dividió en dos secciones: una para la identificación de DANAS y otro para las nevadas, las cuales son detalladas a continuación:

a. Identificación de DANAS

i. Selección de cuadrantes de estudio

En base a los estudios climatológicos realizados por Fuenzalida et al (2005) y Campetella (2006) se seleccionó un área entre los 90°W-70°W y 20°S-36°S para el análisis de las DANAS. Esta área fue dividida en cuatro cuadrantes (Figura 11) A1, A2, A3, A4; con la finalidad de saber si existe alguna relación entre la posición de la DANA y las nevadas en diferentes zonas de los Andes.

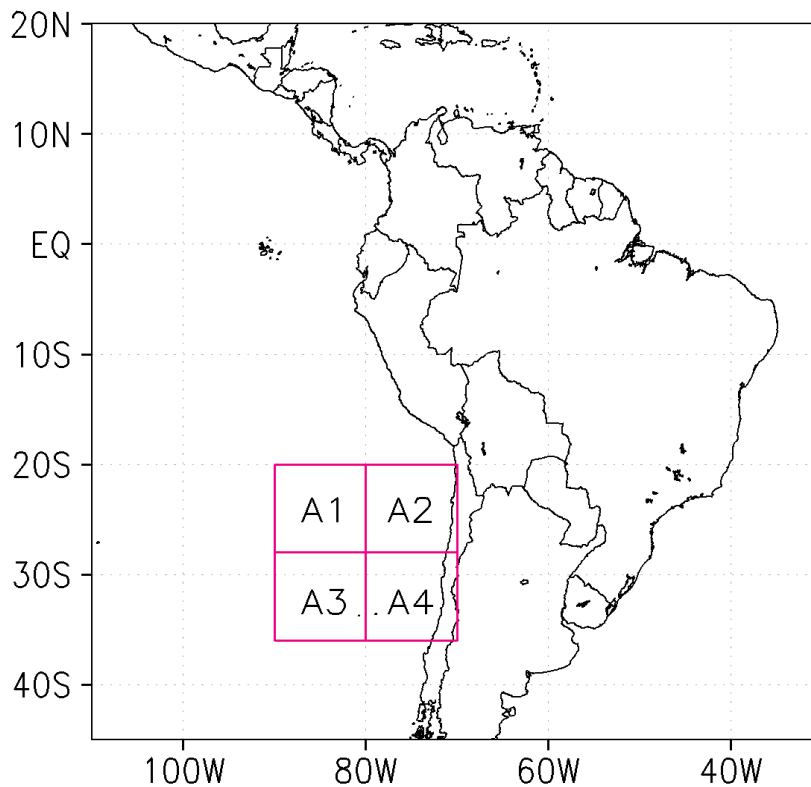


Figura 11: Cuadrantes de estudio de la DANA.

FUENTE: Elaboración propia

ii. Cuantificación de DANA

Para la cuantificación de las DANA se tomará de referencia las características establecidas por Quispe (2009) la cuales son: Isohipsas cerradas en 500 hPa (cada 20 mgp) y valores de vorticidad potencial menores al mínimo, el cual es -1.6 UVP (Unidad de Vorticidad Potencial) en 300 hPa. 1UVP equivale a $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/s} \cdot \text{kg}$. Adicional a esto, para no confundir las DANAS con las bajas dinámicas, se utilizó un condicional extra: no debe presentarse isohipsas cerradas en el nivel de 925 hPa.

Para ser cuantificado, debió cumplir con todas las condiciones anteriormente mencionadas por lo menos en un tiempo (cada 6h, de acuerdo a la resolución temporal del modelo). Es importante mencionar que, se cuantificó de manera diaria y no por tiempo de vida, lo cual realizó Fuenzalida (2005), Campetella (2006) y Quispe (2014), debido a que en este estudio fue importante relacionar la posición de la DANA con las nevadas (en el tiempo de vida de una DANA, el sistema suele desplazarse por el Pacífico, llegando a abarcar los cuatro cuadrantes de estudio).

La cuantificación se realizó manual, observando cada uno de los tiempos y determinando el cuadrante en el que se encuentra.

iii. Análisis espacial y temporal de las DANAS

Una vez identificadas todas las DANAS, se realizó el análisis espacial, graficando los núcleos de cada una de ellas (en base a la vorticidad potencial) lo que permitió identificar la zona con mayor densidad de DANAS. Asimismo, se analizó el comportamiento anual y estacional.

b. Identificación de nevadas

i. Recopilación de información y cuantificación de eventos

En el Perú, no se cuenta con mucha información histórica sobre las nevadas, en especial sobre el espesor o cantidad de nieve, o la extensión que logran cubrir. Actualmente se han instalado sensores para medir los parámetros mencionados anteriormente en estaciones automáticas; sin embargo, aún no se cuenta con mucha información histórica. Por ello, solo

nos quedan las estaciones meteorológicas convencionales, las cuales cuentan con mayor información temporal, aunque éstas no tienen incorporado sensores especiales que realicen la medición del nivel de nieve como algunas estaciones automáticas. Una estación meteorológica convencional es monitoreada por un observador meteorológico, el cual es el encargado de realizar las mediciones de las diversas variables meteorológicas y recopilar la información del tiempo a las 7:00, 13:00 y 19:00 horas (hora local, Perú); una vez realizada la observación, estos datos son registrados en una planilla, la cual tiene casillas para rellenar información de temperaturas, humedad, precipitación, viento, radiación solar, evapotranspiración, presión y algunos meteoros observados, en los cuales no se consideran las nevadas; asimismo, tiene una sección denominada “observaciones”, que fue de vital importancia para este estudio, ya que en ese espacio se anotó la información extra en la cual fue incluida información de presencia de nevadas.

Por ello, se revisaron las planillas, en especial la sección de observaciones de las estaciones meteorológicas de SENAMHI, ubicadas a una altitud mayor a los 3379 msnm en el periodo de enero 2004 a diciembre 2013. Lamentablemente no todos los observadores anotaron las nevadas generadas en esa sección, por lo que al final se utilizó un total de 35 estaciones abarcando las regiones de Ancash, Huánuco, Lima, Pasco, Junín, Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Puno, Arequipa, Moquegua y Tacna.

Cabe resaltar que la información recopilada solo es de eventos de nevadas por día, no se tiene información de altura nieve, por lo que se realizó un análisis de “frecuencias” y “áreas afectadas”, más no uno de “intensidad”. Otro punto importante es que la información recopilada fue netamente obtenida de lo anotado por los observadores, por lo que se pudo presentar errores en la observación, con alta probabilidad de que el más común fue la confusión del meteoro, especialmente nieve con granizo.

ii. Frecuencia temporal de nevadas

En base a la información de 10 años obtenida de las planillas, se cuantificó el número total de días de nevadas por estación meteorológica. Para obtener los mapas de frecuencia a nivel nacional (mapa de zonas con alta probabilidad a presentar nevadas) se delimitó espacialmente asociándolo con las altitudes. En las zonas donde no se encontró estación meteorológica con información de nieve (Ayacucho), se trabajó en base a dos estaciones

automáticas (Ocollo y San Felipe). Debido a que no contó con información histórica, para determinar la cota de la isoterma de 0°C (y poder conocer la cota mínima de nieve) se consideró el evento más extremo (28 de agosto de 2013, luego se analizó las variaciones de temperatura y precipitación horaria y siguiendo la disminución de la temperatura con la altura (atmósfera ideal, 1°C/1km), se consideró el nivel de 4200 msnm como cota de nieve (donde se presenta la isoterma de 0°C). Así mismo, al analizar las estaciones de la sierra central, se realizó el mismo proceso determinando la cota de 0°C en el nivel de 4000 msnm.

Posterior a esto, se trabajó de manera estacional obteniendo un valor porcentual en base al número de nevadas por estación con respecto al total de eventos. Se obtuvo cuatro mapas del comportamiento espacial de las nevadas a nivel nacional, uno por estación: verano (diciembre – febrero), otoño (marzo – mayo), invierno (junio – agosto) y primavera (setiembre – noviembre).

iii. Zonificación de áreas de nevadas

En base a la experiencia y tomando en consideración las áreas de nevadas en las imágenes satelitales, se clasificó la totalidad de los Andes peruanos en 3 zonas: Centro (CEN), Sur Occidental (SOC) y Sur Oriental (SOR), desde la región de Ancash hasta Tacna. Según la clasificación se obtuvo un total de 10 estaciones en el centro, 19 en el occidente y 6 en el oriente. La estación con la altitud más baja es Cabanoconde (Arequipa) a 3379 msnm y la más alta, Choclococha (Huancavelica) a 5069 msnm.

Para establecer si un evento de nevada fue significativo en cada “zona”, se determinaron valores porcentuales de acuerdo al número de estaciones que registraron nevadas. En base a esto, se obtuvieron dos tipos de eventos de “frecuencia de nevadas” las cuales fueron consideradas de acuerdo a los registros de nevadas por zona: Las Nevadas Ordinarias (ORD) considerando el registro del 95% de estaciones frecuentes por zona; y las Nevadas Generalizadas (GEN) con registros de 99% de estaciones frecuentes por zona.

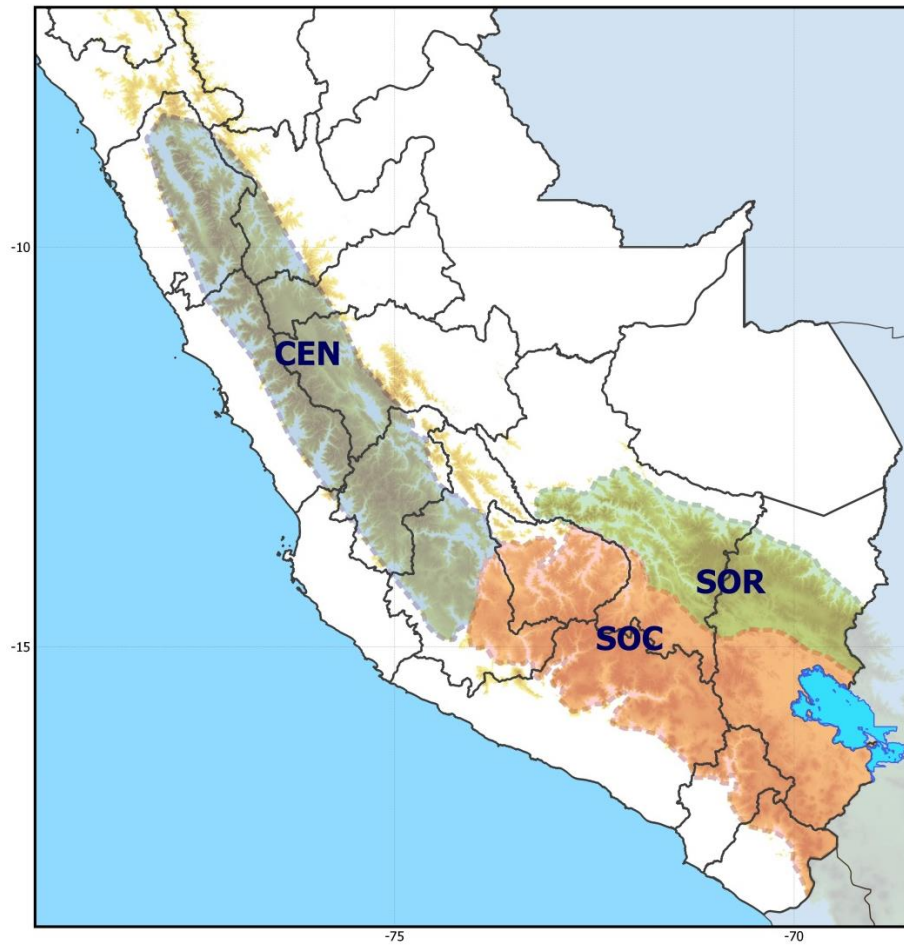


Figura 12: Zonas de estudio de las nevadas. CEN: Centro. SOR: Oriente. SOC: Occidente.

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 02: Criterio de selección de estaciones meteorológicas por zonas de nevadas

Área	Número de estaciones		
	Total	Nevadas ordinarias (95% de estaciones frecuentes)	Nevadas generalizadas (99% de estaciones frecuentes)
Centro	10	3	5
Sur occidental	19	4	6
Sur oriental	6	2	4

iv. Comportamiento “climatológico” anual y mensual

Una vez obtenidos los eventos de nevadas por “zona”, se procedió a realizar el conteo anual y mensual (CEN, SOC y SOR) con la finalidad de obtener los meses más frecuentes de nevadas, años y áreas. También se tomó en consideración el tipo de evento (ORD y GEN).

Así mismo, se quiso conocer si existió alguna relación entre el fenómeno El Niño y La Niña con las nevadas, por lo que se realizó una comparación con el ONI (Oceanic Niño Index) con respecto a la cantidad de nevadas totales. La finalidad fue determinar si afectó en la generación de nevadas en los Andes peruanos o en la cota mínima de nieve.

c. Identificación de nevadas favorecidas por DANAS

Una vez obtenidas las fechas de presencia de DANA y nevadas, se realizó el cruce de información entre ambas determinando los eventos finales a estudiar en el presente trabajo. En base a estos eventos, se trabajó el segundo objetivo específico y el objetivo principal.

3.2.2 Identificación de patrones de una DANA que apoye la generación de nevadas

Para el segundo objetivo específico, en base a las características establecidas para determinar una DANA, se analizó la altura geopotencial, vorticidad potencial y viento especialmente en niveles altos (200, 300 hPa) y medios (500 hPa), identificando los sistemas que tuvieron características similares. Adicionalmente, se utilizó la variable temperatura para detectar la intrusión de aire estratosférico en niveles altos (200 hPa). Se tomó en consideración el proceso de formación de una DANA caracterizado por Nieto (2005) en la cual se determinó cuatro etapas de una DANA (formación de vaguada en niveles altos, segregación, baja segregada y etapa final). Las salidas fueron obtenidas utilizando el visualizador GrADS.

Posterior a esto, se agruparon las fechas en común para determinar los patrones de circulación más frecuentes para la presencia de nevadas en los Andes peruanos.

3.2.3 Identificación de circulaciones que favorecen la generación de nevadas

Garreaud (2006) afirmó que, para que se presenten precipitaciones en los Andes centrales, es necesaria la advección de humedad en niveles medios hacia el interior del continente (por flujos del este); asimismo, debe estar presente el jet de bajos niveles transportando humedad desde la cuenca Amazónica (para precipitaciones en verano).

Otros grandes sistemas que modulan las precipitaciones en los Andes son: la Alta de Bolivia (verano) y vaguadas profundas (invierno). Por ello, se realizaron gráficos de humedad relativa, relación de mezcla y viento en niveles medios (500, 550, 600 y 700 hPa) y niveles bajo (850 hPa); así como los flujos en niveles altos (200 hPa). En base a estas variables, se buscó la advección de humedad del este hacia los Andes los cuales comúnmente están relacionados con una circulación antihoraria en niveles medios con núcleo en el sur de Brasil o Bolivia. Luego, se realizaron gráficos temporales y cortes latitudinales y longitudinales en base a las mismas variables para analizar su comportamiento.

Así mismo, se trabajaron las anomalías, en especial con el agua precipitable, humedad relativa y relación de mezcla, para determinar los excesos o déficit de cada una de ellas en los diversos eventos.

Para finalizar, y lograr el objetivo principal, se procedió a agrupar los eventos (obtenidos en el primer objetivo secundario) que tengan configuraciones similares; esto permitió identificar las circulaciones que favorecen las DANAS y elaborar el modelo conceptual.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Identificación de eventos de nevadas y DANA en los Andes peruanos en un periodo de 10 años (2004 – 2013)

4.1.1 Identificación de DANAS

En el conteo de las DANA, a diferencia de otros autores, se realizó el conteo de la presencia de DANA por día, más no por sistema, por lo que la contabilización obtenida no necesariamente tuvo relación con la climatología obtenida por Fuenzalida, 2005 (mayor frecuencia en otoño, abril), Campetella, 2006 (mayor frecuencia en primavera) o Quispe, 2014 (mayor frecuencia en invierno). En este caso, cuantificando por día, el mayor número de DANAS se presentó en verano.

Al analizar cuatro áreas de estudio de DANAS (Figura 11) en el conteo total, se obtuvo que el área que presenta mayor frecuencia de DANA es el A4 con 43%, seguido del A3 con 22% debido a que son las áreas extratropicales por lo que son más propensas a presentar DANAS por la mayor frecuencia de vaguadas, así mismo, el A4 tiene la ventaja de encontrarse cercana a la cordillera, favoreciendo la duración de la DANA y lentificando su desaparición (Garreaud (2006), Godoy (2006)). La menos frecuente son el A1 con 17% y A2 con 18% debido a su proximidad a latitudes tropicales, hacia estas regiones es menos frecuente la llegada de vaguadas. (Figura 13)

La zona de Argentina, Bolivia y Paraguay no presentaron núcleos de DANA debido a la presencia de la cordillera, la cual actúa como bloqueo para el desplazamiento de las DANA generando su disipación hacia la vertiente oriental.

El comportamiento estacional de las DANAS está relacionado con la profundidad de las vaguadas, por lo que se aproximan más hacia latitudes tropicales en los meses de invierno

(cuando las ondas Rossby son más profundas) y se desplazan hacia el sur en los meses de verano (ondas con menor amplitud). Figura 14.

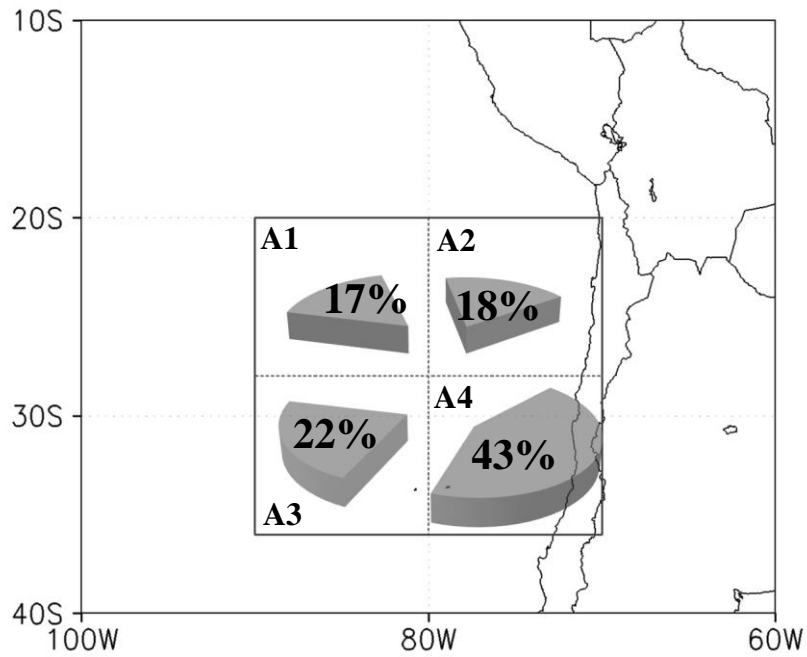


Figura 13: Porcentaje de DANA por cuadrante de estudio. Ver figura 11.

