

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“PATRONES DE CIRCULACIÓN SINÓPTICA EN SUDAMÉRICA  
ASOCIADOS A LAS LLUVIAS EXTREMAS EN LA SIERRA SUR  
DEL PERÚ”**

**Presentado por:**

**Andrea Cristina Holguín Herrera**

**Tesis para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERA METEORÓLOGA**

**Lima – Perú**

**2020**

---

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24 – Reglamento de propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“PATRONES DE CIRCULACIÓN SINÓPTICA EN SUDAMÉRICA  
ASOCIADOS A LAS LLUVIAS EXTREMAS EN LA SIERRA SUR  
DEL PERÚ”**

**Presentada por:**

**Andrea Cristina Holguín Herrera**

**Tesis para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERA METEORÓLOGA**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Mg.Sc. Victoria Doris Calle Montes

**PRESIDENTE**

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar

**MIEMBRO**

Mg.Sc. Julio Arakaki Kiyari

**MIEMBRO**

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro

**ASESOR**

Mg.Sc. Nelson Quispe Gutierrez

**CO-ASESOR**



## **DEDICATORIA**

*A Dios, por darme la sabiduría y salud para llegar hasta el final en este trabajo.*

*A mis padres, por ser el motor para poder cumplir mis metas y por apoyarme hasta el final  
con sus consejos. Gracias por su paciencia.*

*A mis hermanos, por siempre está ahí para mí.*

## AGRADECIMIENTOS

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

*A mi profesor Menacho, por apoyarme con la idea de la tesis y por sus consejos.*

*A mi jefe Nelson, por sus enseñanzas y guía para la finalización de este trabajo.*

*A mis amigos, por su apoyo constante con comentarios y ayuda para la realización de la tesis.*