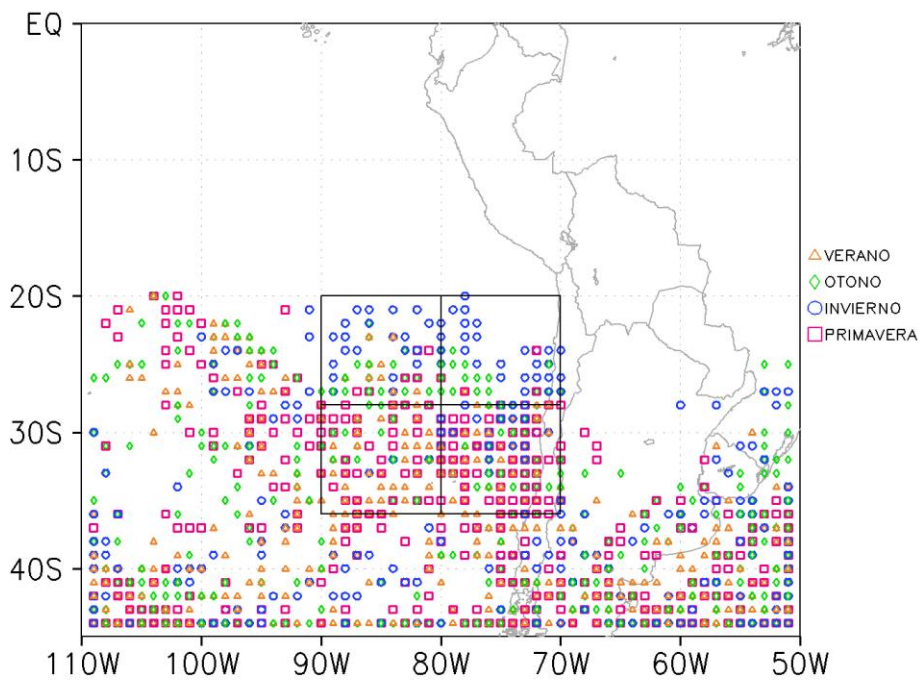


Figura 14: Mapa de ubicación del núcleo de las DANA en el periodo de estudio. Posición marcada en base al mínimo de VP (<-1.6 UVP)

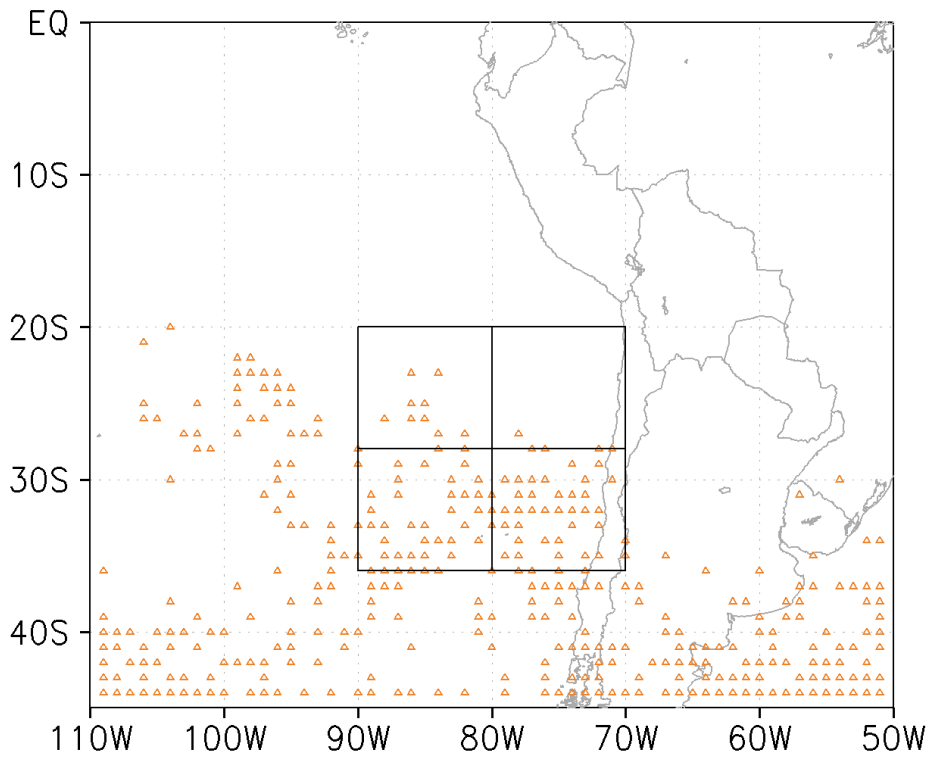
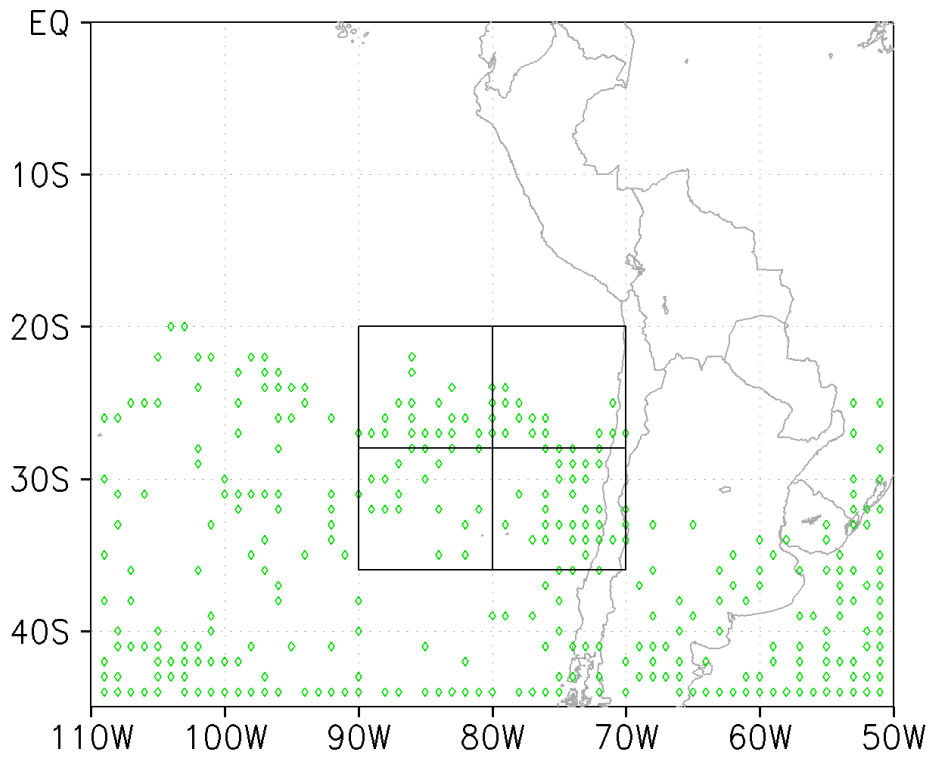


Figura 15: Ubicación de las DANA en la estación de verano (DEF)



. Figura 16: Ubicación de las DANA en las estaciones de otoño (MAM)

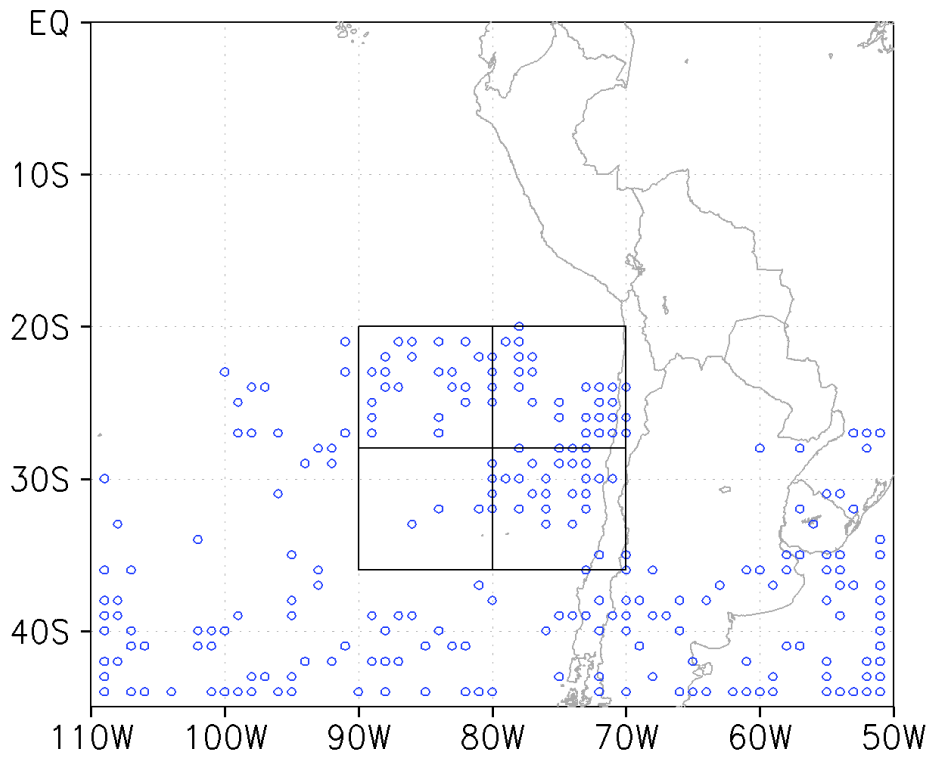


Figura 17: Ubicación de las DANA en las estaciones de invierno (JJA)

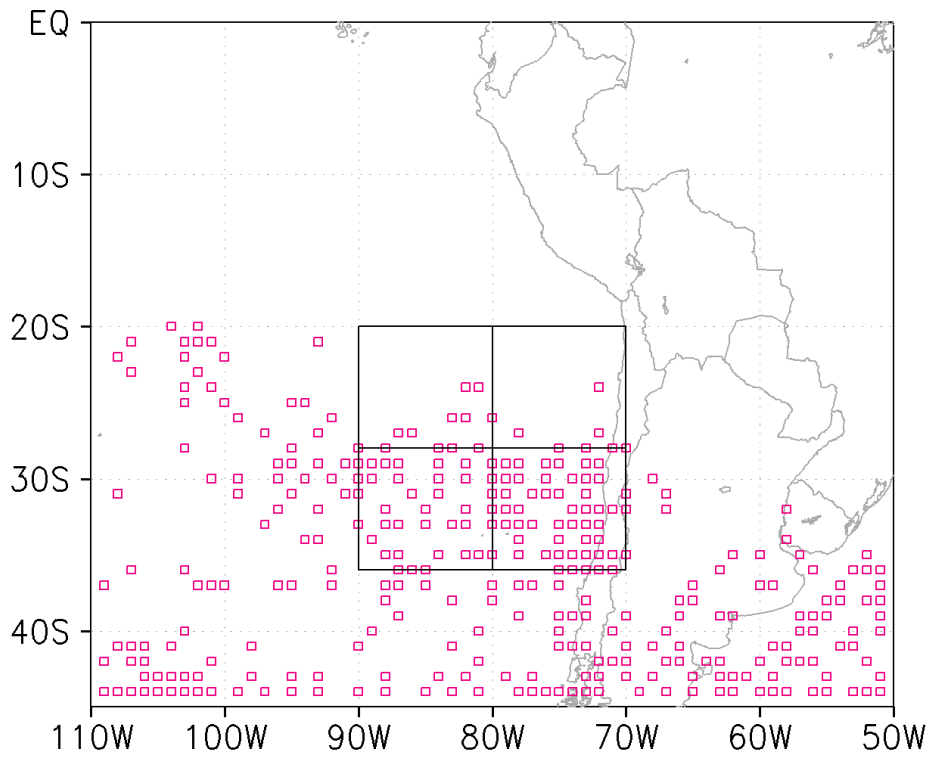


Figura 18: Ubicación de las DANA en las estaciones de primavera (SON)

Al realizar el ploteo anual (Anexo 3), se observó que en el año 2004 las DANAS se desplazaron hacia el norte, presentándose más cercanas a continente en los meses de invierno. Esto es debido a la desintensificación del Anticiclón del Pacífico Sur (APS) (figura 19), asociado a una dorsal en niveles altos, y la mayor frecuencia de bajas presiones, asociadas a vaguadas, las cuales se desplazarán con mayor frecuencia hasta latitudes tropicales.

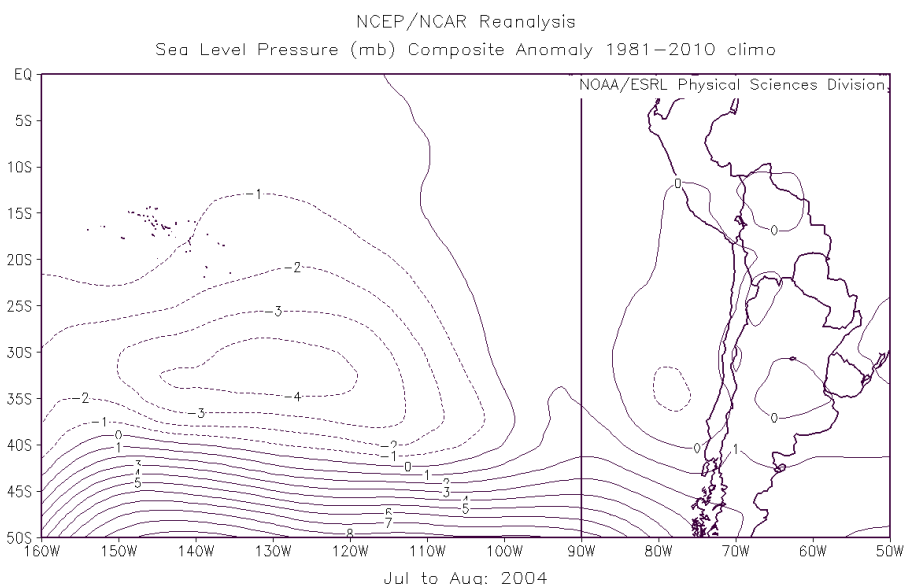


Figura 19: Anomalía de presión en los meses de invierno (julio – agosto) del 2004.

FUENTE: NCEP/NCAR

4.1.2 Identificación de nevadas

a. Recopilación de información y cuantificación de eventos

Al realizar el análisis de la información obtenida de las estaciones meteorológicas, se optó por utilizar 35 estaciones. La más baja se ubicó en los 3379 msnm, la cual registró nevadas ante un evento GEN determinando un “umbral” mínimo (cota mínima) para la generación de nevadas en los Andes peruanos. Así mismo, las estaciones por encima de los 4500 msnm presentaron nevadas con mayor frecuencia.

b. Frecuencia temporal de nevadas

Al realizar el mapa de frecuencia de nevadas en el periodo de 10 años, se obtuvo como cota mínima 3400 msnm en la sierra sur occidental, 4200 msnm en zona de Ayacucho y 4000

msnm en la sierra central. Esto es explicado debido a que, al aproximarnos hacia la zona ecuatorial, las temperaturas se incrementan, por lo que la cota de nieve se encontró en altitudes más altas.

En cuanto a los días de nevadas, el mayor valor se presentó en la estación de Ananea (Puno), registrando un total de 615 días, por lo mismo que se ubica a los 4660 msnm y en la vertiente oriental, cercana a la zona con mayor humedad. Los siguientes valores se ubicaron en la sierra central (por encima de 200 días) debido a su proximidad con la cuenca Amazónica, seguido de las zonas altas de la vertiente occidental. El menor número de días se registró en Juliaca con solo 2 días en el periodo de 10 años, registrándose en agosto de 2013, considerado un año Niño según el ONI, con calentamiento en el Pacífico ecuatorial.

Al realizar los mapas estacionales, se determinó que las nevadas fueron más frecuentes en la estación de verano, presentando entre el 40% - 60% en la sierra central y en las zonas altas de la sierra sur. La cota se elevó en la sierra sur occidental a 4000 msnm. En la estación de invierno se presentaron los máximos porcentajes de la sierra sur, incluso en algunos casos, el 100%, evidenciando el descenso de la cota de nieve en la SOC a 3400 msnm, al igual que en el altiplano, aproximadamente en los 3800 msnm.

La sierra central presentó los máximos valores en verano, seguido de primavera y otoño y por último en invierno debido a la variación anual de la humedad, se resolvió que las nevadas en los Andes centrales dependen de la humedad y de los patrones de circulación de verano, más que de invierno (Anexo 1 y 2).

c. Zonificación de áreas de nevadas

En base a las zonas planteadas, se determinó un total de 307 eventos de nevada (diario) registrados en los Andes peruanos obtenidos por información de las planillas (es importante mencionar que se puede presentar error debido a podría haber eventos que no fueron registrados en este conteo; así como, fenómenos confundidos como nevadas). Así mismo, se cuenta con pocas estaciones para la zona SOR por lo que esta podría ser la que presente un mayor margen de error. De estos, 361 eventos fueron ORD y 46 GEN. 167 se presentaron en la zona CEN, 86 en SOR y 54 en SOC.

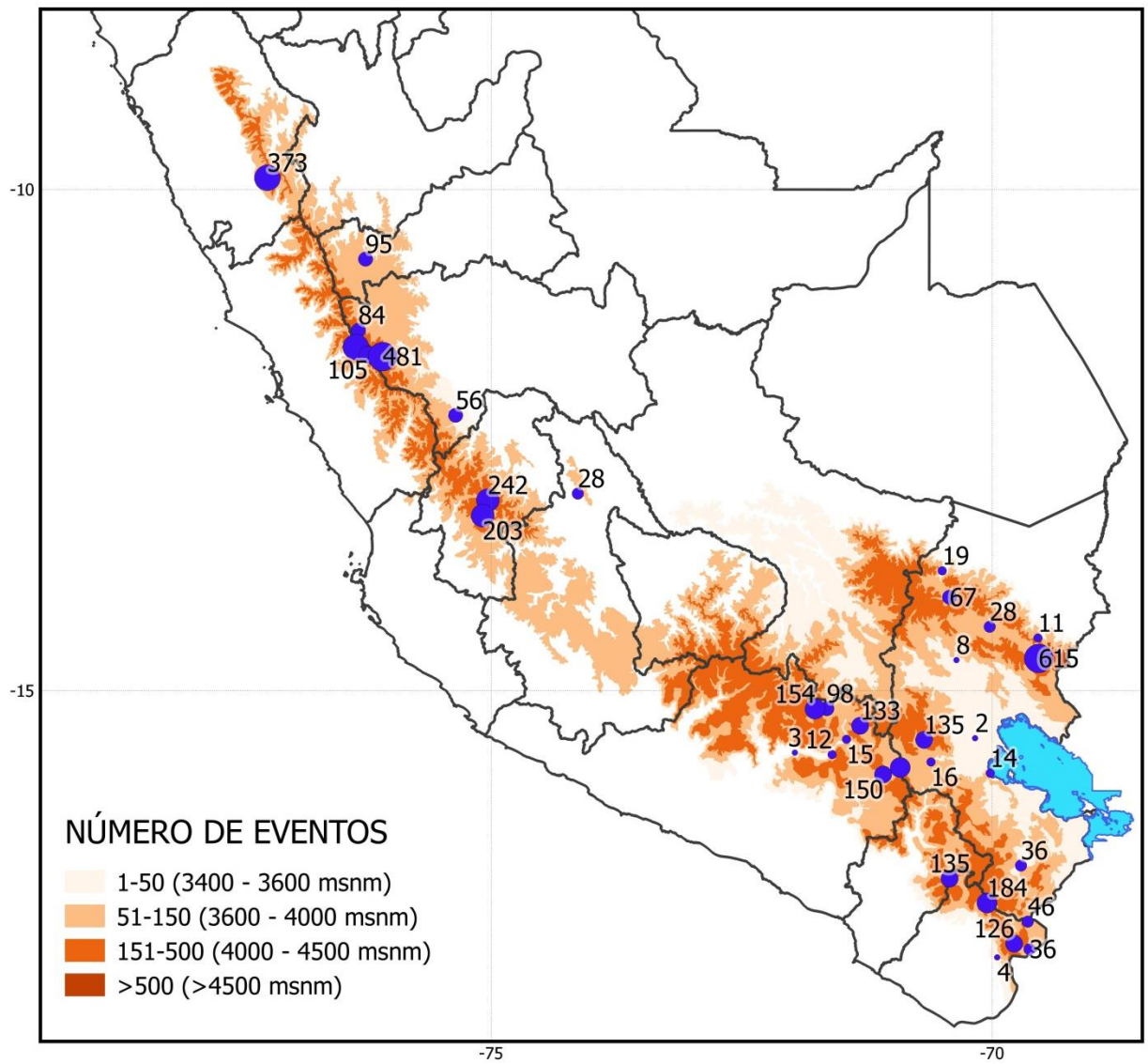


Figura 20: Mapa de frecuencia del número de eventos de nevadas totales en base a la información de 10 años. El tamaño indica la densidad de eventos.

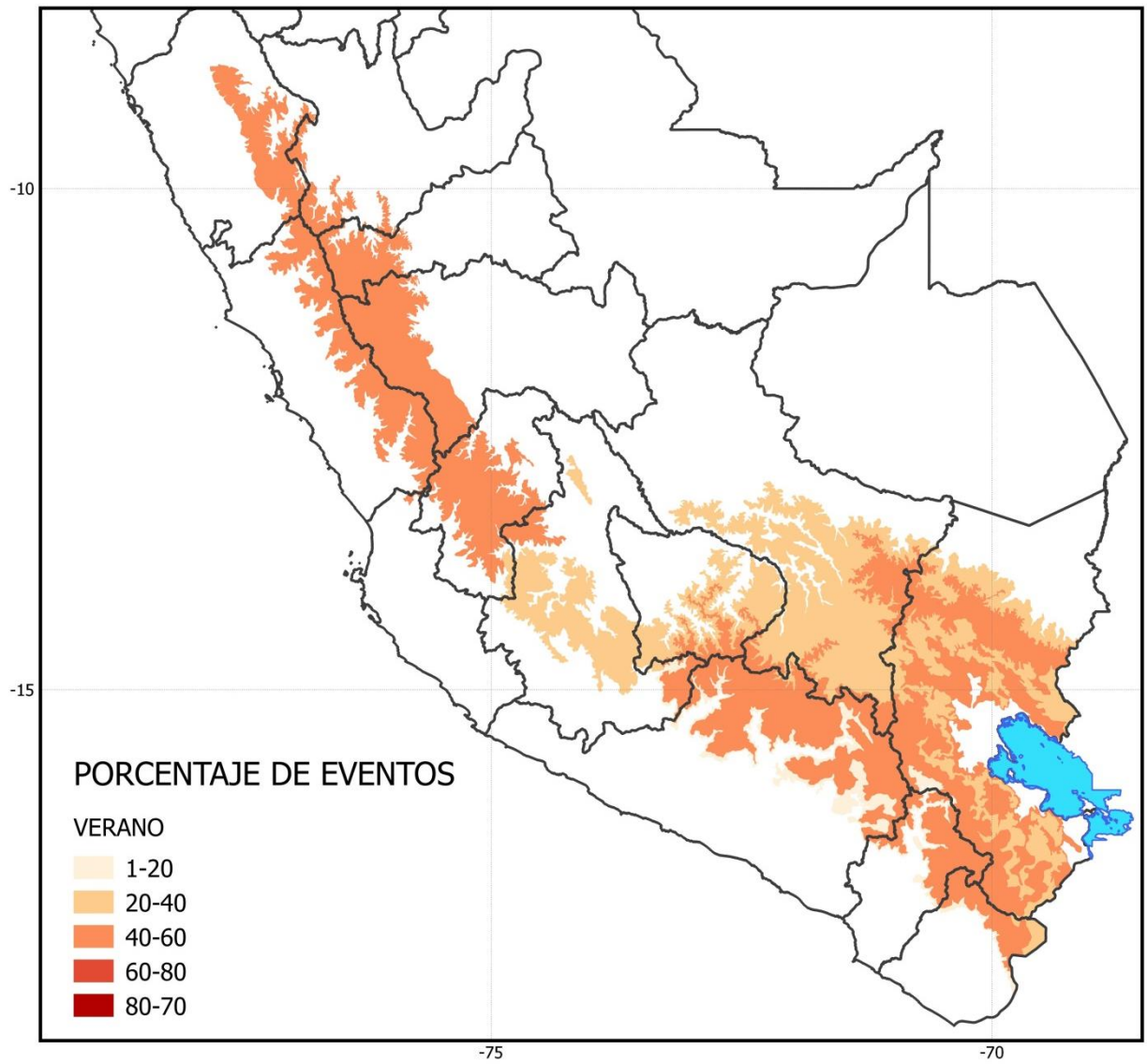


Figura 21: Mapa de frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de verano.