*Gracias a mi familia por ser siempre mi motivo para conseguir mis metas.*

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



## INDICE GENERAL

### RESUMEN

### ABSTRACT

|            |  |          |
|------------|--|----------|
| <b>I.</b>  | <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                             | <b>1</b> |
| 1.1        | Objetivo principal.....                              | 2        |
| 1.2        | Objetivos específicos.....                           | 2        |
| <b>II.</b> | <b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>                  | <b>3</b> |
| 2.1        | Cordillera de los andes .....                        | 3        |
| 2.2        | Clasificación climática del Perú.....                | 3        |
| 2.3        | Climatología sinóptica.....                          | 7        |
| 2.4        | Principales consecuencias de eventos extremos.....   | 8        |
| 2.4.1      | Inundación.....                                      | 8        |
| 2.4.2      | Aluvión.....   | 9        |
| 2.4.3      | Derrumbe.....  | 9        |
| 2.5        | Conceptos.....                                       | 9        |
| 2.5.1      | Geopotencial.....                                    | 9        |
| 2.5.2      | Altura geopotencial .....                            | 10       |
| 2.6        | Agua en la atmósfera.....                            | 10       |
| 2.6.1      | Relación mezcla (w).....                             | 10       |
| 2.6.2      | Humedad Específica (q).....                          | 10       |
| 2.6.3      | Humedad Relativa (HR).....                           | 11       |
| 2.6.4      | Agua precipitable .....                              | 11       |
| 2.7        | Escalas meteorológicas .....                         | 11       |
| 2.7.1      | Microescala .....                                    | 11       |
| 2.7.2      | Mesoescala .....                                     | 12       |
| 2.7.3      | Escala Sinóptica .....                               | 13       |
| 2.7.4      | Escala Global.....                                   | 13       |
| 2.8        | Patrones de circulación sinóptica en Sudamérica..... | 14       |
| 2.8.1      | Baja Tropósfera .....                                | 14       |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| 2.8.2       | Alta Tropósfera .....  | 16        |
| 2.9         | Tipos de modelos numéricos de predicción del tiempo .....  | 18        |
| 2.9.1       | Modelos Globales de Circulación General.....   | 18        |
| 2.9.2       | Modelos Regionales .....   | 19        |
| 2.10        | Precipitación.....   | 19        |
| 2.10.1      | Lluvia .....   | 20        |
| 2.11        | Estimación de umbrales de lluvia por percentiles .....   | 20        |
| 2.9.1       | Umbrales de lluvia .....   | 20        |
| 2.9.2       | Función empírica de probabilidad y estimación de percentiles.....  | 21        |
| 2.12        | Modelo conceptual .....  | 21        |
| <b>III.</b> | <b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>   | <b>23</b> |
| 3.1         | Materiales.....  | 23        |
| 3.1.1       | Zona de Estudio.....   | 23        |
| 3.1.2       | Información de estaciones meteorológicas.....  | 23        |
| 3.1.3       | Modelo numérico .....  | 27        |
| 3.2         | Métodos.....   | 27        |
| 3.2.1       | Establecer umbrales de lluvias mediante la metodología de percentiles:.....  | 27        |
| 3.2.2       | Establecer mecanismos físicos de la ocurrencia de lluvias extremas. ....   | 29        |
| 3.2.3       | Establecer modelos conceptuales de patrones de circulación sinóptica en<br>ocurrencia de eventos extremos de lluvias. .... | 30        |
| <b>IV.</b>  | <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>   | <b>31</b> |
| 4.1         | Establecer umbrales de lluvias mediante la metodología de percentiles.....   | 31        |
| 4.1.1       | Estimación empírica de los percentiles 90, 95 y 99 .....   | 31        |
| 4.1.2       | Identificar los días superiores a los percentiles 90, 95 y 99 .....  | 39        |
| 4.1.3       | Identificar los patrones de circulación para los 20 casos seleccionados. ....  | 46        |
| 4.1.4       | Promedio de los casos para establecer los modelos conceptuales.....  | 57        |
| 4.2         | Establecer mecanismos físicos de la ocurrencia de lluvias extremas. ....   | 75        |
| 4.3         | Establecer modelos conceptuales de patrones de circulación sinóptica en<br>ocurrencia de eventos extremos de lluvias. .... | 80        |
| <b>V.</b>   | <b>CONCLUSIONES.....</b>   | <b>82</b> |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>VI. RECOMENDACIONES</b> ..... | 84 |
| <b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b> .....   | 85 |
| <b>VIII. ANEXOS</b> .....        | 89 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 01:</b> Codificación y Descripción de los Climas del Perú según la clasificación de Thornthwaite ..... | 5  |
| <b>Tabla 02:</b> Resumen de las diferentes escalas meteorológicas .....   | 14 |
| <b>Tabla 03:</b> Caracterización de extremos de precipitación .....   | 21 |
| <b>Tabla 04:</b> Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de SENAMHI .....                         | 25 |
| <b>Tabla 05:</b> Estaciones en 2 grupos.....  | 31 |
| <b>Tabla 06:</b> Número de estaciones por fechas.....   | 39 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 01:</b> Mapa Climático del Perú.....   | 4  |
| <b>Figura 02:</b> La creación de vórtices entre edificios de una ciudad.....                     | 12 |
| <b>Figura 03:</b> Esquema del ciclo diario de brisas.....  | 12 |
| <b>Figura 04:</b> Ejemplo del mapa sinóptico de presión y espesores de 1000-500 mb.....          | 13 |
| <b>Figura 05:</b> Esquema de las células de Hadley.....  | 14 |
| <b>Figura 06:</b> Variación del Anticiclón del Pacífico Sur.....                                 | 15 |
| <b>Figura 07:</b> Variación de la Vaguada Ecuatorial.....  | 16 |
| <b>Figura 08:</b> Variación de la Alta de Bolivia y la Vaguada del Norte de Brasil.....          | 18 |
| <b>Figura 09:</b> Zona de Estudio y Área sur del Perú.....                                       | 24 |
| <b>Figura 10:</b> Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas de SENAMHI..... | 25 |
| <b>Figura 11:</b> Percentiles del mes de enero grupo A.....                                      | 32 |
| <b>Figura 12:</b> Percentiles del mes de enero grupo B.....                                      | 33 |
| <b>Figura 13:</b> Percentiles del mes de febrero grupo A.....                                    | 33 |
| <b>Figura 14:</b> Percentiles del mes de febrero grupo B.....                                    | 34 |
| <b>Figura 15:</b> Percentiles del mes de marzo grupo A.....                                      | 34 |
| <b>Figura 16:</b> Percentiles del mes de marzo grupo B.....                                      | 35 |
| <b>Figura 17:</b> Percentiles del mes de Diciembre grupo A.....                                  | 35 |
| <b>Figura 18:</b> Percentiles del mes de diciembre grupo B.....                                  | 36 |
| <b>Figura 19:</b> Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012.....                      | 36 |
| <b>Figura 20:</b> Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012.....                      | 37 |
| <b>Figura 21:</b> Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012.....                      | 37 |
| <b>Figura 22:</b> Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012.....                      | 38 |
| <b>Figura 23:</b> Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012.....                      | 38 |
| <b>Figura 24:</b> Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012.....                      | 39 |
| <b>Figura 25:</b> Distribución de lluvia a nivel nacional.....                                   | 41 |
| <b>Figura 26:</b> Distribución de lluvia a nivel nacional.....                                   | 42 |
| <b>Figura 27:</b> Distribución de lluvia a nivel nacional.....                                   | 43 |
| <b>Figura 28:</b> Distribución de lluvia a nivel nacional.....                                   | 44 |
| <b>Figura 29:</b> Distribución de lluvia a nivel nacional.....                                   | 45 |
| <b>Figura 30:</b> Distribución de lluvia a nivel nacional.....                                   | 46 |
| <b>Figura 31:</b> Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte a.....                      | 47 |
| <b>Figura 32:</b> Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte b.....                      | 48 |
| <b>Figura 33:</b> Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte c.....                      | 49 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 34:</b> Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte d .....   | 50 |
| <b>Figura 35:</b> Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte e .....   | 51 |
| <b>Figura 36:</b> Viento y divergencia en 200 hPa parte a .....  | 52 |
| <b>Figura 37:</b> Viento y divergencia en 200 hPa parte b .....  | 53 |
| <b>Figura 38:</b> Viento y divergencia en 200 hPa parte c .....  | 54 |
| <b>Figura 39:</b> Viento y divergencia en 200 hPa parte d .....  | 55 |
| <b>Figura 40:</b> Viento y divergencia en 200 hPa parte e .....  | 56 |
| <b>Figura 41:</b> Altura geopotencial a 200 hPa.....   | 59 |
| <b>Figura 42:</b> Viento a 200 hPa .....   | 60 |
| <b>Figura 43:</b> Viento e intensidad a 500 hPa .....  | 62 |
| <b>Figura 44:</b> Altura Geopotencial a 500 hPa.....   | 63 |
| <b>Figura 45:</b> Relación de mezcla a 500 hPa.....  | 64 |
| <b>Figura 46:</b> Relación de mezcla a 550 hPa.....  | 65 |
| <b>Figura 47:</b> Viento e intensidad a 850 hPa .....  | 67 |
| <b>Figura 48:</b> Relación de mezcla a 850 hPa.....  | 68 |
| <b>Figura 49:</b> Presión a nivel del mar .....  | 69 |
| <b>Figura 50:</b> Radiación de onda larga (ROL).....   | 72 |
| <b>Figura 51:</b> Anomalía de ROL y altura geopotencial medida (línea roja solida) y<br>climática (línea negra en guion) a 300 hPa .....                                 | 73 |
| <b>Figura 52:</b> Anomalía de relación de mezcla 500 hPa y altura geopotencial<br>medida (línea roja solida) y climática (línea negra en guion) a 300 hPa .....          | 74 |
| <b>Figura 53:</b> Corte latitudinal en -15.5°, velocidad vertical (línea discontinua),<br>humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 1 ..... | 76 |
| <b>Figura 54:</b> Corte latitudinal en -15.5°, velocidad vertical (línea discontinua),<br>humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 2 ..... | 76 |
| <b>Figura 55:</b> Corte latitudinal en -15.5°, velocidad vertical (línea discontinua),<br>humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 3 ..... | 77 |
| <b>Figura 56:</b> Corte latitudinal en -15.5°, velocidad vertical (línea discontinua),<br>humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 4 ..... | 77 |
| <b>Figura 57:</b> Corte latitudinal en -15.5°, velocidad vertical (línea discontinua),<br>humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 5 ..... | 78 |
| <b>Figura 58:</b> Corte latitudinal en -15.5°, velocidad vertical (línea discontinua),<br>humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 6 ..... | 78 |
| <b>Figura 59:</b> jet de bajos niveles del norte (LLJ) .....   | 79 |
| <b>Figura 60:</b> jet de bajos niveles del norte (LLJ) .....   | 80 |



**Figura 61:** Modelo conceptual para lluvias extremas en la sierra sur. Niveles Altos en color azul, niveles medios en color negro y niveles bajos en color rojo. .... 81

## INDICE DE ANEXOS

|   |    |
|---|----|
| <b>Anexo 1:</b> Radiación de Onda Larga de los 20 casos de estudio .....    | 90 |
| <b>Anexo 2:</b> Jet de bajos niveles los 10 primeros casos .....            | 91 |
| <b>Anexo 3:</b> Jet de bajos niveles los 10 últimos casos .....             | 92 |
| <b>Anexo 4:</b> Relación de mezcla a las 06z de los 10 primeros casos ..... | 93 |
| <b>Anexo 5:</b> Relación de mezcla a las 06z de los 10 últimos casos .....  | 94 |
| <b>Anexo 6:</b> Relación de mezcla a las 12z de los 10 primeros casos ..... | 95 |
| <b>Anexo 7:</b> Relación de mezcla a las 12z de los 10 últimos casos .....  | 96 |
| <b>Anexo 8:</b> Relación de mezcla a las 18z de los 10 primeros casos ..... | 97 |
| <b>Anexo 9:</b> Relación de mezcla a las 18z de los 10 últimos casos .....  | 98 |
| <b>Anexo 10:</b> Agua Precipitable .....                                    | 99 |