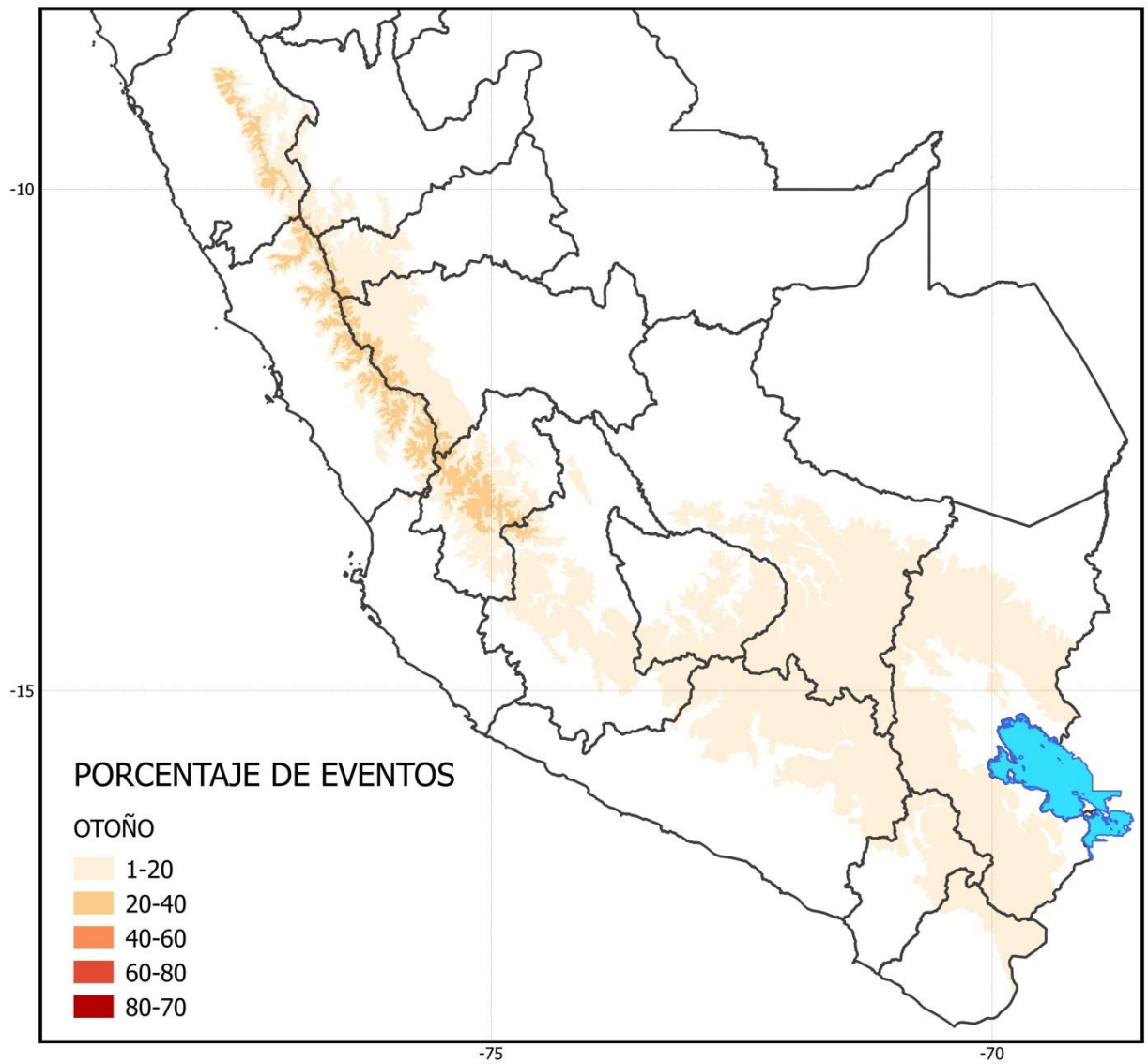


Figura 22: Mapa frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de otoño.

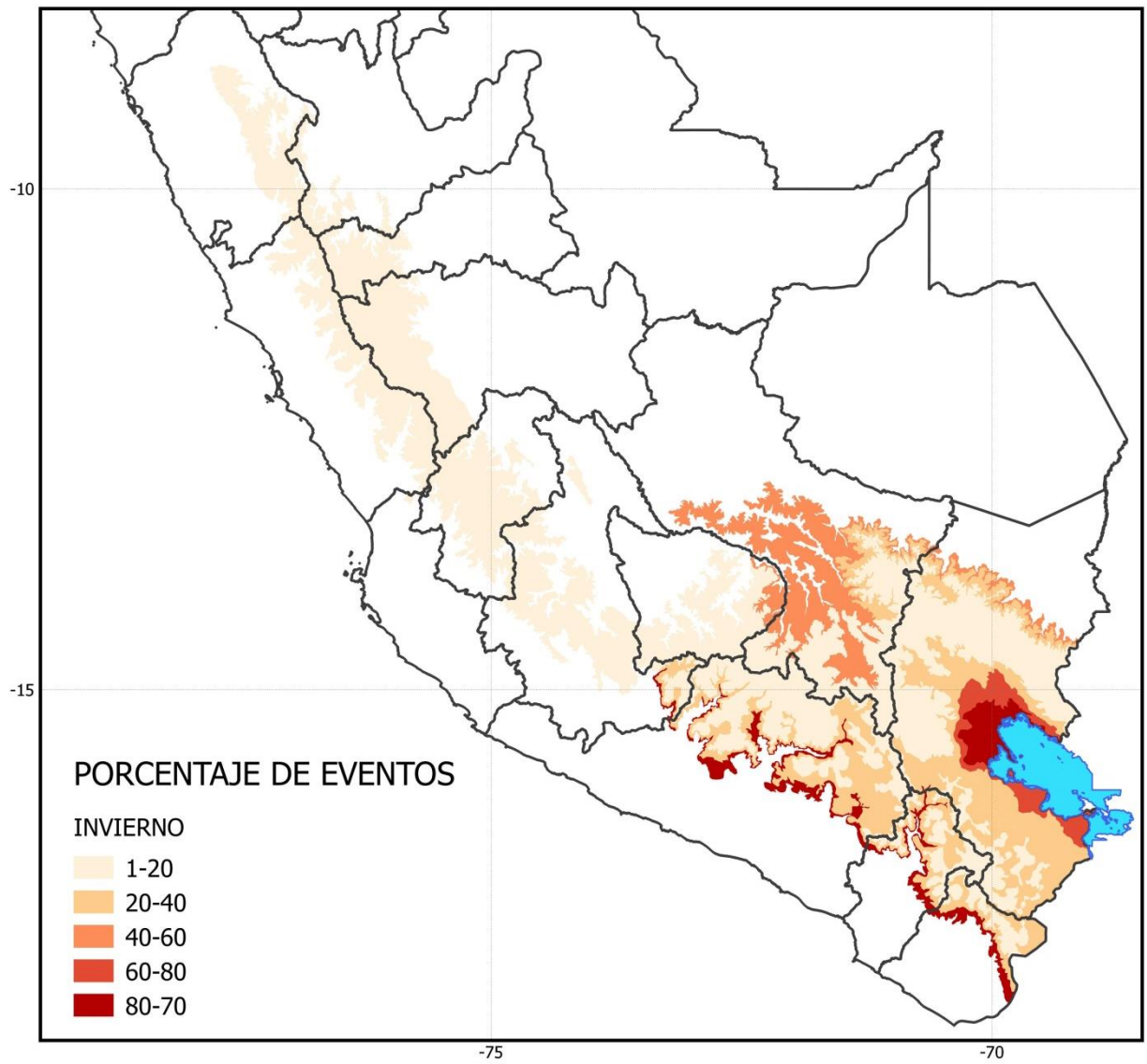


Figura 23: Mapa frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de invierno.

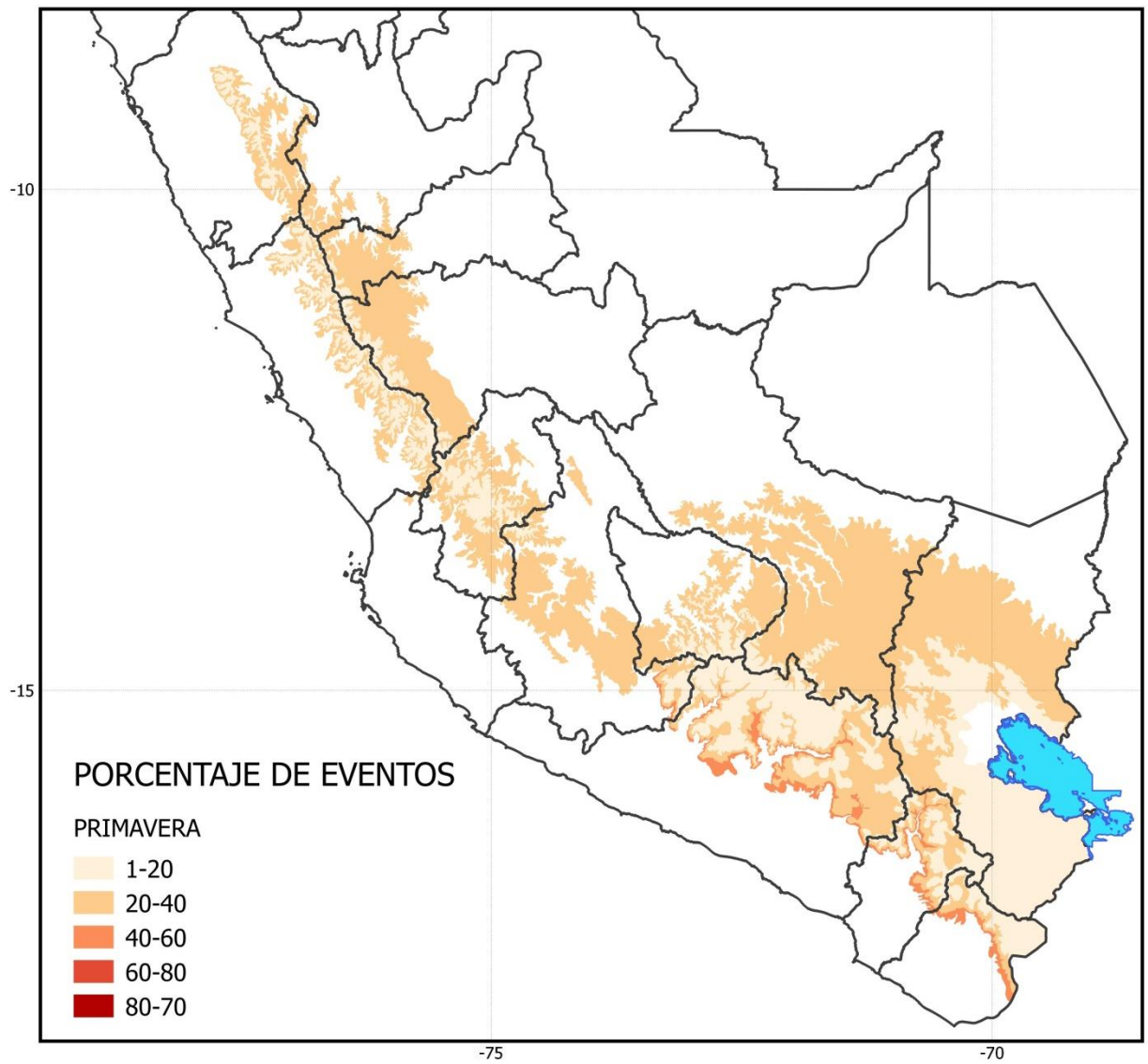


Figura 24: Mapa de frecuencia del número de eventos de nevadas totales en la estación de primavera

d. Comportamiento “climatológico” anual y mensual

En el conteo anual de los eventos de nevadas, se observó que existen años con mayor frecuencia de nevadas que otros, como por ejemplo el 2008, 2009, 2011 y 2012 con un valor mínimo en el 2010 y 2013. La zona que presentó mayor influencia en el conteo es el centro debido al mayor número de eventos de nevadas que presenta, siendo superior al 50% de los eventos.

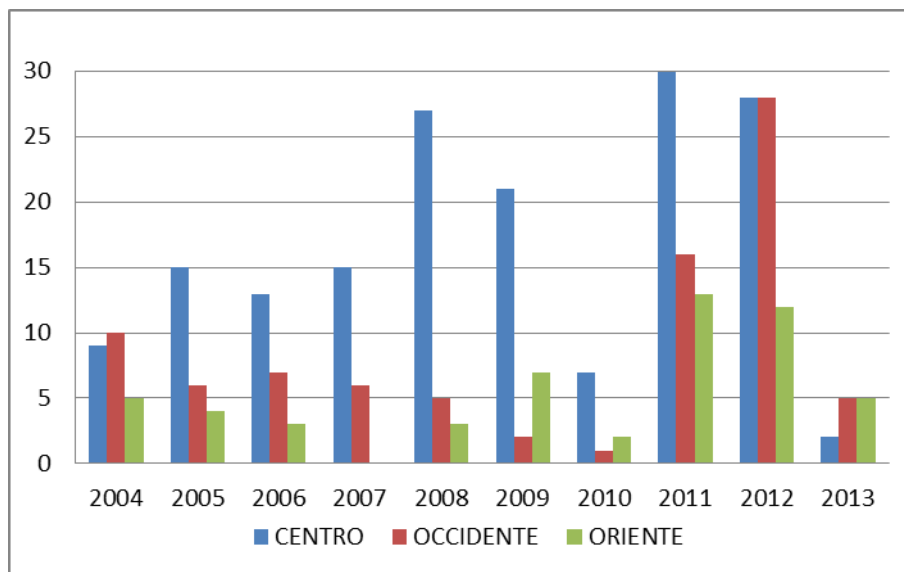


Figura 25: Número total de nevadas anuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR)

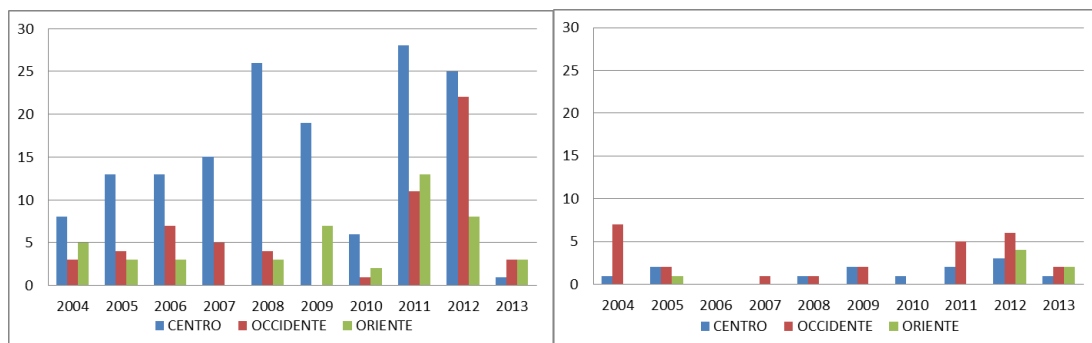


Figura 26: Número total de nevadas anuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR) y cobertura. Ordinarias (izquierda) y generalizadas (derecha)

Al comparar la media móvil de los eventos de nevadas (obtenida en base al promedio del número de nevadas en el mes, el mes anterior y mes posterior) con el ONI, se encontró una relación entre el incremento de registro de nevadas y valores negativos del ONI relacionados con los eventos La Niña. Esto está relacionado con el enfriamiento a nivel global que se presenta en un fenómeno de La Niña y el mayor incremento de humedad hacia la Amazonía y Andes peruanos, ambos al ser factores fundamentales para la generación de nevadas, favorecieron el incremento de su frecuencia. Sin embargo, es importante mencionar que, al presentar mayor frecuencia, no necesariamente significa que las nevadas fueron más intensas, ya que no se contó con mediciones de altura de nieve para poder clasificar por “intensidad”.

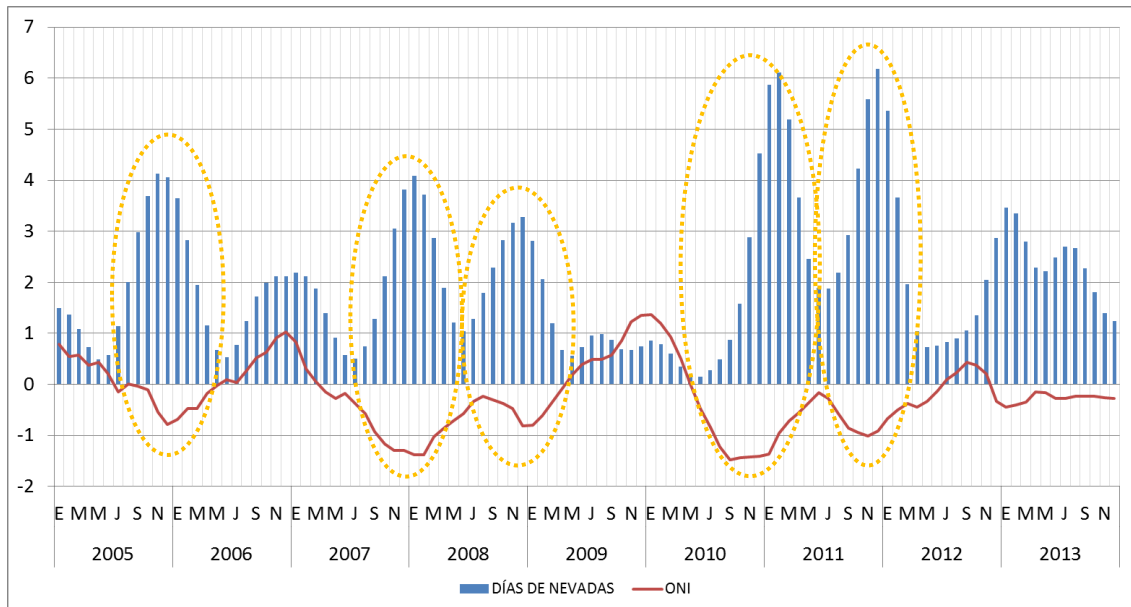


Figura 27: Comparación entre la media móvil de los eventos de nevadas totales mensuales (barras azules) e índice ONI (línea roja).

Al comparar los eventos ORD y GEN se observó que los años donde se presenta más frecuencia son el 2008, 2009, 2011 y 2012 para el centro y 2004, 2011 y 2012 para el occidente. Ambos presentaron un incremento de eventos en el 2011 y 2012 reflejando las características del típico año frío y húmedo que caracteriza La Niña. Así mismo, se observa que los años 2006 y 2010 presentan una cantidad escasa de eventos, donde el ONI presenta valores positivos, reflejando el incremento en la temperatura que se presenta a nivel global.

En el conteo de eventos de nevadas mensuales, se observó que las nevadas siguen un comportamiento estacional de manera anual. Al analizar el total de eventos se pudo determinar que en el caso del CEN las nevadas suelen ser más frecuentes en los meses de verano, incrementándose en diciembre hasta el mes de marzo, los meses de junio y julio no se presentan eventos de nevadas.

En el caso del SOC, se presentaron dos picos, uno de ellos en verano, en los meses de diciembre y enero, relacionados con los patrones de circulación que favorecen las precipitaciones en el periodo lluvioso; y presentó otro pico entre los meses de invierno de julio-setiembre, explicado por la presencia de vaguadas y DANAS, sistemas que se desplazan hacia el norte por el comportamiento estacional de la atmósfera, relacionado con la radiación solar (en el HS los sistemas se desplazan hacia el norte debido a la posición del sol, que favorece mayor radiación en el HN).

En SOR, igualmente se observaron dos picos, uno de ellos en verano, de diciembre a febrero y otro en el mes de setiembre con un ligero incremento en julio, esto se asoció al mayor número de eventos de friajes que se suelen presentarse en estos meses, ya que las características serán altos contenidos de humedad favoreciendo tormentas en la selva alta sur, logrando advectar humedad en niveles medios para la vertiente oriental.

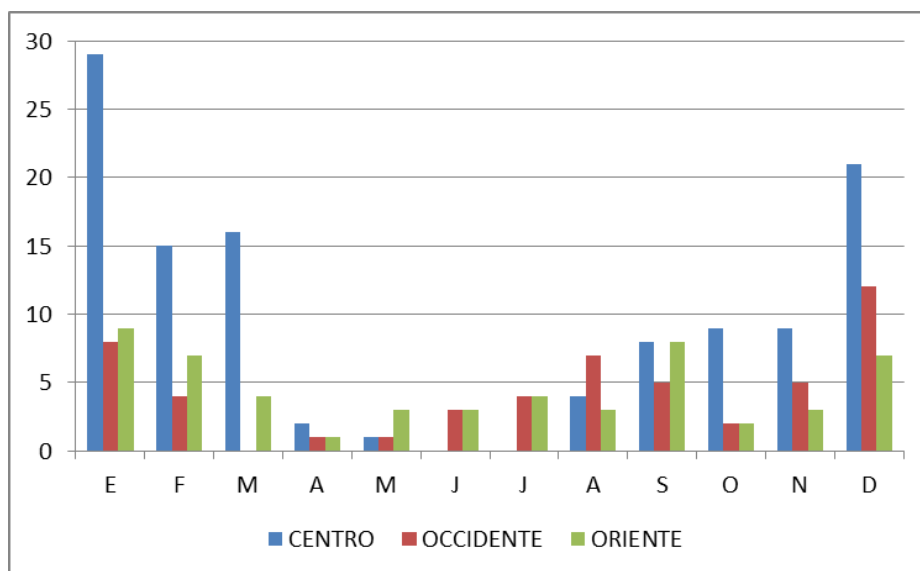


Figura 28: Número total de nevadas mensuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR)

Al desdoblar la información en los eventos ORD y GEN, se observó que para los eventos ORD las tres zonas presentaron el mismo comportamiento con la mayor frecuencia de eventos en verano, adicionando el mes de setiembre para el caso del área SOR. En el caso

de los eventos GEN, el centro presentó lo más frecuente en enero, mientras que el occidente tuvo dos picos, uno en agosto y otro en diciembre. En el caso de SOR, se obtuvo dos picos, en enero y julio-agosto. En base a esto, se determinó que los eventos GEN (los cuales se consideraron como “intensos” ya que abarcaron una gran área) son más frecuentes en los meses de invierno debido a los patrones sinópticos (ondas más profundas) que se aproximan con mayor frecuencia a los Andes peruanos.