## RESUMEN

En la sierra sur, las lluvias extremas son un problema importante, en el presente trabajo se estudian las lluvias extremas entre el período del 2008 al 2012. Para poder identificar los casos de los días extremos de lluvias, se trabajó con los percentiles de precipitación usando la información de las estaciones de SENAMHI ubicadas en la sierra sur y siguiendo la metodología de Alfaro (2014) se calculó los percentiles. Luego con los datos del modelo GFS (Global Forecast System) con  $1^\circ \times 1^\circ$  de resolución horizontal, se realizó el análisis sinóptico de 20 casos para identificar los patrones sinópticos, donde se graficó divergencia, vientos y altura geopotencial en nivel alto (200 hPa), relación de mezcla en nivel medio (550 hPa) y el jet de bajos niveles (850 hPa), para poder identificar patrones similares y luego obtener los grupos finales, con esta información se establecieron 6 grupos de patrones sinópticos similares.

Lo que se encontró sobre los datos de lluvia, los valores de normales fueron altos para los meses de enero y febrero. También se señaló un nuevo umbral de ROL para la sierra sur, con un valor de  $210 \text{ Wm}^{-2}$  que nos muestra la presencia de convección profunda.

En el análisis sinóptico, se obtuvo dos sistemas sinópticos de lluvias extremas, en niveles altos la Alta de Bolivia ubicada al sur de Perú y una vaguada al oeste de Perú. Con respecto al transporte de humedad se identificaron dos patrones de circulación atmosférica; un sistema de giro anti-horario en niveles medio y flujos del norte relacionado a la presencia del jet de bajos niveles (LLJ). Para la generación de lluvias extremas en la sierra sur, una característica importante es la presencia de humedad en niveles medios y bajos, proveniente de la Amazonía y que se encajona en los Andes de la sierra sur.

**PALABRAS CLAVES:** Alta de Bolivia, vaguada al oeste de Perú, sistema anti-horario en niveles medios.

## ABSTRACT

In the southern highlands heavy rainfall is a major problem, in the present work extreme precipitation is studied between the period of 2008 and 2012, in order to identify in which days extreme precipitation occurred, percentiles were determined with the information of the National Meteorological and Hydrological Service of Peru (SENAMHI) stations, located in the area of study. Then with the data of the GFS (Global Forecast System) model with a  $1^\circ \times 1^\circ$  horizontal resolution, a synoptic analysis of 20 cases was used to identify the synoptic patterns; divergence, wind and geopotential height were plotted at 200hPa (upper level), mixing ratio at 550hPa (mid-level) and the Low Level Jet (LLJ) at 850hPa (lower level), with this information 6 groups of similar synoptic patterns were established.

While studying the data, average rainfall was found to be higher during the months of January and February. Also, a new OLR threshold was determined for the southern highlands, with a value of  $210 \text{ Wm}^{-2}$  which shows the presence of deep convection.

In the synoptic analysis, two synoptic systems related had the major influence in the occurrence of extreme precipitation, at high levels the Bolivian High, located south of Peru, and a trough west of Peru. With respect to moisture transport, the atmospheric circulation patterns identified included a counter-clockwise system at medium levels and northern flows related to the presence of the low level jet (LLJ). Furthermore, a key factor in extreme rainfall in the southern highlands is the presence of humidity at medium and low levels, from the Amazon, which is encased in the Andes mountain range of the southern highlands. These mechanisms and more are explained in greater detail in subsequent sections.

**KEY WORDS:** Bolivian High, trough west of Peru, counter-clockwise system at medium levels.

## I. INTRODUCCIÓN

Los patrones de circulación sinóptica son sistemas de circulación que caracterizan una determinada estación del año y éstos están asociados a diferentes fenómenos propios de la estación.

A nivel de Sudamérica se estudia la escala sinóptica (100 a 3 000 km), donde se presentan diferentes fenómenos, que influyen en la formación de sistemas convectivos que pueden generar las precipitaciones extremas sobre el territorio peruano, algunos de ellos son: el Anticiclón del Pacífico Sur (APS), la Alta de Bolivia (AB), la Vaguada del Noreste de Brasil (VNB) y la Zona Convergencia Intertropical (ZCIT).

La precipitación extrema se define como la presencia de un fenómeno meteorológico de mayor intensidad de lo normal y que puede ocasionar daños a la vida humana o al entorno ya sea social o económico. De acuerdo con el “Intergovernmental Panel on Climate Change” (IPCC), un fenómeno meteorológico extremo es un evento “raro” en un lugar y momento determinado. Las definiciones de raro varían, pero en general hay consenso de que un fenómeno meteorológico extremo normalmente debería ser más “raro” que el percentil 10 o 90 de la función de densidad de probabilidad observada, constituyendo así un índice climático de lluvias extremas. Para considerar que la precipitación es extrema deberá estar sobre el percentil 99 (p99) en la temporada de lluvia.