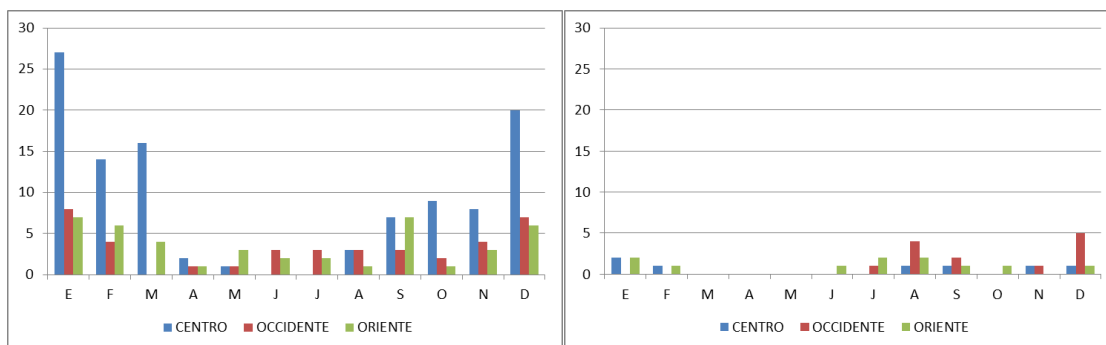


Figura 29: Número total de nevadas mensuales por zonas de estudio (CEN, SOC y SOR) y cobertura. Ordinarias (izquierda) y generalizadas (derecha)

4.1.3 Identificación de nevadas favorecidas por DANAS

En un primer conteo, se determinaron 66 días de nevadas generados por DANA; sin embargo, al validar la información con los registros de INDECI, medios de comunicación e imágenes de satélite, solo se comprobaron 50 eventos (días de nevadas generados por DANA). 16 de los eventos fueron eliminados debido a que no pudieron ser verificados. Del total de los eventos, 21 fueron identificados en el centro, 20 en el occidente sur, 9 en el oriente sur. De estos eventos 14 fueron GEN y 36 ORD.

Por ello, el 16% del total de eventos de nevadas presentado son explicados por la presencia de la DANA. (50 de los 307 eventos en total de nevadas en los Andes peruanos). En el caso de las nevadas ordinarias, el 14% del total es explicado por las DANA (36 de 261 eventos); mientras que, en las nevadas generalizadas, explicó el 30% (14 de 46 eventos). Lo más importante se reflejó en los eventos de nevadas GEN, el cual se logra explicar en más de la cuarta parte por la presencia de las DANAS.

Al analizar por separado las nevadas ORD y GEN, se observó que la mayoría de las ORD se registraron en los meses de verano y, en el caso de las GEN, se presentaron en los meses de invierno.

Adicional a esto, se observó que en los meses de mayo a agosto no se presentan nevadas por DANA en el centro (en las estaciones seleccionadas), en el caso del SOR, se registraron eventos significativos en agosto y setiembre; sin embargo, en SOC se observa que el mayor caso de eventos, incluso los más significativos, se presentan en los meses de invierno, en julio y agosto.

Al relacionar las áreas y las zonas, se determinó finalmente que las áreas más frecuentes de nevadas fueron la A1 y A2, especialmente en las nevadas generadas en el SOR y SOC.

En el caso del CEN, el área más frecuente es el A4 lo cual nos lleva a pensar que las DANAS no se relacionan directamente con los eventos de nevadas en el centro y el conteo obtenido en estos eventos probablemente sean coincidencias de presencia de DANAS con nevadas en el centro. Así mismo, en el caso de los eventos GEN, se observa que las áreas predominantes son el A1 y A2, especialmente para el SOC. Es importante mencionar que, al parecer, los eventos de DANA GEN se reflejan muy bien en la zona SOC a diferencia de las otras dos, percibiendo que esta fue la zona más afectada por las DANA.

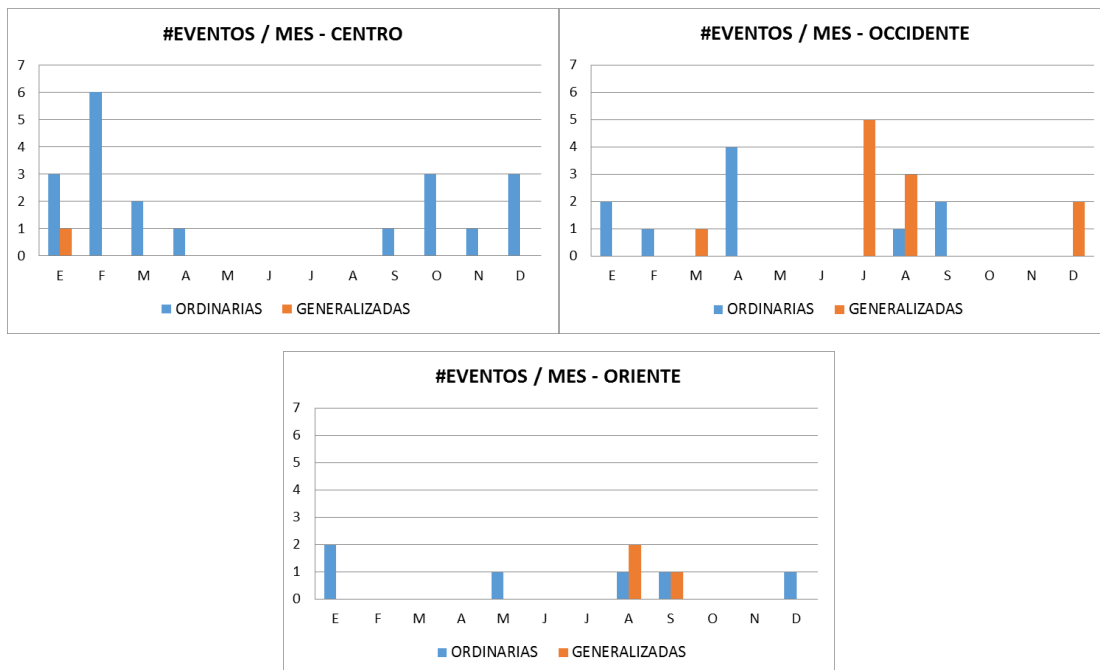


Figura 30: Eventos de nevadas favorecidos por DANA (mensuales) por zonas de estudio CEN (superior izquierda), SOC (superior derecha) y SOR (inferior)

4.2 Identificación de patrones de una DANA que apoye la generación de nevadas

Al realizar el ploteo de las DANA de todos los eventos, se observó que en la mayoría se presentaron las características de desarrollo de las DANA estudiadas por Bell y Bossart (1993) iniciando con la intensificación de una dorsal por advección cálida den niveles medios lo cual favoreció el jet en la parte delantera, apoyando la profundización de la vaguada y su posterior segregación. Asimismo, la mayoría de los eventos llegó a completar las cuatro etapas de una DANA (Nieto, 2005) siendo la etapa inicial, de segregación, madura y de decaimiento (también mencionado por Godoy, 2011).

En el promedio de eventos total, se utilizaron todas las fechas para obtener patrones sinópticos de las DANA. Se obtuvo un total de 9 salidas promediando los eventos por área y por zona (Ver Anexo 1). La mayoría de las salidas logró desarrollar la DANA a las 18Z.

La zona que obtuvo mejores resultados fue SOC, se promediaron un total de 20 eventos obteniendo la formación de una DANA en el área 2 al igual que en el promedio de los eventos GEN donde se utilizaron 10 días de muestra, donde se logró formar una DANA en el área 2, ligeramente hacia el norte del promedio total.

En el caso de los promedios para los eventos en CEN, se obtuvo una vaguada con eje NW-SE entre los 20°S – 35°S sin presencia de vorticidad potencial, esto es debido a la presencia aleatoria del núcleo de la DANA. En el caso de los eventos GEN, solo fueron dos, obteniendo un promedio en el área central perteneciendo más al área 4. En el caso del oriente, se obtuvieron vaguadas profundas llegando hasta los 15°S en el caso de las totales y las ORD.

Para determinar los patrones finales, se plotearon todas las DANA agrupando los sistemas que poseen similar configuración. Se obtuvieron un total de 4 patrones que explicaron el 60% de los casos obtenidos de nevadas favorecidas por DANA. (Ver cuadro 3)

El patrón 1 es el más significativo, el cual explicó en mayor porcentaje los eventos de nevadas generados en la sierra occidental sur (SOC) con un total de 35%. Se expuso la configuración con dos días de anterioridad, obteniendo una vaguada profundizada por la intensificación de la dorsal, con un posterior segregamiento de la DANA logrando ubicarse en los 20°S, muy cercano a Perú (figura 31).

Tabla 03: Número de eventos por patrones de DANA identificados que favorecen los eventos de nevadas (superior) y porcentajes (inferior)

Patrón	Centro	Occidente	Oriente	Total
	(21)	(20)	(9)	(50)
P1	-	7	1	8
P2	1	4	2	7
P3	5	3	0	8
P4	7	0	0	7

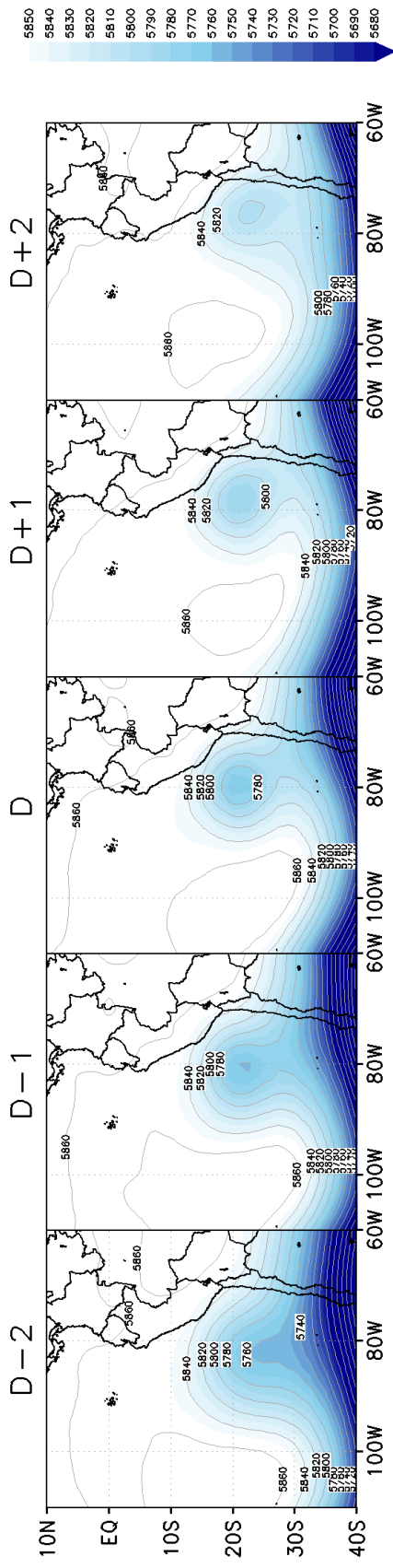
Patrón	Centro	Occidente	Oriente	Total
P1	-	35%	11%	16%
P2	4%	20%	22%	14%
P3	23%	15%	0%	16%
P4	33%	0%	0%	14%

El patrón 2, reflejó una vaguada profunda extendida hasta los 15°S con una DANA cerrada en los 25°S, en las costas de Chile. Este sistema no presentó el jet muy intenso por lo que no logró profundizar la vaguada hasta segregarla en latitudes menores a los 20°S (figura 31).

El tercer patrón está relacionado con las DANA formadas en las áreas A1 y A2; sin embargo, en la obtención del patrón no logra marcarse significativamente debido a la variación de la posición del núcleo en los diferentes casos (figura 32)

El patrón 4, es un patrón poco coherente, se determinó en base a los sistemas cerrados formados en verano mostrando su configuración en el A3 o A4 (figura 32). Este patrón estuvo asociado con las nevadas en el centro, por lo que podemos inferir que no es necesario tener una DANA para que se presenten nevadas en la sierra central (zona CEN). Así mismo, es necesario que en el Pacífico los flujos se encuentren debilitados para que la extensión de la Alta de Bolivia y su reflejo en niveles medios pueda encargarse de bombear humedad desde la cuenca Amazónica a los Andes centrales (Garreaud, 2009)

CIRCULACIÓN 1



CIRCULACIÓN 2

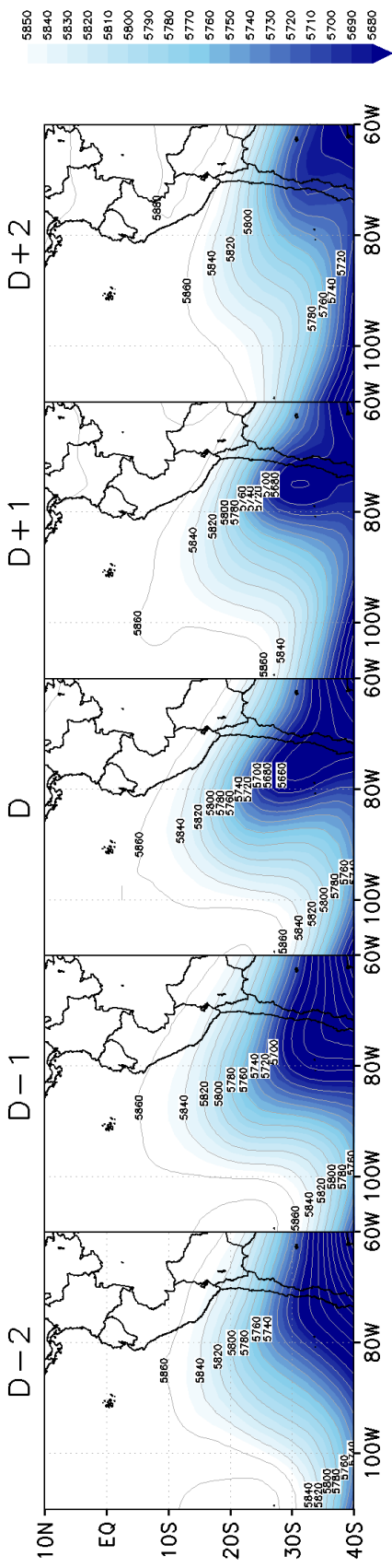


Figura 31: Patrón atmosférico (1: superior, 2: inferior) que favorece las nevadas en los Andes en base a la altura geopotencial promedio de los eventos.

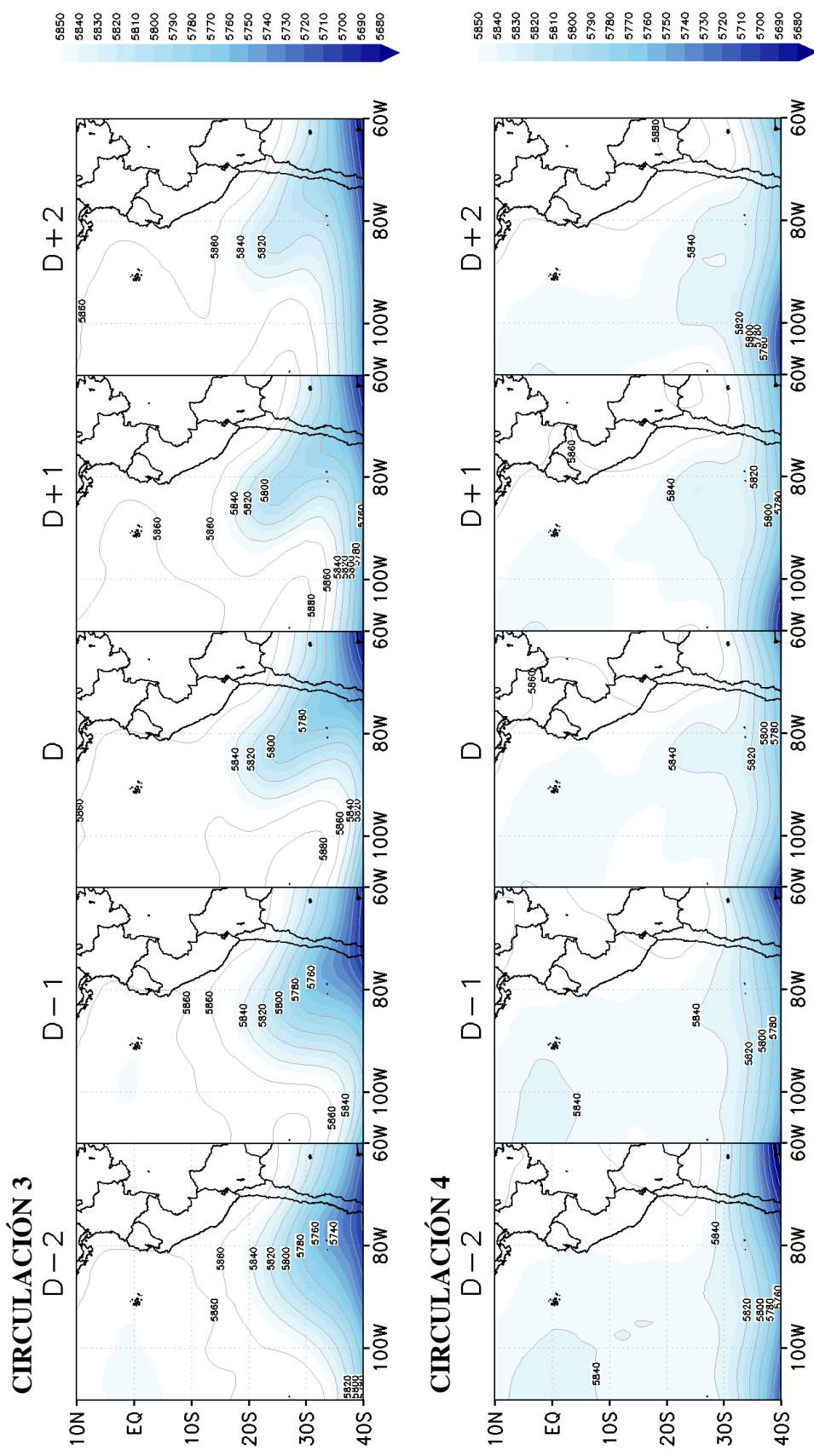


Figura 32: Patrón atmosférico (3: superior, 4: inferior) que favorece las nevadas en los Andes en base a la altura geopotencial promedio de los eventos.

4.3 Identificación de circulaciones que favorecen la generación de nevadas

4.3.1 Circulación promedio para la generación de nevadas por zonas en los Andes peruanos

Para la identificación de otras circulaciones que favorecen la presencia de nevadas, se tomaron en consideración dos elementos importantes para las precipitaciones: el viento y la humedad. Estas variables fueron analizadas en niveles altos, medios y bajos para determinar si la interacción espacial es importante en la generación de nevadas. Otro punto a analizar fueron los niveles clave para estas variables, en los cuales deben presentarse para desarrollar eventos de nevadas ordinarias o generalizadas.

Para un primer análisis, se graficó los promedios de viento y relación de mezcla de todos los eventos por zonas (CEN, SOC y SOR) y por niveles, con lo cual se reflejaron características similares de la circulación atmosférica.

En el caso de los eventos CEN, en niveles altos se obtuvo una configuración muy similar a la de verano (anexo 1), con la presencia de la Alta de Bolivia (AB) asociada a la Vaguada del Noreste de Brasil (VNB) con la zona divergente en gran parte de Perú. Por la zona sur, se asoció una onda corta relacionada con una vaguada aproximándose, lo cual genera el incremento del gradiente (al interactuar con la AB) favoreciendo los flujos del noroeste en los 75°W.

En niveles medios, se reflejó una circulación antihoraria advectando humedad desde la cuenca Amazónica hacia los Andes peruanos. También se encontró asociados flujos del norte en los 60°W lo cual favorecieron la entrada de humedad desde la zona tropical. Este sistema se encontró asociado con la presencia de una vaguada (relacionada con las DANA) la cual apoyó con la advección de humedad en los Andes ya que favoreció el giro en los 10°S logrando canalizar la humedad a través de los andes y en ambas vertientes.

En niveles bajos, se mostraron altos contenidos de relación de mezcla debido a la estacionalidad (la mayoría de eventos fueron registrados en verano), también se presentó el reflejo del LLJ el cual advectó humedad desde la Amazonía y el Atlántico en niveles bajos. (Figura 33)

En los eventos SOC, se evidenció la presencia de una vaguada con eje NE-SW en niveles altos lo cual posicionó la parte delantera del sistema sobre Perú, Chile y parte de Argentina. Esto fue sinónimo de la entrada de aire frío en niveles altos.

En niveles medios se encontró interactuando una circulación antihoraria en el sur de Brasil con la DANA en los 25°S en promedio. La circulación antihoraria fue advectando humedad hacia el sur, paralelo a los Andes; así como, hacia la vertiente occidental debido a la rotación presentada en los 15°S la cual favoreció la advección de humedad de la Amazonía canalizada por el Pacífico. Esta canalización fue debido al incremento del gradiente formado por la cercanía de ambos sistemas logrando generar flujos del noroeste e incrementando las velocidades.

En niveles bajos, lo más resaltante fue el aflojamiento de los sures en la zona costera, incluso con la presencia de flujos del norte, esto es debido a la presencia de la DANA en niveles altos, lo cual logró advectar vorticidad relativa negativa hacia niveles bajos generando un debilitamiento en el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) en ese sector (figura 34).

Para los eventos SOR, se presentaron características similares que en los eventos SOC, con la diferencia del desplazamiento de las circulaciones hacia el este.

Así mismo, en niveles bajos presentó el ingreso de un sistema por el sur de Sudamérica disminuyendo la relación de mezcla y favoreciendo los flujos del sur (figura 35).

En general, al promediar la humedad relativa y el viento en los diferentes niveles isobáricos, en gran parte de las salidas se observó la presencia de una circulación antihoraria en los niveles medios y altos. La posición de esta circulación antihoraria se mantuvo entre el límite de Bolivia y Brasil oscilando entre los 10°-20°S y 65°-45°W. En niveles altos, el núcleo de la circulación se posicionó más hacia el noroeste, cercanos al norte y este de Bolivia, en niveles medios se encontró, con mayor frecuencia, al este del límite de Bolivia – Paraguay (20°S – 50°W) y en niveles medios – bajos se presentó desplazado hacia el sureste cercano al sur de Brasil (20°-45°W). Las diferentes posiciones de los núcleos sugirieron la presencia de un sistema baroclínico que se encontró cuasi-estacionaria por un periodo prolongado de tiempo.

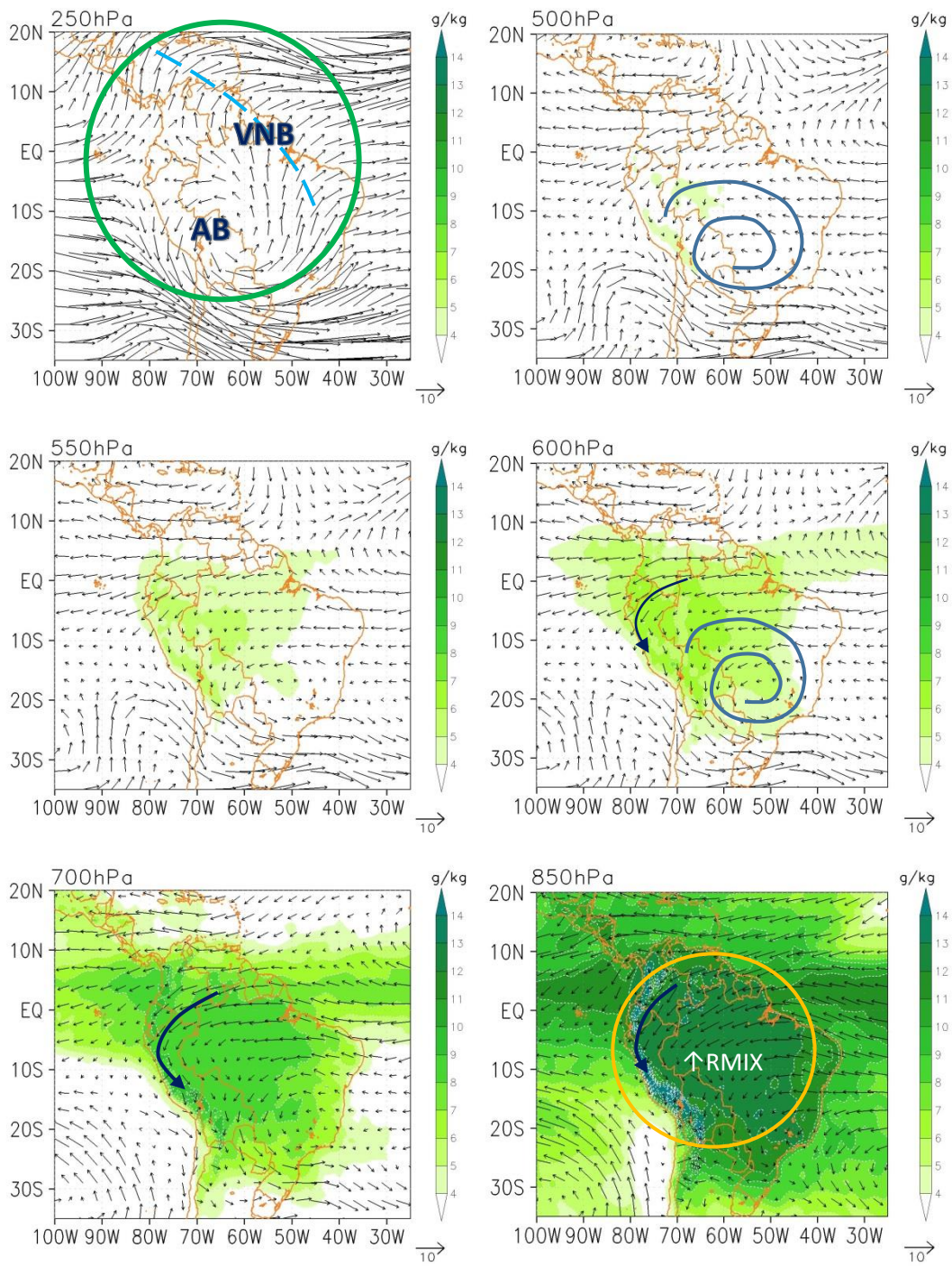


Figura 33: Promedio de viento y relación de mezcla de los eventos de nevadas en el centro (CEN)

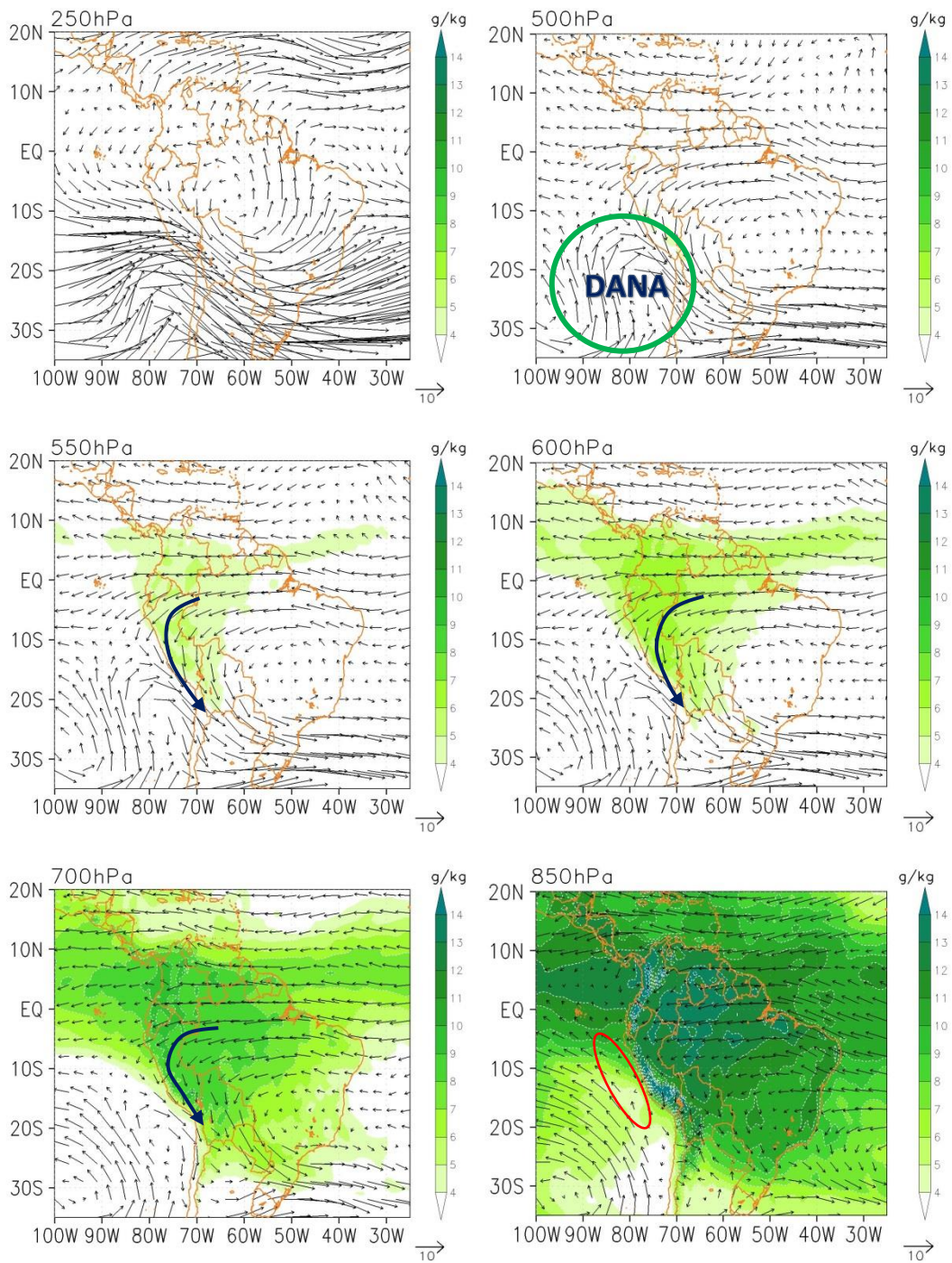


Figura 34: Promedio de viento y relación de mezcla de los eventos de nevadas en el sur occidental (SOC)

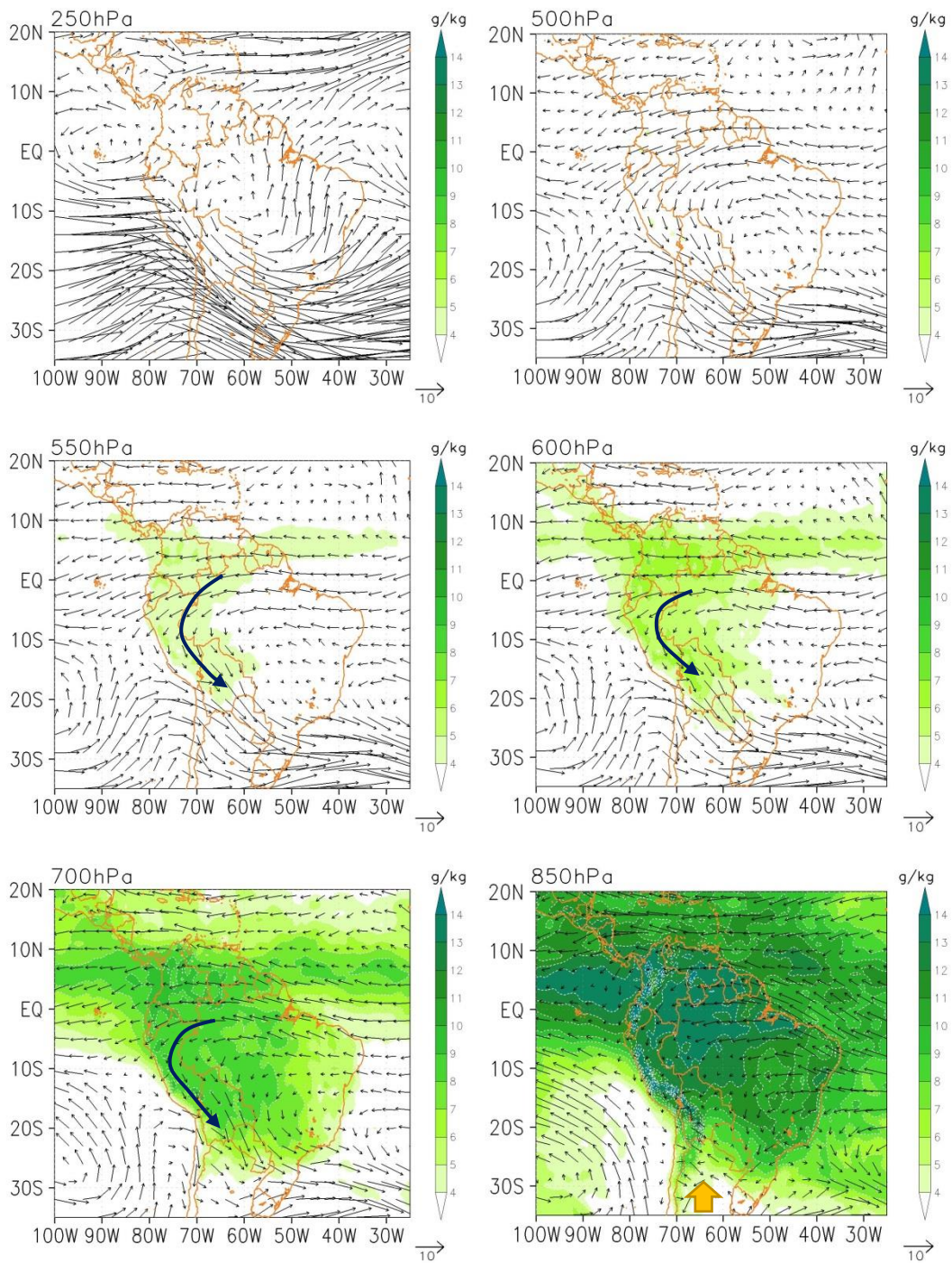


Figura 35: Promedio de viento y relación de mezcla de los eventos de nevadas en el sur oriental (SOR)

4.3.2 Anomalías de temperatura y humedad

Al observar las anomalías de altura geopotencial y temperaturas (anexo 6) de los eventos en los niveles altos y medios de la atmósfera (700 – 200 hPa), se identificaron fechas que presentaron anomalías negativas en gran parte del área de estudio, evidenciando un enfriamiento a nivel global. Estas fechas correspondieron a los años 2007, 2008, 2010 y 2011, los cuales corresponden a los años con el ICEN negativo, caracterizándose como años La Niña.

Se realizó un gráfico temporal de la humedad relativa en el nivel de 500 hPa (niveles medios) en el periodo de estudio, dejando en evidencia el incremento de humedad en los años La Niña y coincidiendo con las fechas con mayor frecuencia de nevadas. Asimismo, la humedad en el 2011 (Niña moderada) logra desplazarse hasta los 20°S llegando hasta latitudes extratropicales (figura 36).

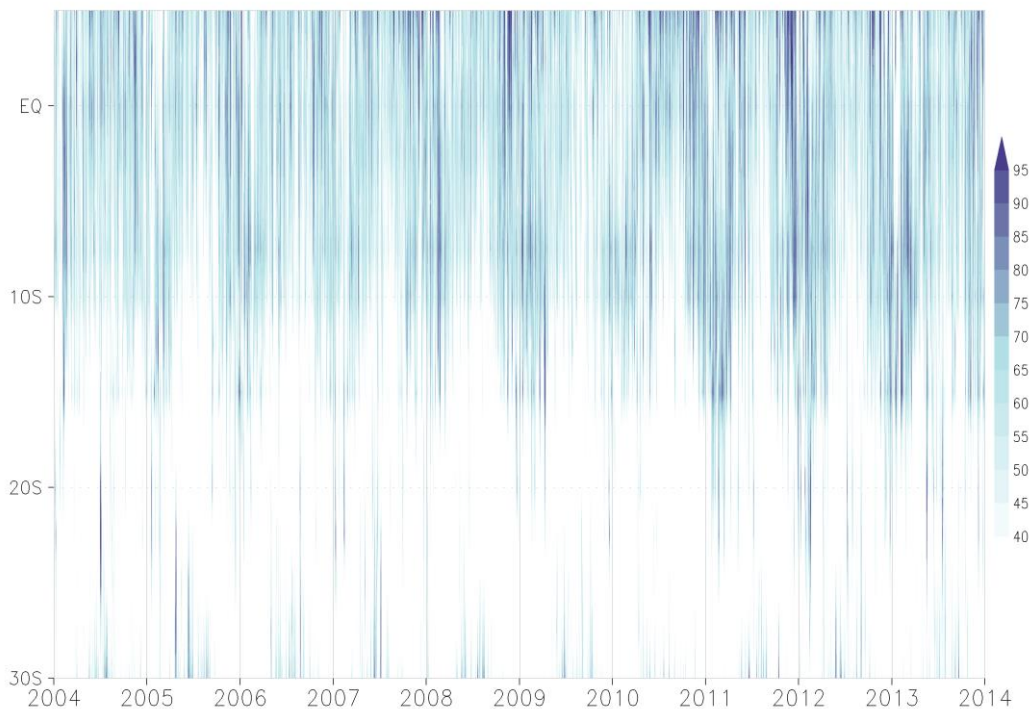


Figura 36: Gráfico temporal del porcentaje de humedad promedio desde los 70°W a 80°W

En algunas fechas se observaron anomalías positivas de temperatura (anexo 6) en niveles altos (200, 300 hPa), debido a la intrusión del aire estratosférico lo cual generó contaminación por ozono.

Analizando el agua precipitable, se determinó una zona con anomalías positivas en gran parte de los eventos SOC (anexo 7). Se observó una piscina con anomalías positivas en los 20°S – 72°W (cercano al límite entre Perú y Chile). Esto es debido al aflojamiento de viento del sur en niveles bajos que se presentó con el desarrollo de una DANA (figura 34). Debido a la advección vertical de la vorticidad, el APS se irá volviendo menos positivo disminuyendo sus valores y desintensificando los flujos del sur, en la que, en algunos casos, logró formar un sistema de baja presión convirtiendo la DANA en una baja dinámica. Al desintensificarse los sures, la baja presión da lugar al ingreso de nortes, provenientes de la zona tropical permitiendo su desplazamiento a lo largo del litoral costero, resultando en el incremento de agua precipitable. Esto puede evidenciarse con la anomalía de viento en niveles bajos (700 – 850 hPa) los cuales predominaron del norte debido a la presencia de un sistema horario en el Pacífico.

Además, en los eventos SOR (anexo 8), más del 50% presentó anomalías negativas de agua precipitable en el sur de Sudamérica, específicamente sobre Argentina y Paraguay. Esto es reflejo del ingreso de flujos del sur los cuales irán desplazándose hacia el noroeste canalizándose por los Andes. En la anomalía de viento también se logró observar los flujos del sur en el sur de Sudamérica, sobre Bolivia, Paraguay, norte de Argentina.

4.3.3 Circulaciones favorables para las nevadas en los Andes

En base a la identificación de eventos, se determinaron tres patrones significativos, dos en niveles medios y uno en niveles bajos, que explicaron el 46% de los casos. El primero y tercero explicó el 16%; mientras que, el segundo, 14%. Los tres patrones se asociaron con el transporte de humedad desde la Amazonía, zona tropical y/o Atlántico hacia los Andes.

Tabla 04: Número de eventos por patrones identificados que favorecen los eventos de nevadas (superior) y porcentajes (inferior)

Patrón	Centro	Occidente	Oriente	Total
	(21)	(20)	(9)	(50)
P1	4	12	3	19
P2	8	1	1	10
P3	9	2	0	11

Patrón	Centro	Occidente	Oriente	Total
P1	19%	60%	38%	16%
P2	38%	5%	20%	14%
P3	43%	10%	22%	16%

El primer patrón es propio de las nevadas SOC, explicando el 60% de estos eventos. Consistió en una circulación antihoraria en niveles medios con núcleo en el sur de Brasil, favoreciendo la advección de humedad desde la Amazonía y el Atlántico hacia el norte de Perú. Este sistema se encontró asociado a la DANA, la cual se reflejó como una circulación horaria generando flujos del noroeste en los 20°S – 75°W. La DANA fue la que advectó aire frío, debido a su estructura, en niveles medios. Debido a la interacción de estos dos sistemas, la circulación antihoraria tendrá un giro en los 10°S – 75°W por su proximidad a la DANA, lo cual fue aumentando el gradiente térmico y favoreció el incremento en las velocidades de viento. Esto fue lo que ayudó a canalizar la advección de humedad a los Andes por la zona del Pacífico. Primero, la humedad se dirige hacia el oeste en el norte de Perú, asociado con la circulación antihoraria, pero luego, por el gradiente que generó su interacción con la DANA, logró presentar flujos del noroeste (relacionándose con la rotación por el gradiente) lo cual favoreció nuevamente el ingreso de humedad a continente.

La DANA en este patrón se encontró en el A2, cercana a continente, reflejándose hasta niveles medios y desprendida de la vaguada. Logró afectar y generar las nevadas en su etapa de baja segregada.

Asimismo, en niveles medios se presentaron anomalías positivas de humedad específica las cuales es explicado por la advección que se generó por los flujos del noroeste en días previos.

En los 20°S – 75°W se presentaron altos contenidos de agua precipitable, reflejándose con las anomalías positivas, debido a los flujos en niveles bajos (700, 850 hPa). Como se

mencionó anteriormente, por la presencia de la DANA en niveles altos y medios, se logró advectar vorticidad negativa verticalmente, lo cual desintensificó el APS en esa zona disminuyendo los valores de presión, esto favoreció el debilitamiento de los flujos del sureste permitiendo el ingreso de los nortes paralelos al litoral costero los cuales advectaron aire húmedo y cálidos desde la zona tropical.

El patrón 1 explicó también el 38% de eventos en el oriente, esto es debido a la configuración del agua precipitable, reflejando anomalías negativas en el sur de Sudamérica, logrando formar una “U”. Este patrón se asoció con el ingreso de migratorias, las cuales se fueron desplazando por el sur de Sudamérica logrando llegar hasta el sur de Perú. Estas migratorias estuvieron asociadas a los “friajes” en la selva peruana. El APS logró acoplarse a un sistema de vaguada profunda, la cual, al continuar con su desplazamiento hacia el este, fue trasladando la alta migratoria hacia el continente, logrando tener una perturbación por la presencia de los Andes. Este sistema, si presenta una baja de bloqueo en el Atlántico, logra desplazarse hacia latitudes extratropicales llevando con ella una masa fría y seca, la cual, en algunas ocasiones, logra desplazarse hasta Colombia. Hacia la zona delantera de esta masa, se presenta una shear line, la cual irá favoreciendo al mal tiempo a medida que se va desplazando hacia el noroeste. Esta shear line, al llegar a la selva peruana, favoreció el transporte de humedad hacia la vertiente oriental (SOR) lo cual apoyó la generación de nevadas en esta zona. Ya que se encontrará inestable debido a la aproximación de la DANA.