El proceso de formación de las lluvias en el Perú, está influenciado por un factor físico que interviene en la variación del clima, la cordillera de los andes. Esta barrera natural formada de norte a sur se divide en dos vertientes (occidental y oriental) y presentan climas antagónicos; la vertiente oriental se caracteriza por un clima con mayor presencia de humedad y consecuentemente mayor ocurrencia de precipitaciones en especial en los meses de verano, mientras que la vertiente occidental entre los 3°S a 30°S presenta un clima árido/semiárido e incluso, la zona costera del sur del Perú y norte de Chile, es considerada una de las zonas más áridas del mundo (franja desértica de la costa occidental - norte de Chile y sur de Perú).

Las configuraciones atmosféricas típicas de verano e invierno, definen la variación estacional de las precipitaciones, siendo el verano típicamente la estación lluviosa, y el invierno la temporada seca o de estiaje (Quispe, Cubas y Avalos, 2009).

Para la realización del trabajo se seleccionó la región sur del Perú. Lo primero que se realizó fue el cálculo de los umbrales, los percentiles 70, 90, 95 y 99 para las 57 estaciones que poseen más de 30 años de datos, para ello se utilizó la metodología realizada por Alfaro (2014), que está en función del cálculo de los percentiles y además se deberá seguir las recomendaciones de la OMM (WMO, 2009). Luego, se aplicó diferentes filtros para finalizar la selección de 20 casos que representan los días donde la lluvia fue extrema y para identificar los patrones de circulación sinóptica. Para ello se usó la metodología que fue extraída de un proceso más extenso publicado por Fernández y Díaz (2003), denominado Procesos Sinópticos Objetivos (PSOs), que permite establecer una relación entre el comportamiento de las condiciones meteorológicas en diferentes lugares de un país con las configuraciones sinópticas de la atmósfera. Dicho método se basa en el estudio de los patrones circulatorios predominantes en superficie, niveles medios (500 hPa) y altos (200 hPa), tomando en cuenta las 24 horas previas y posteriores en las que ocurrió el evento severo.

### **1.1 Objetivo principal**

Establecer los patrones de circulación sinóptica que están asociados a la ocurrencia de lluvias extremas.

### **1.2 Objetivos específicos**

- a) Establecer umbrales de lluvia mediante la metodología de percentiles.
- b) Establecer mecanismos físicos de la ocurrencia de lluvias extremas.
- c) Establecer modelos conceptuales de patrones de circulación sinóptica en la ocurrencia de eventos extremos de lluvia.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Cordillera de los andes**

La cordillera de los andes tiene una extensión desde la frontera con Ecuador, cruzando el territorio peruano hasta las fronteras con Chile y Bolivia. Los andes peruanos se dividen en tres sectores en tres sectores:

- Sector Norte (Boreal): Ubicado desde la frontera con Ecuador hasta el nudo de Pasco.
- Sector central: Ubicado desde el nudo de Pasco hasta el nudo de Vilcanota.
- Sector Sur (Meridional): Ubicada desde el nudo de Vilcanota hasta las fronteras de Chile y Bolivia.

Además, está formada por tres cadenas de montañas: Cadena Occidental (Oeste), Cadena central y Cadena Oriental (este). Generando que desde 14° de latitud se considere sierra sur.

### **2.2 Clasificación climática del Perú**

El Perú posee veintisiete climas, según el método de Clasificación Climática de Warren Thornthwaite (1931). Esto se debe a la posición geográfica y a los diferentes factores climáticos que lo rodean. En figura 01 se observa el mapa de clasificación climática con el método de Thornthwaite y los códigos de cada color.