El segundo patrón identificado logró explicar el 38% de las nevadas en el centro (8 de 21). Se desarrolló en base a una circulación antihoraria en niveles altos asociada a una vaguada posicionada en Brasil; relacionándolo con las fechas de los eventos tomados en consideración, se pudo afirmar que se trató de un patrón de verano, presentando la AB, con núcleo en Bolivia, asociada con la VNB en niveles altos, patrón que es típico para las precipitaciones en los Andes peruanos. En el Pacífico, en los 20°S – 80°W se reflejó una onda como una vaguada en niveles inferiores. En niveles medios, se presentaron dos circulaciones antihorarias asociadas a la AB (reflejada con el núcleo en el sur de Bolivia) y a la zona divergente generada por la AB y la VNB (núcleo en el norte de Brasil). El sistema antihorario posicionado en Brasil es el encargado de canalizar la humedad hacia los Andes; sin embargo, solo canalizó hasta los Andes centrales debido a la presencia del otro sistema en el centro de Sudamérica. La otra circulación antihoraria, reflejo de la AB, fue la que frenó

la advección de humedad hasta el sur de los Andes. El incremento de humedad se vio reflejado en las anomalías positivas en el agua precipitable y la humedad específica.

El patrón 3 identificado, explicó el 43% de los eventos en el centro. Se ve expuesto exclusivamente por niveles bajos. Tomando en consideración lo mencionado por Garreaud (2009), se identificó la presencia del jet de bajos niveles. En niveles altos se observó nuevamente la presencia de la AB interactuando con la VNB, mientras que en niveles bajos (850 hPa) se presentó el low level jet (LLJ) conocido como el jet de bajos niveles, el cual se intensifica durante los meses de verano y es el encargado de transportar humedad hacia latitudes medias desde el Atlántico y El Caribe, inclusive con su zona de confluencia por velocidad en la zona central de Perú, siendo un indicador del transporte vertical de humedad en esta zona favoreciendo su llegada hacia los Andes centrales (CEN).

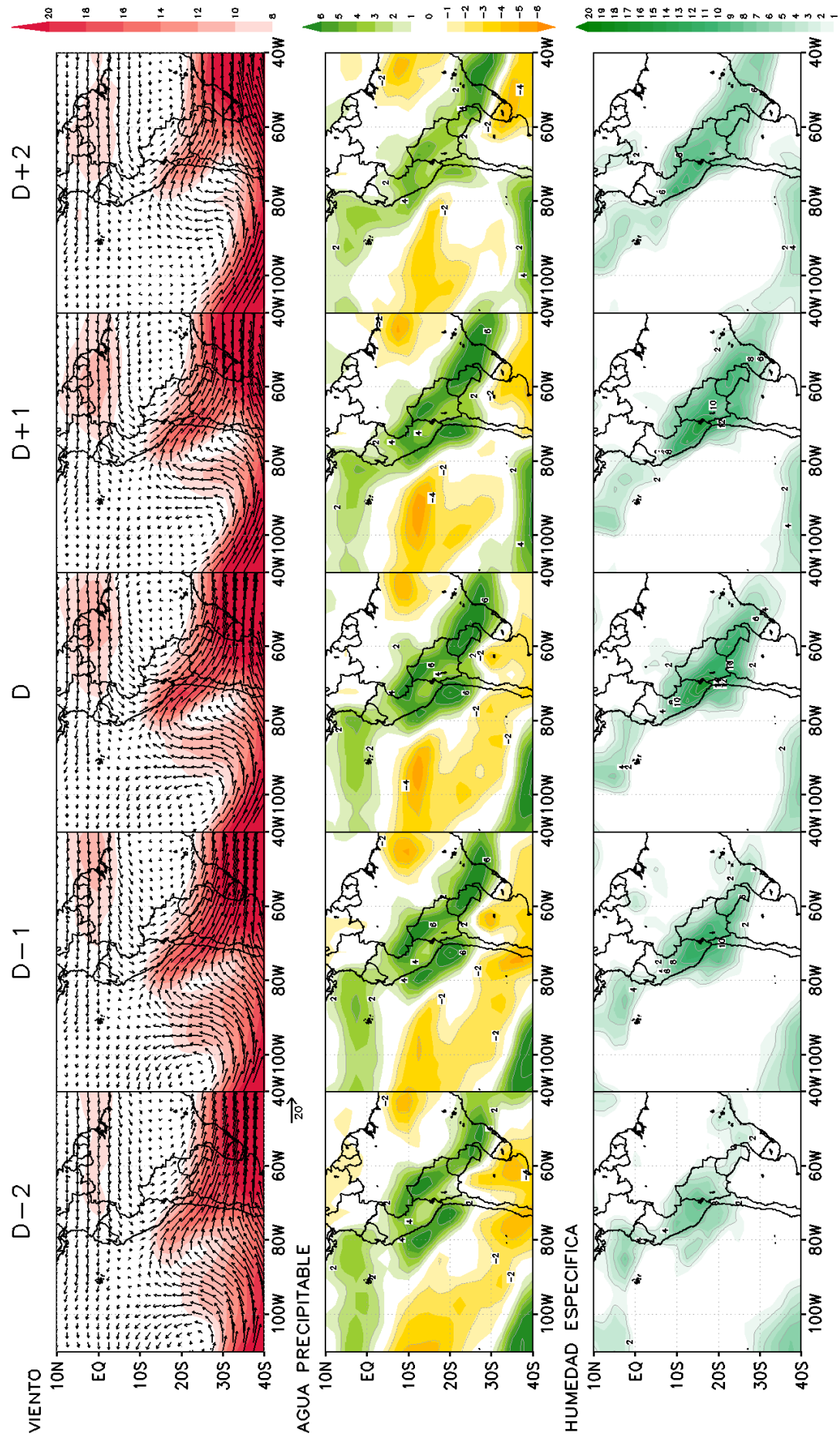


Figura 37: Patrón 1. Viento en 500 hPa (superior). Anomalías de agua precipitable (medio) Anomalía de humedad específica en 500 hPa (abajo)

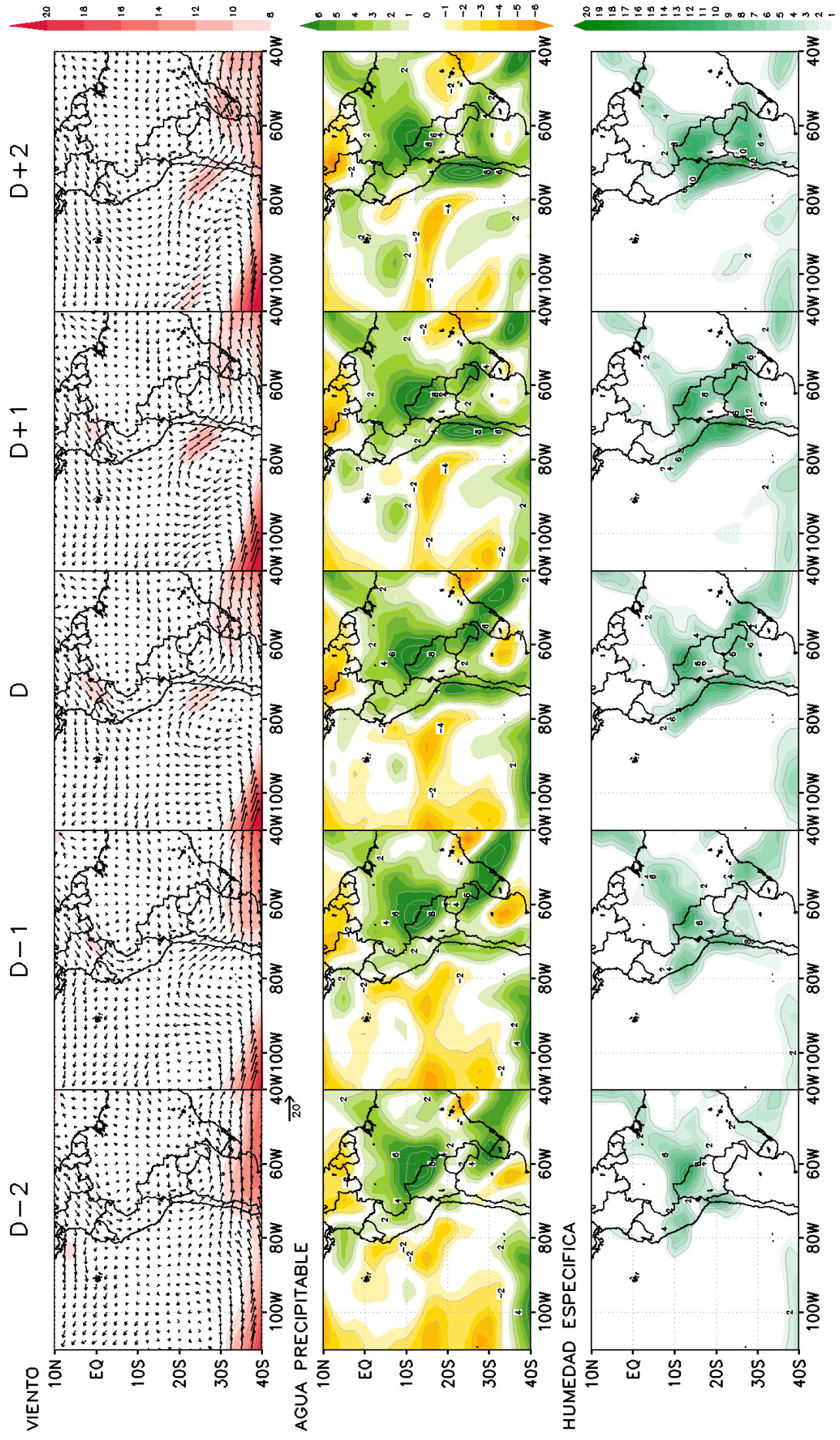


Figura 38: Patrón 2. Viento en 500 hPa (superior). Anomalías de agua precipitable (medio) Anomalía de humedad específica en 500 hPa (abajo)

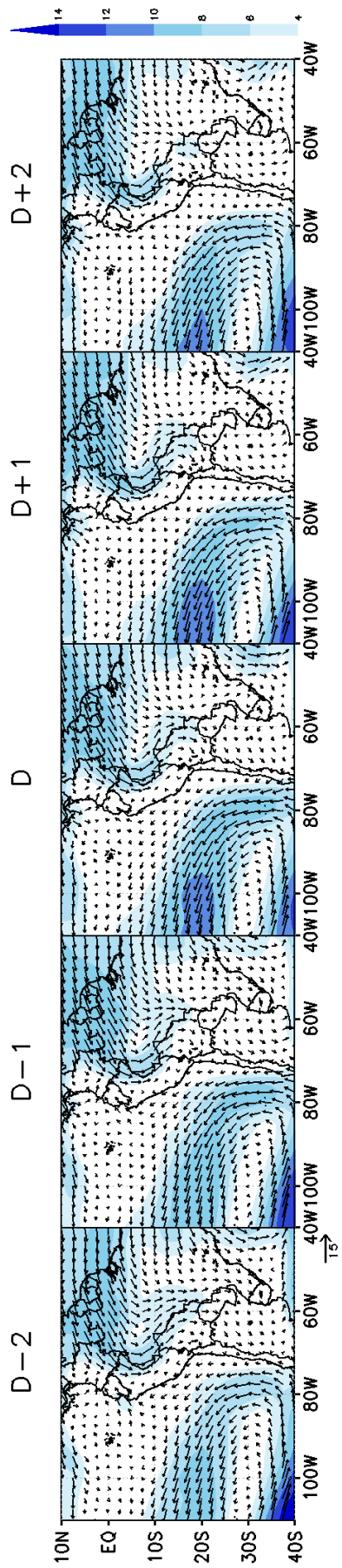


Figura 39: Patrón 3. Viento en 850 hPa

4.3.4 Modelo conceptual para la generación de nevadas en los Andes

a. Andes Centrales

El patrón característico para eventos generalizados de nevadas en los Andes centrales será: la configuración de la AB en niveles altos favoreciendo la divergencia. En niveles bajos y medios, presencia de humedad. Advección de humedad en niveles bajos por la presencia del LLJ.

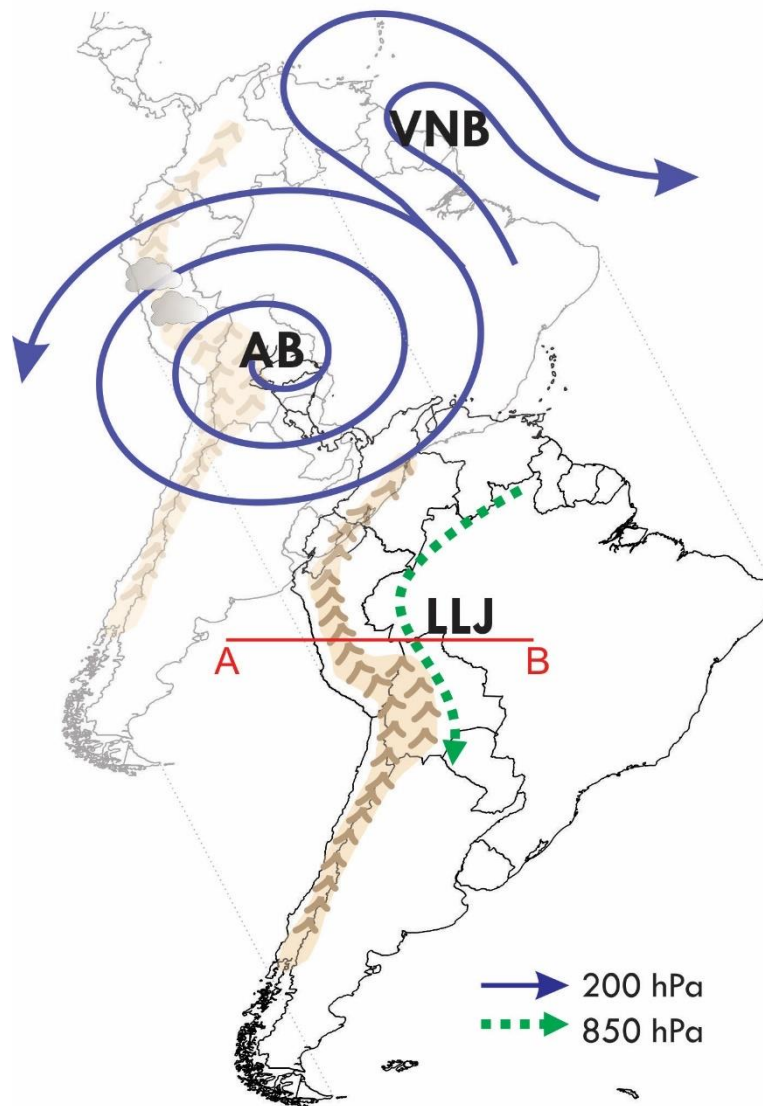


Figura 40: Modelo conceptual para nevadas en la sierra central. Niveles altos en color azul, niveles bajos en color verde.

FUENTE: Elaboración propia

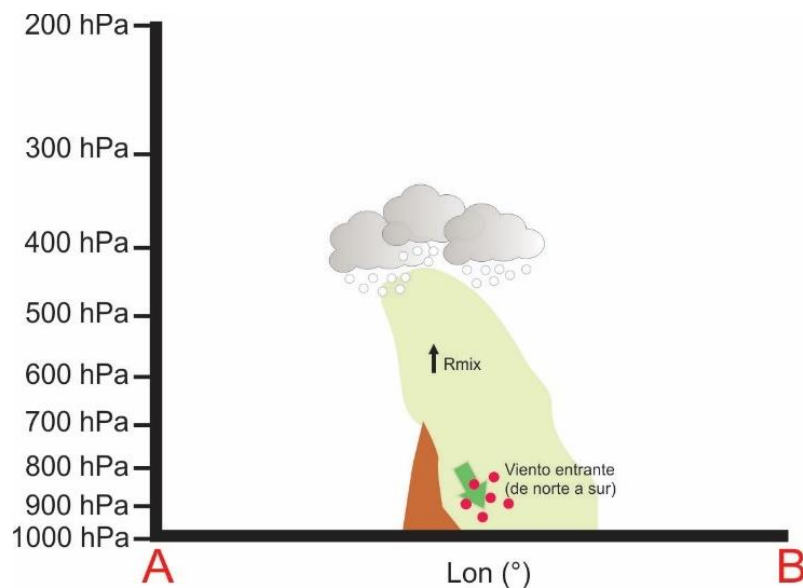


Figura 41: Perfil vertical favorable para nevadas en la sierra central. Alto contenido de relación de mezcla (verde) presencia de flujos del norte (Puntos rojos y flecha verde)

FUENTE: Elaboración propia

b. Andes Sudoccidentales

El patrón característico para las nevadas en la sierra sur occidental (SOC) es la presencia de una vaguada en altura asociada a una DANA y reflejada hasta niveles medios. Este sistema se encontrará interactuando con una circulación en niveles altos, la cual es la encargada de adveccionar humedad y canalizarla por los Andes peruanos. Debido a la DANA, se adveccionará aire frío que, al hacer contacto con la masa cálida y húmeda de la Amazonía, favorecerá la presencia de precipitaciones. Asimismo, las DANA se encuentran asociadas al jet en niveles altos, y en algunos casos, se dará intrusión de aire estratosférico generando contaminación por ozono.

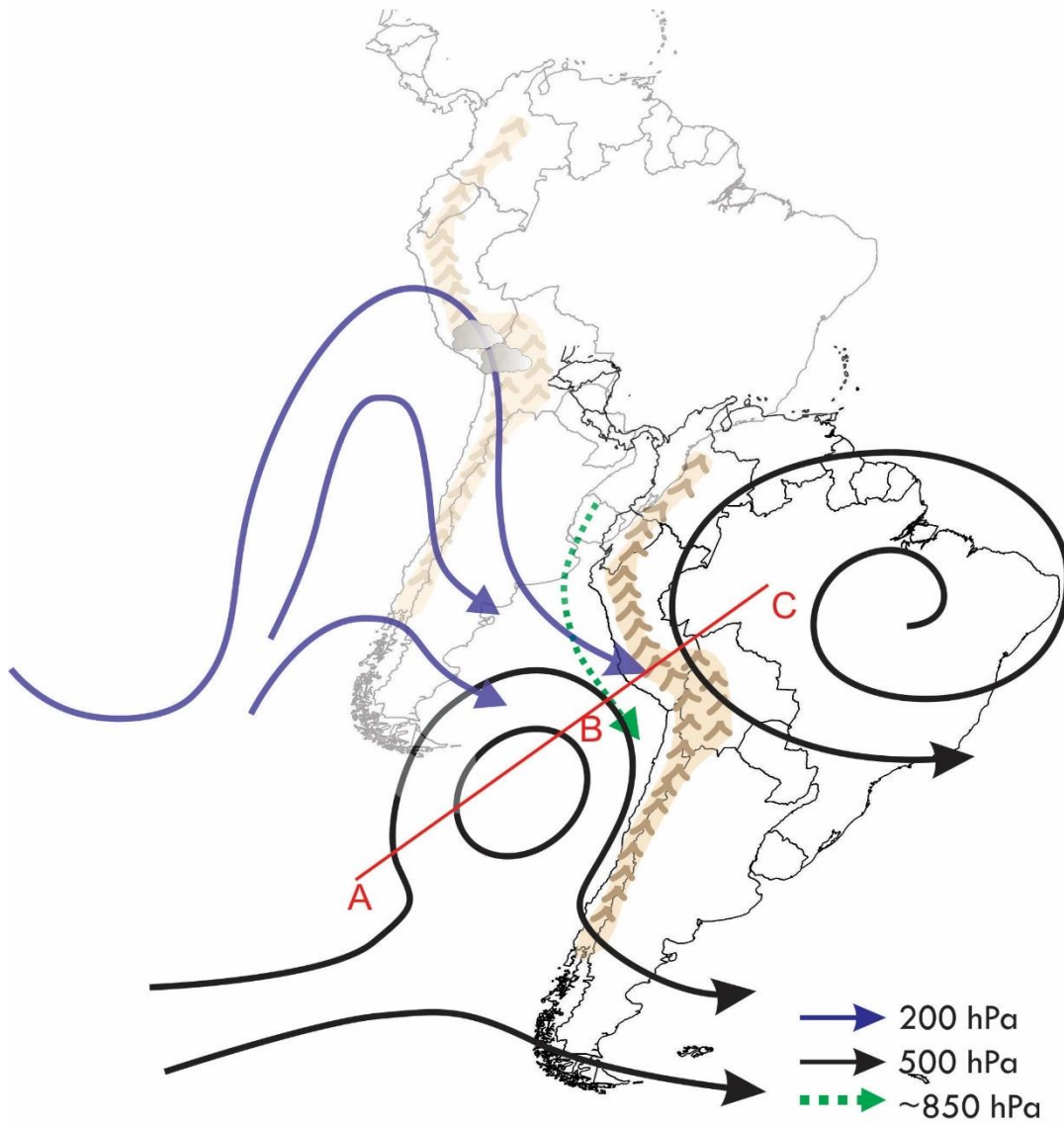


Figura 42: Modelo conceptual para nevadas en la sierra occidental sur. Niveles altos en color azul, niveles medios en color negro.