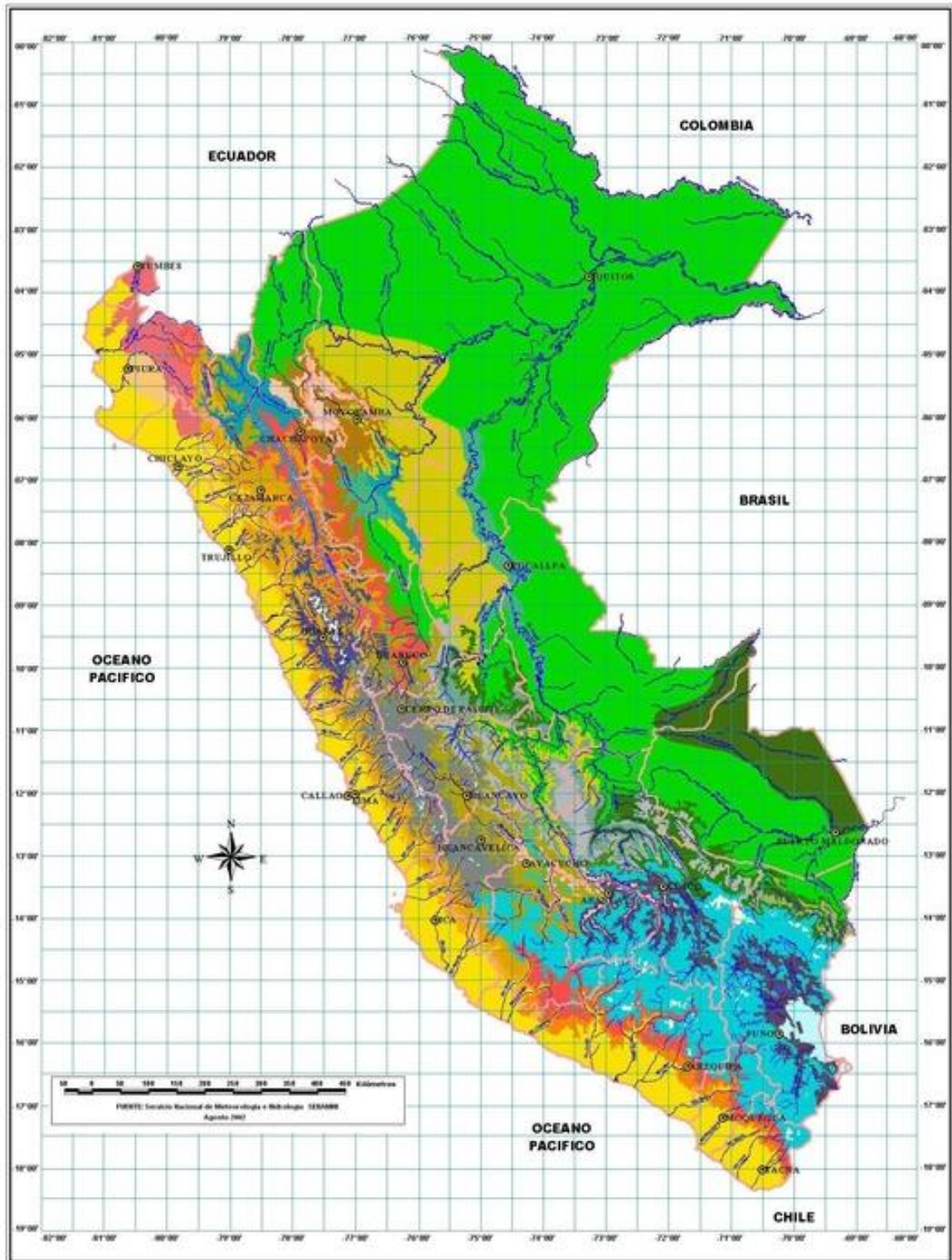















Figura 01: Mapa Climático del Perú

FUENTE: SENAMHI













En la tabla 01, se observa la codificación y descripción de los Climas del Perú según la clasificación de Werren Thornthwaite:





Tabla 01: Codificación y Descripción de los Climas del Perú según la clasificación de Thornthwaite

|  |   |
|--|---|
|  <b>A(r) A' H4</b>      | Zona de clima cálido, muy lluvioso, precipitaciones abundantes en todas las estaciones del año, humedad relativa calificada como muy húmeda.      |
|  <b>A(r) B'1 H4</b>     | Zona de clima semi cálido, muy lluvioso, precipitaciones abundantes en todas las estaciones del año, humedad relativa calificada como muy húmeda. |
|  <b>A(r) B'2 H3</b>     | Zona de clima templado, muy lluvioso, precipitaciones abundantes en todas las estaciones del año, humedad relativa calificada como húmeda.        |
|  <b>B(i) A' H3</b>      | Zona de clima cálido, lluvioso, con lluvia deficiente en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.                                   |
|  <b>B(i) B'1 H3</b>    | Zona de clima semi cálido, lluvioso, con lluvia deficiente en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.                              |
|  <b>B(i) B'2 H3</b>   | Zona de clima templado, lluvioso, con lluvia deficiente en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.                                 |
|  <b>B(i) D' H3</b>    | Zona de clima semi frígido, lluvioso, con lluvia deficiente en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda                              |
|  <b>B(o,i) B'3 H3</b> | Zona de clima semi frio, lluvioso, con lluvia deficiente en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.                        |
|  <b>B(o,i) C' H3</b>  | Zona de clima frio, lluvioso, con lluvia deficiente en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.                             |
|  <b>B(o,i) D' H3</b>  | Zona de clima semi frigido, lluvioso, con lluvia deficiente en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.                     |
|  <b>B(r) A' H3</b>    | Zona de clima cálido, lluvioso, con lluvia abundante en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como húmeda.                |
|  <b>B(r) A' H4</b>    | Zona de clima cálido, lluvioso, con lluvia abundante en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como muy húmeda.            |
|  <b>B(r) B'1 H4</b>   | Zona de clima semi cálido, lluvioso, con lluvia abundante en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como muy húmeda.       |