FUENTE: Elaboración propia

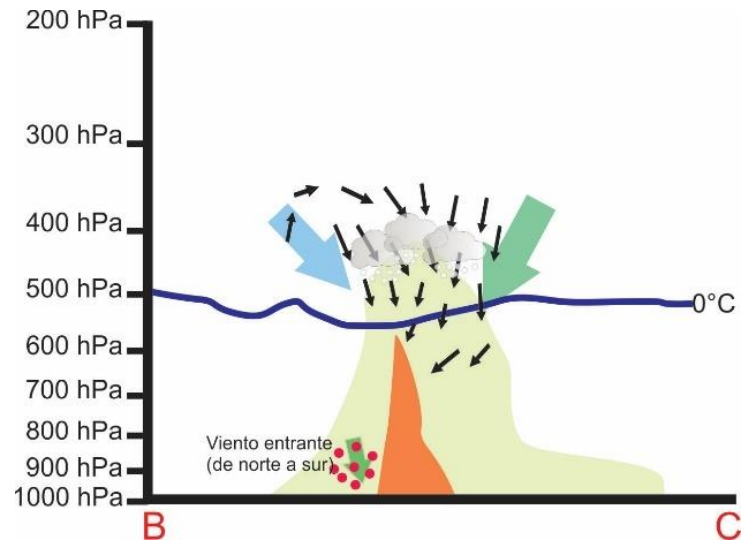


Figura 43: Perfil vertical favorable para nevadas en la sierra occidental sur. Alto contenido de relación de mezcla (verde) presencia de flujos del norte (Puntos rojos y flecha verde).

Masa fría del Pacífico (flecha verde) Masa húmeda de la Amazonía.

FUENTE: Elaboración propia

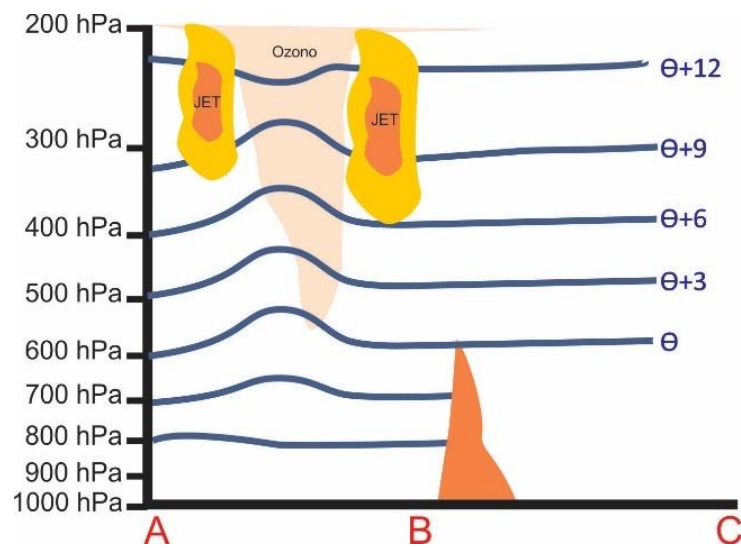


Figura 44: Perfil vertical de la DANA. Ingreso de aire estratosférico (ozono). Jet stream asociado a la DANA (viento en shaded, color amarillo y anaranjado). Temperatura potencial (líneas) indicando el núcleo frío en niveles altos – medios.

FUENTE: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

De la identificación de DANA y eventos de nevadas

- Las DANAS son más frecuentes en el área 3 (A3) de estudio, siendo la que se encuentra en latitudes medias y cercano a continente debido a la segregación más frecuente de sistemas en estas latitudes y la tendencia a permanecer más días debido al bloqueo de la cordillera.
- Cuando el ONI presenta anomalías positivas, las DANA tienden a desplazarse hacia el norte, llegando hasta latitudes tropicales y cercanos a los Andes peruanos.
- Las nevadas tienden a ser más frecuentes en la estación de verano, en especial en la sierra central; mientras que, en invierno, suelen ser más frecuentes en la sierra sur. Asimismo, las nevadas más generalizadas tienden a presentarse en los meses de invierno.
- Las nevadas serán más frecuentes en años La Niña debido a la disminución de temperaturas y a la mayor frecuencia de saturación de la atmósfera en los Andes.
- El nivel mínimo de nieve tiende a ser más bajo en los meses de invierno que en los de verano debido al comportamiento estacional de la temperatura. Incluso, en el evento más generalizado de nevada, logró bajar hasta los 3400 msnm en la sierra occidental sur.

De la determinación de patrones sinópticos de una DANA

- Las DANAS favorecen la generación de nevadas en la sierra sur, más no tienen una dependencia directa con las nevadas generadas en la sierra central.

- La DANA se debe encontrar en la etapa de segregación para generar nevadas en los Andes sureños.
- Se determinaron cuatro patrones que explican el 60% de las nevadas, siendo el cuarto patrón (figura 32), relacionado con las nevadas en la sierra central, poco significativo.
- El patrón mejor configurado es el primer patrón (figura 31), reflejando claramente la DANA totalmente segregada en el área 2 (A2) asociada al 35% de los casos de nevadas generadas en la sierra occidental sur (SOC)

De la identificación de circulaciones y patrones que favorecen las nevadas

- Las variables fundamentales para el análisis de nevadas son la humedad y el viento, las cuales serán advectadas desde el Atlántico, Amazonía y Caribe hacia los Andes peruanos. en especial en los niveles medios (500 – 600 hPa)
- La humedad advectada y canalizada a través de los Andes es desplazada por una circulación antihoraria en niveles medios con su núcleo en el sur de Brasil.
- Para las nevadas en la SOC, es necesaria la interacción de humedad proveniente de la Amazonía y la masa fría y seca advectada por la DANA en niveles medios.
- Para los eventos de nevadas en SOC, es necesaria la presencia de altos contenidos de agua precipitable, la cual será advectada en niveles bajos (700 – 850 hPa) por flujos del norte.
- La humedad es el principal factor para la presencia de nevadas en los Andes centrales. Esta podrá ser advectada por la circulación antihoraria de niveles medios o por el LLJ en niveles bajos.
- Los patrones asociados a nevadas en el CEN se asocian con patrones de verano, presentando en niveles altos la AB asociada con la VNB.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda promover el registro de las nevadas en el Perú ya que la información de ocurrencia es escasa, y más aún, el registro de sus acumulados. Debido a esta limitante, no se puede realizar estudios de intensidad de nevadas.
- En cuanto al análisis de los patrones de DANA, se recomienda tomar en consideración un periodo mayor (para una climatología es recomendado mínimo 30 años) para obtener resultados significativos. Asimismo, se recomienda cuantificar las DANA en base a su “periodo de vida” como la mayoría de autores, ya que en este estudio se trabajó por “día” debido a que la finalidad fue asociar los patrones a eventos de nevadas por zona.
- Se recomienda realizar un estudio donde se identifiquen todos los sistemas que favorecen las nevadas en los Andes peruanos, ya que en este trabajo solo se tomó en consideración uno, la DANA.
- Se recomienda realizar estudios de patrones de nevadas con otros modelos meteorológicos, como el europeo, WRF o ETA-SENAMHI para determinar si se mantiene la presencia y comportamiento de las circulaciones identificadas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahrens D. 2009. *Meteorology today: An introduction to weather, climate and environment*. 9 Ed. Brook/Cole Cengage Learning. 624 p.
- American Meteorological Society. *Meteorology Glossary* (en línea) 2015. Consultado 15 jun 2017. Disponible en <http://glossary.ametsoc.org>
- Barrett, B. 2009. Effect of the Andes cordillera on precipitation from midlatitude cold front. *Monthly Weather Review*. 137. 3092 – 3109.
- Barry, RG and Chorley RJ. 1998. *Atmosphere, weather and climate*. 7 Ed. Routledge. 433 p.
- Capel, José. 2000. La nieve y su distribución especial en la península Ibérica. *Nimbus*. 6 – 12.
- Campetella, C and Possia, N. 2007. Upper-level cut-off lows is Southern South America. *Meteorological Atmospheric Physics*. 96 – 181.
- Campetella, C and Possia, N. 2006. Upper-level cut-off lows is Southern South America: Preliminary Results. *Proceedings of 8 ISDHMO, Foz do Iguação, Brazil, April 14-28, INPE, 1709-1712*.
- FAO (2000). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000. Informe principal*. 468 p.
- Fuenzalida, HA; Sánchez, R and Garreaud, RD. 2005. A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research*. 110.

- García, J. 1994. Principios físicos de climatología. Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 244p.
- Garreaud, R. 1999. Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. American Meteorological Society. 901 – 921.
- Garreaud, R. 2000. Intraseasonal variability of moisture and rainfall over South American Altiplano. American Meteorological Society. 3337 – 3346.
- Garreaud, R. 2009. The Andes climate and weather. Advances in Geosciences. 22. 3 – 11.
- Garreaud, R; Aceituno, P. 2001. Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. Journal of climate. 14. 2779 – 2789.
- Garreaud, R and Fuenzalida H. 2006. The influence of the Andes on cutoff lows: A modeling study. Monthly Weather Review. 135. 1596 – 1612.
- Garreaud, R and Seluchi, M. 2003. Pronóstico de la convección en el altiplano Sud Americano empleando el modelo regional ETA/CPTEC. Meteorológica. 26. 25 – 38.
- Godoy, A; Possia, N, Campetella, C; Seluchi, C. 2009 Influence of the Andes over a cut-off low's life cycle. 9th ICSHMO Conference.
- Godoy, A; Campetella, C; Possia, N. 2011 Un caso de baja segregada en niveles altos en el sur de Sudamérica: Descripción del ciclo de vida y su relación con la precipitación. Revista Brasileira de Meteorología. V 26. N.3 491 – 502.
- Godoy, A; Vera, C, Campetella, C. 2012. Influencia de la circulación de gran escala en el desarrollo de un evento de baja segregada en el sur de Sudamérica. XI CONGREGMET.
- Holton, JR. 2004. An Introduction to dynamic meteorology. 4 ed. Academic Press. 535 p.

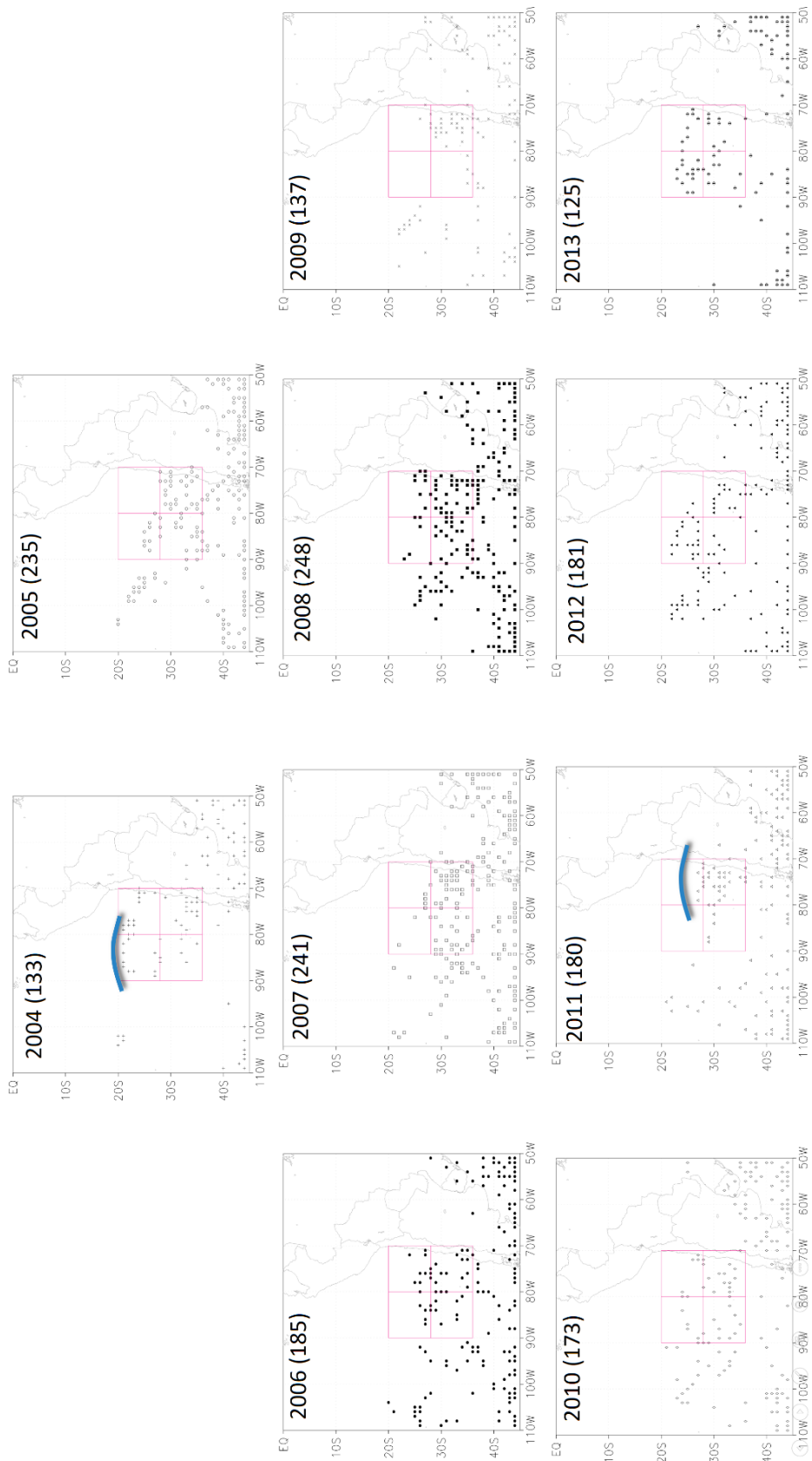
- Hoskins, BJ; McIntyre, ME and Robertson, W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Meteorological* 111(470):877-946.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. 2013. Compendio Estadístico del INDECI. 1 ed. 252 p.
- Lavado, W; Espinoza J. 2014. Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). *Revista Brasileira de Meteorología*. 29. N° 2. 171 – 182.
- Ledesma, JM. 2011. Principios de meteorología y climatología. 1 ed. Paraninfo. 552 p.
- Lenters, J and Cook, K. 1998. Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale circulation. *Monthly Weather Review*. 127. 409 – 431.
- Martín, F. Las gotas frías / DANAS. Ideas y conceptos básicos. Instituto Nacional de Meteorología. (En línea) 2003. http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/estudios/dana_ext.pdf
- Martin, J. 2006. *Mid-Latitude Atmospheric Dynamics*. Wiley. 324 p.
- Martin, L. 1994. Método para el cálculo de movimientos verticales sinópticos con propuesta de parametrización de forzamiento diatérmico. Tesis Doctor en CC Físicas. Madrid. España, Universidad Complutense de Madrid. 176 p.
- Mestanza, F. 1994. Posibles Causas de ocurrencia de nevadas en la sierra sur peruana durante Julio y Agosto de 1992. Tesis Ing. Meteorólogo. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 187 p.
- Mohor, K. 2014. Characteristics of precipitation features and anual rainfall during the TRMM Era in the Central Andes. *Journal of Climate*. 27. 3982 – 4001.

- Nieto, R; Gimeno, L; Torre, L de la; Ribera, P; Gallego, D; García-Herrera, R; García, JA; Nuñez, M; Redaño, A and Lorente, J. 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate* 18(16):3085-3103.
- Pizarro J and Montecinos A. Cutoff cyclones off the subtropical coast of Chile. 2000. 6th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. 278 – 279.
- Quispe, N and Avalos, G. 2006. Intense snowstorm in the southern mountains of Peru associated to the incursion of cut-off low-pressure systems at upper level. Proceedings of 8 ISDHMO, Foz do Iguaçó, Brazil, April 14-28, INPE, 1945-1948.
- Quispe, N. 2009. Estructura dinámica de una baja fría. *Revista peruana Geo-Atmosférica RPGA* (1), 125 – 133.
- Quispe, N. 2014. Evaluación climática de la depresión aislada en niveles altos (DANA's) sobre Sudamérica y océanos adyacentes y estudio de un caso en el Pacífico Oriental. Tesis Msc. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 151 p.
- Rau, P; Condom, T. 2010. Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña del Perú (1998 – 2007). *Revista Geo-atmosférica RPGA*. 16 – 29.
- Rondanelli, R; Gallardo, L and Garreaud RD. 2002. Rapid changes in ozone mixing ratios at Cerro Tololo (30°10'S, 70°48'W, 2200 m) in connection with cut-off lows and deep troughs. *Journal of Geophysical*. 107.
- Salaverry, J. 2006. Macro-ecología de los Andes peruanos. Instituto Francés de Estudios Andinos. 312 p.

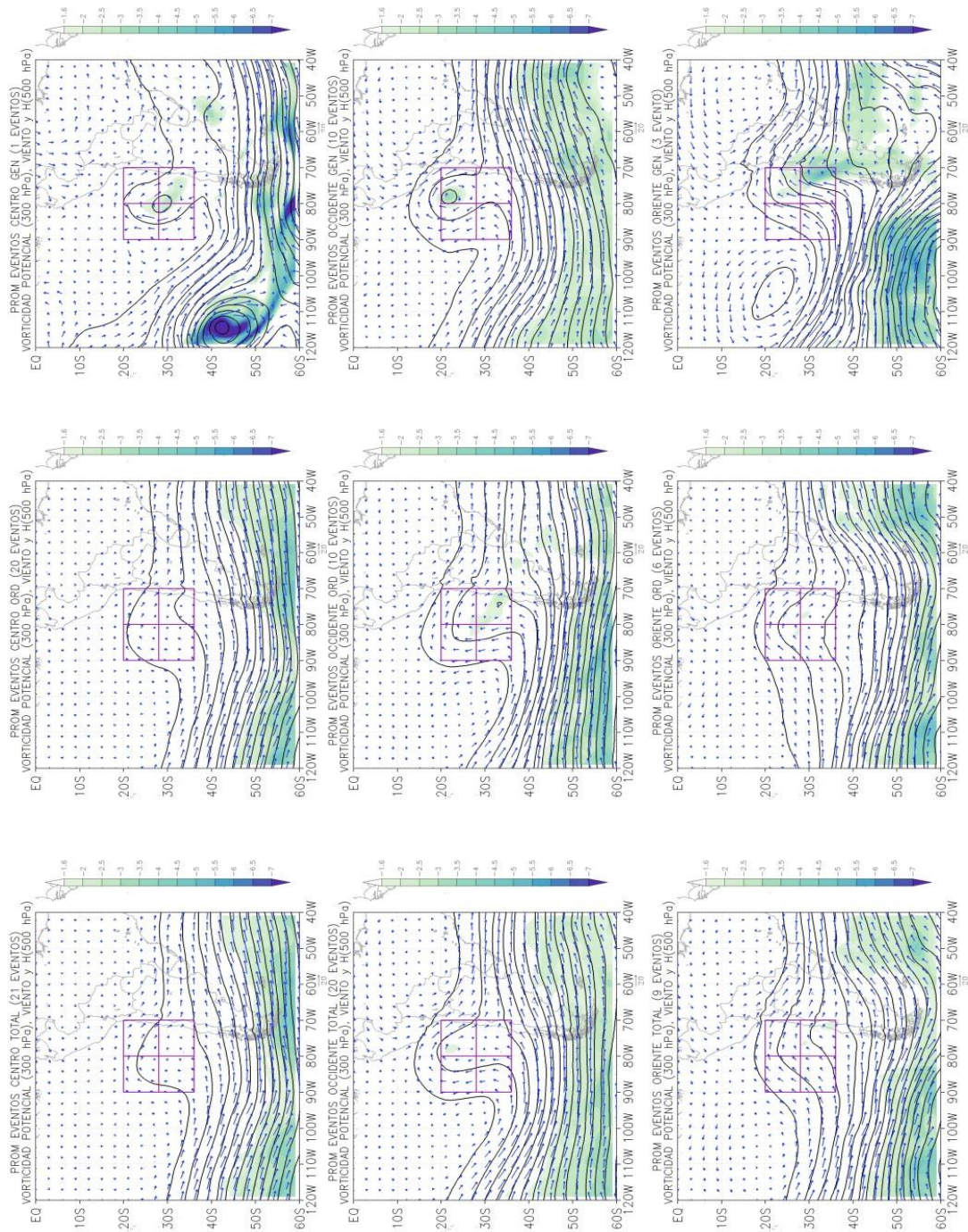
- Sangaku Maths. Frecuencia absoluta, relativa, acumulada y tablas estadísticas (en línea). 2015. <http://www.sangakoo.com/es/temas/frecuencia-absoluta-relativa-acumulada-y-tablas-estadisticas>
- Satyamurty, P. 1998. Meteorology of the Southern Hemisphere. American Meteorological Society. 119 – 139-
- Valverde, MC; Ferreira, NJ and Gan, MA. 2000. Vórtices ciclónicos desprendidos em altos níveis que originam-se no leste do Pacífico Tropical Sul. (En línea). 11 ed. Rio de Janeiro, Brasil. Consultado 6 set. 2014. Disponible en <http://www.cbmet.com/cbm-files/12-5476aff6d3b50d833b2449822f1ac81b.pdf>
- Wallace and Hobbs. 2nd edition. 2006. Academic Press. Atmospheric Science.483 p.
- Walsh, K. 1993. On the influence of the Andes on the general circulation of the Southern Hemisphere. Journal of Climate. 7. 1019 – 1025.