Continuación...

|  |  |
|--|--|
|  <b>B(r) B'2 H3</b>       | Zona de clima templado, lluvioso, con lluvia abundante en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como húmeda.       |
|  <b>B(r) C' H3</b>        | Zona de clima frío, lluvioso, con lluvia abundante en todas las estaciones del año, con humedad relativa calificada como húmeda.           |
|  <b>C(i) C' H3</b>        | Zona de clima semi seco, frío, deficiencia de lluvia en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda.                             |
|  <b>C(o,i,p) A' H3</b>    | Zona de clima semi seco, cálido, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda.    |
|  <b>C(o,i) C' H2</b>      | Zona de clima semi seco, frío, con deficiencia de lluvia en otoño e invierno, con humedad relativa calificada como seco.                   |
|  <b>C(o,i,p) B'2 H3</b>  | Zona de clima semi seco, templado, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda.  |
|  <b>C(o,i,p) B'3 H3</b> | Zona de clima semi seco, semi frío, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda. |
|  <b>C(o,i,p) C' H2</b>  | Zona de clima semi seco, frío, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como seca.        |
|  <b>C(o,i,p) C' H3</b>  | Zona de clima semi seco, frío, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como húmeda.      |
|  <b>D(o,i,p) B'2 H2</b> | Zona de clima semi arido, templado, con deficiencia de lluvia en otoño, invierno y primavera, con humedad relativa calificada como seco.   |
|  <b>E(d) A' H2</b>      | Zona de clima desértico, con deficiencia de lluvia en todas las estaciones, con humedad relativa calificada como seco.                     |
|  <b>E(d) A' H3</b>      | Zona de clima desértico, cálido, con deficiencia de lluvia en todas las estaciones, con humedad relativa calificada como húmedo.           |

Continuación...

|  |   |
|--|---|
|  <b>E(d) B'1 H3</b> | Zona de clima semi calido, desértico, con deficiencia de lluvia en todas las estaciones, con humedad relativa calificada como humedo. |
|  <b>Nieve</b>       | Zona de clima polar, lluvioso, con lluvia deficiente en invierno, con humedad relativa calificada como seca.                          |

### 2.3 Climatología sinóptica

La rama de la climatología que explica la interacción existente entre la circulación atmosférica y las condiciones presentes en superficie, haciendo énfasis en como las variaciones en la circulación atmosférica impulsan cambios en las variables en superficie, es la climatología sinóptica (Gutiérrez et al., 2005). Lydolph (1975), definió a la climatología sinóptica como “una explicación del tiempo local utilizando patrones conocidos de la atmósfera”.

En las dos últimas décadas, Barry y Perry (1973) establecieron un rumbo para la mayoría de los trabajos de investigación sobre la climatología sinóptica; definiéndola como el estudio de la relación entre los climas regionales y la circulación atmosférica local, llegando a concluir que la climatología sinóptica se debe realizar en dos etapas: En la primera, el estudio de la circulación atmosférica; y en la segunda hallar una relación entre los climas regionales, la circulación atmosférica local y los elementos meteorológicos de la región. Resaltando que esta segunda etapa, sufrió una variación debido a la inclusión de las variables no meteorológicas que se pueden relacionar con patrones de circulación. Para aplicar la climatología sinóptica, existen dos maneras. Una de ellos es la inductiva, que trata de la descripción de la circulación atmosférica y su respuesta en superficie, basándose en modelos matemáticos. La otra es la aproximación deductiva, que se basa en la estadística para establecer el enlace de la circulación atmosférica y las variables en superficie. Cabe resaltar que ambas técnicas no son mutuamente excluyentes sino complementarias, debido a la ausencia de mediciones en algunas zonas es necesario la generación de datos a través de los modelos numéricos para obtener una información completa del área de estudio, una vez obtenido estos datos, el uso de la estadística es la que ofrece menor duda en la relación de la circulación y las variables en superficie (Gutiérrez et al., 2005).