VIII. ANEXOS

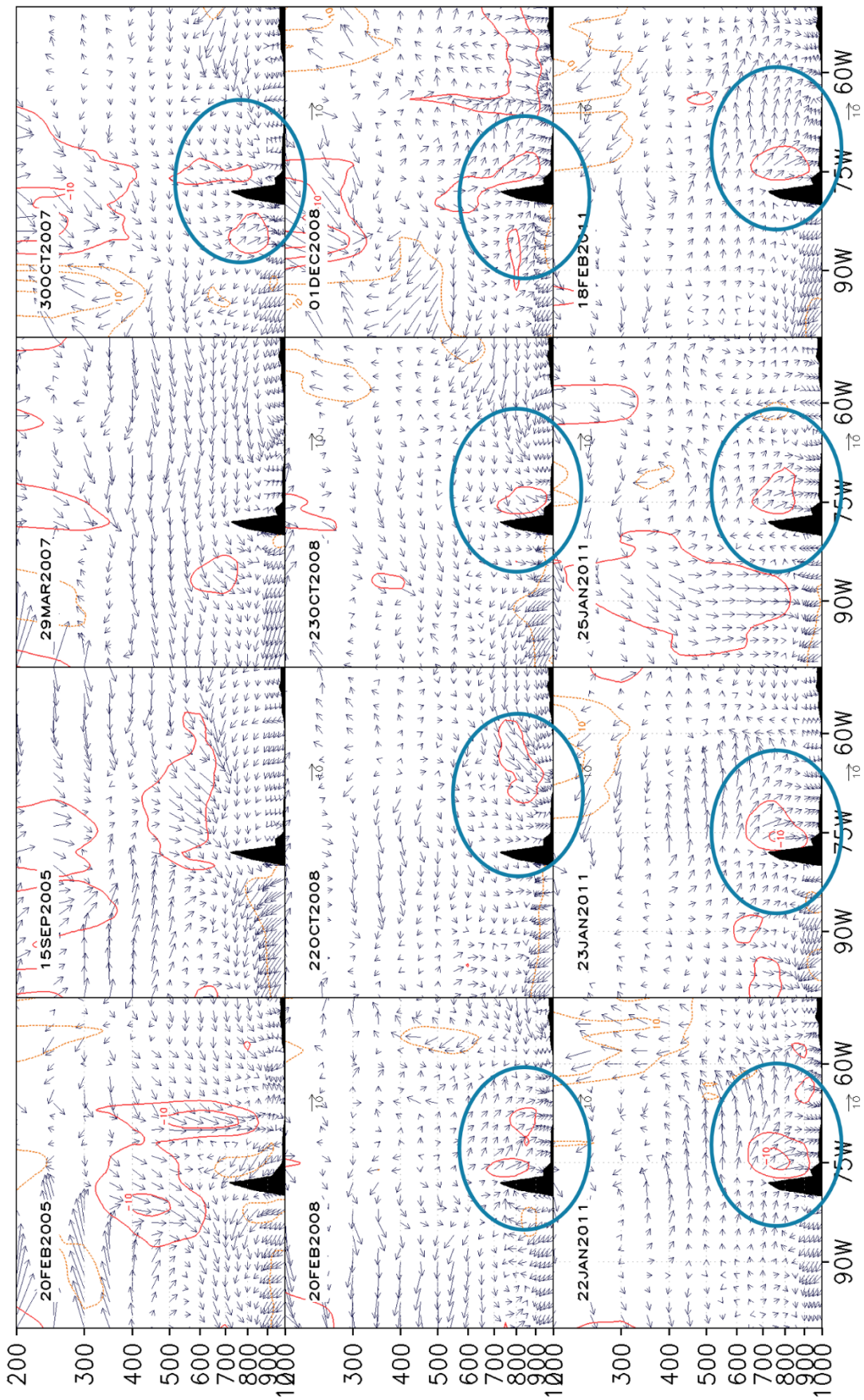
Anexo 1: Distribución anual de las DANA en base a la vorticidad potencial (VP)

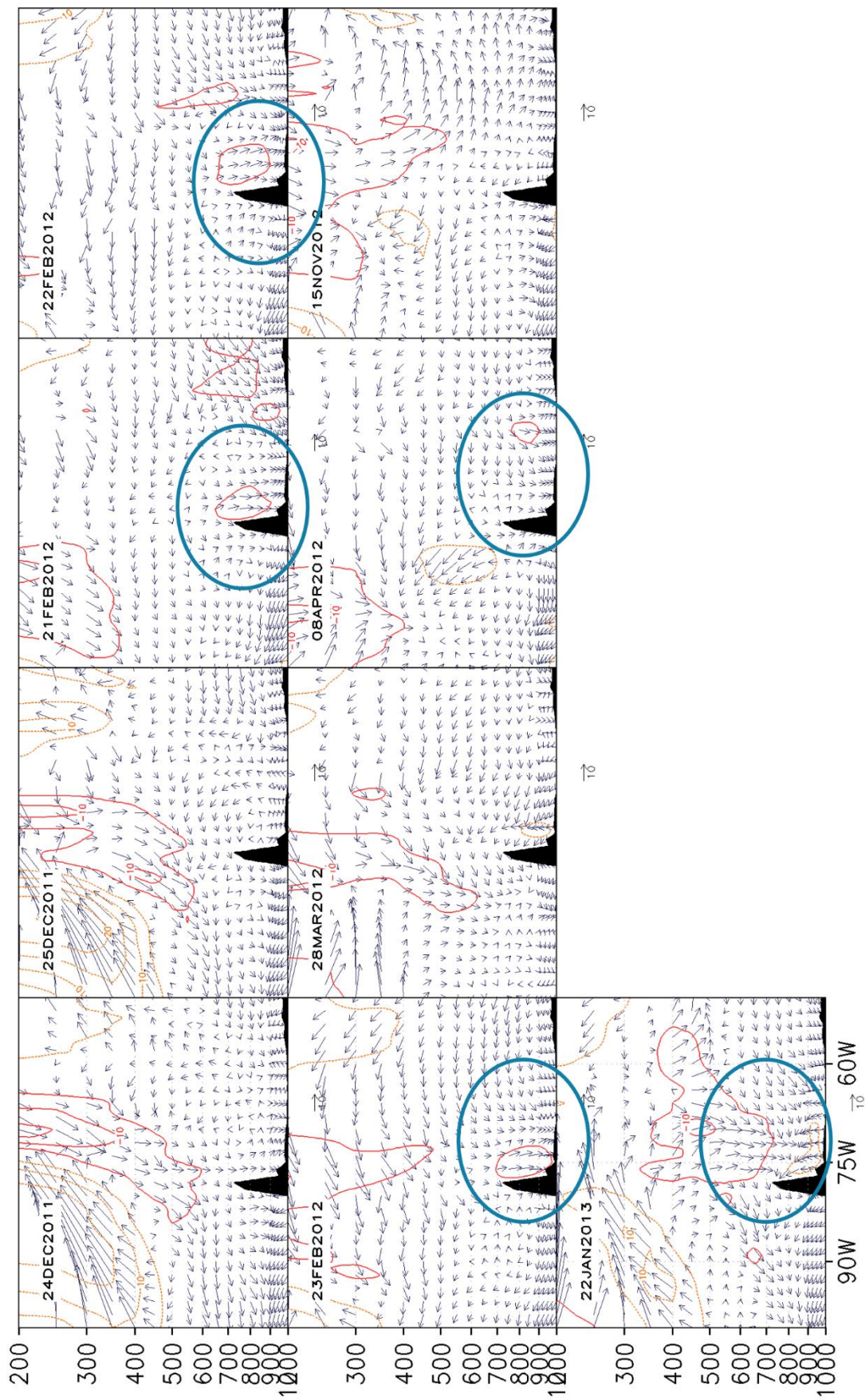


Anexo 2: Promedio de eventos por área de estudio (CEN, SOC, SOR) para la determinación de patrones de DANA

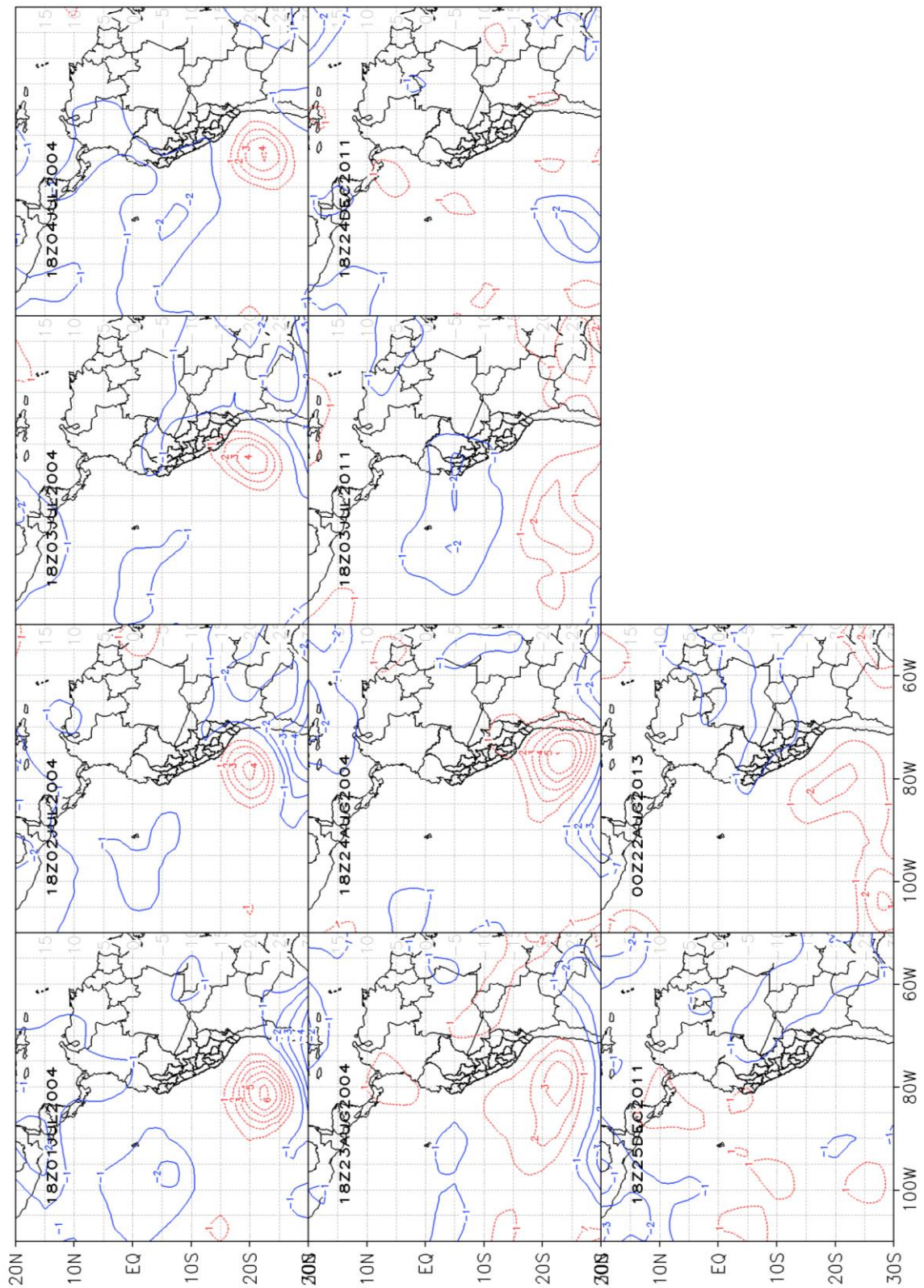


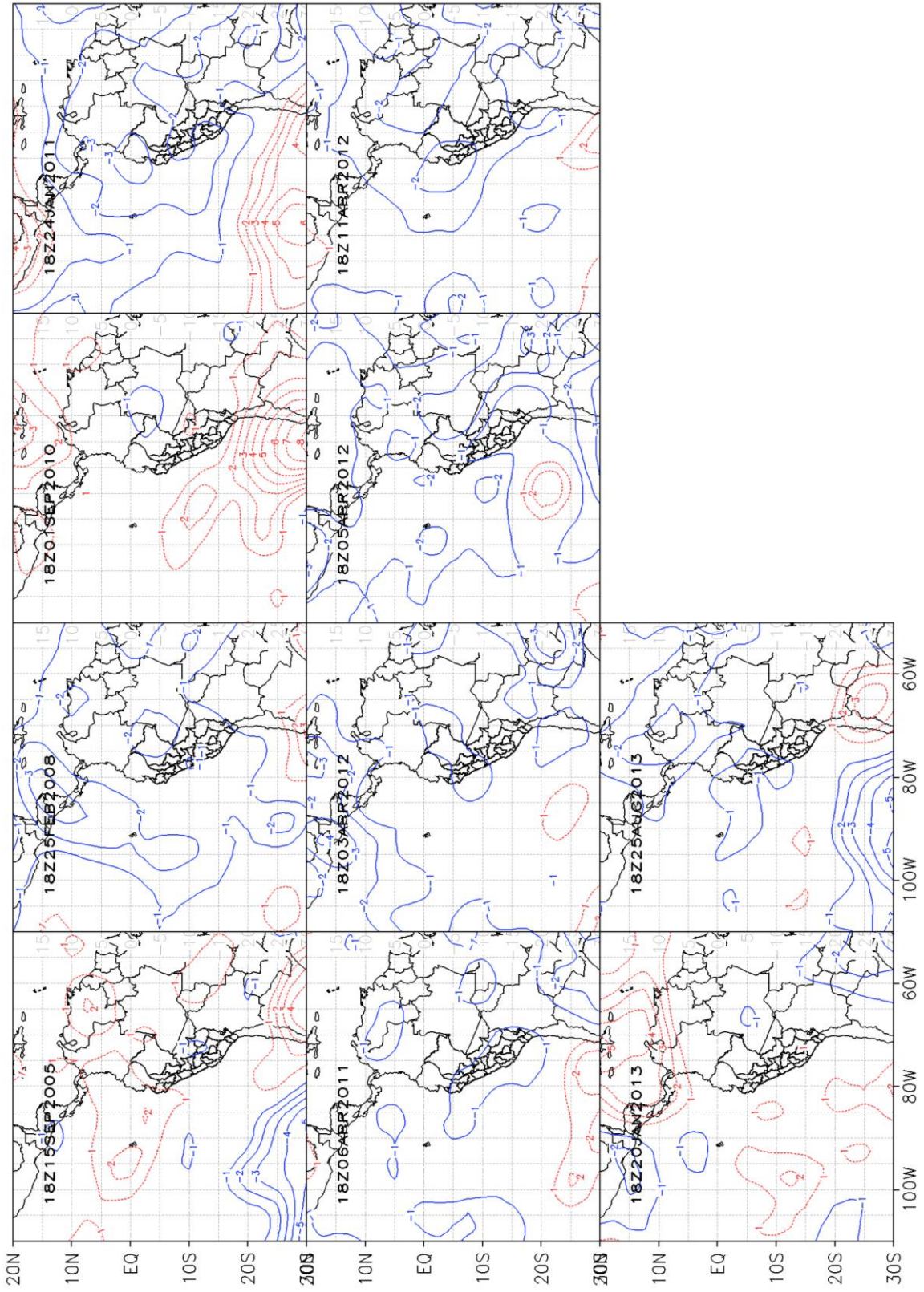
Anexo 3: Perfil vertical del viento para los eventos CEN (corte en 7°S)



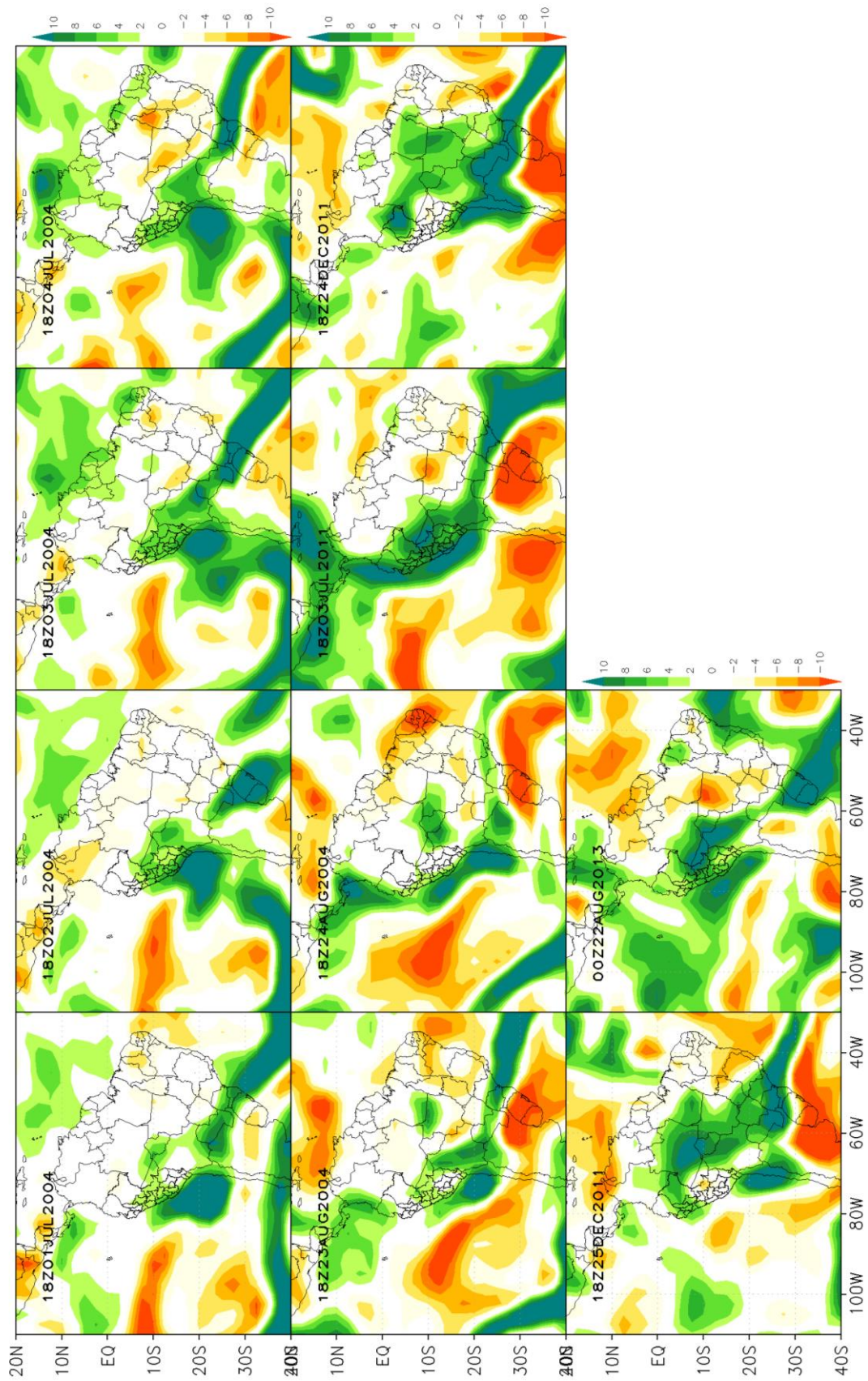


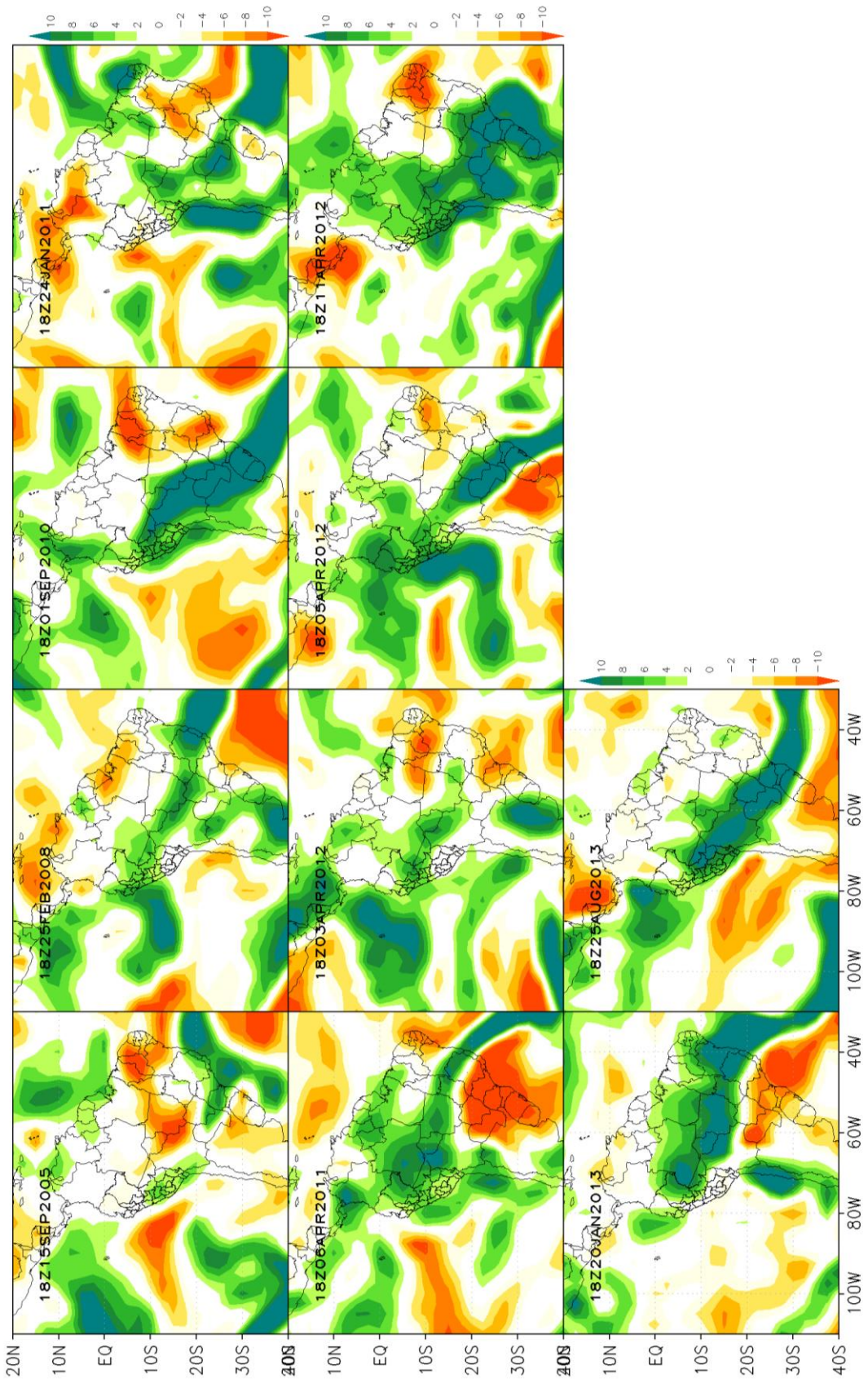
Anexo 4: Anomalías de temperatura en niveles altos (200 hPa). Eventos SOC





Anexo 5: Anomalía de agua precipitable en eventos SOC





Anexo 6: Anomalía de agua precipitable en eventos SOR