Para aplicar la climatología sinóptica, generalmente se hace en 4 pasos. El primero es sobre establecer grupos, en base a las propiedades en común de los procesos circulatorios. El segundo es establecer la relación entre las dos escalas en el análisis: la escala mayor de los procesos de circulación atmosférica y la escala menor de los procesos en superficie. Para Harman y Winkler (1991) establecer la relación entre escalas es la base de la climatología sinóptica. El tercero es estudiar la influencia que posee la variabilidad climática en las condiciones de superficie. Las variaciones interanuales e intermensuales de la circulación determinan el clima en superficie en un período dado. El cuarto es sobre la entidad espacial fundamental que es la región; La escala de la circulación atmosférica puede variar desde una escala planetaria hasta una escala sinóptica pero siempre va estar relacionada con las condiciones en superficie de una región (Gutiérrez et al., 2005).

La climatología sinóptica, como cualquier otra rama de la ciencia, se basa en suposiciones. La más resaltante de todas es que la circulación atmosférica es la mayor influencia en las condiciones de superficie. Gutiérrez (2005), señala que cuando se inicie un estudio se debe comprobar la relación entre la circulación y la superficie, en caso contrario que no exista esa relación no hay necesidad de continuar con la investigación.

La climatología sinóptica es muy usada para estudios de diferentes casos. Sharon y Ronberg (1988), indicaron que hay una asociación entre sistemas de circulación a escala global y la variación en las tormentas de invierno a escala sinóptica en Israel. Los autores llegaron a demostrar que el número de “Bajas de Chipre” que se aproximaban a Israel variaban con la posición de la vaguada del Mediterráneo. Suckling y Hay (1978), utilizaron la climatología sinóptica para determinar los regímenes de la radiación solar sobre el suroeste de Canadá. Teniendo como objetivo utilizar las relaciones entre la circulación atmosférica y la radiación en algunos puntos para determinar un catálogo regional del comportamiento de esta variable.

## **2.4 Principales consecuencias de eventos extremos**

### **2.4.1 Inundación**

Es el desborde lateral de las aguas de ríos, lagos y mares que cubren temporalmente los terrenos bajos, adyacentes a sus riberas, llamadas zonas inundables. Suele ocurrir en épocas de grandes precipitaciones pluviales.

Causas:

Aumento considerable del caudal de un río sobrepasando el dimensionamiento de su cauce; obstrucción del lecho y desviación de las aguas fuera de su curso normal; acumulación periódica de materiales transportados por el río que elevan el nivel del cauce; invasión de los terrenos dejados por el río (lecho antiguo), reduciendo su capacidad sin tener en cuenta los caudales excepcionales.

#### **2.4.2 Aluvión**

Es el desplazamiento violento de una gran masa de agua con mezcla de sedimentos de variada granulometría y bloques de roca de grandes dimensiones, que se movilizan a gran velocidad a través de quebradas o valles debido a la ruptura de diques naturales y/o artificiales o desembalse súbito por represamiento de un río. En el Perú se le conoce como huaico o huayco.

Causas:

Intensas precipitaciones pluviales; ocurrencia de aludes o avalanchas sobre lagunas y ríos; ruptura de diques naturales (morrenas) o artificiales (presas); desembalse violento por represamiento debido a deslizamiento o derrumbes en el cauce de un río; movimientos sísmicos.

#### **2.4.3 Derrumbe**

Es la caída repentina de una porción de suelo o roca por pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante. No presenta planos o superficie de deslizamiento. Este fenómeno suele estar condicionado por la presencia de discontinuidades o grietas. Generalmente ocurren en taludes de fuerte pendiente.

Causas:

La fuerza de la gravedad; socavamiento del pie de un talud inferior; modificación o corte de un talud natural; presencia de zonas de debilidad (fallas, fracturas, etc.); precipitaciones pluviales e infiltración del agua, provocando la presión hidrostática del agua acumulada; movimientos sísmicos; fuertes vientos; sobreuso de explosivos o uso indebido de ellos; resistencia física inadecuada de los materiales.

### **2.5 Conceptos**

#### **2.5.1 Geopotencial**

El geopotencial ( $\Phi$ ) en cualquier punto de la atmósfera de la Tierra se define como el trabajo que debe realizarse contra el campo gravitacional de la Tierra para elevar a la unidad de masa desde el nivel del mar hasta la altura  $z$  (unidades:  $\text{J}/\text{kg}^2$ ). (Wallace & Hobbs, 2006)

$$\Phi(z) \equiv \int_0^z g dz \dots\dots\dots (1)$$

**2.5.2 Altura geopotencial**

La altura geopotencial ( $Z$ ) se puede definir como

$$Z \equiv \frac{\Phi(z)}{g_0} = \frac{1}{g_0} \int_0^z g dz \dots\dots\dots (2)$$

donde  $g_0$  es la aceleración global promediada debido a la gravedad en la superficie de la Tierra (tomada como  $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ). La altura geopotencial se usa como la coordenada vertical en la mayoría de las aplicaciones atmosféricas en las que la energía juega un papel importante (por ejemplo, en los movimientos atmosféricos a gran escala). (Wallace & Hobbs, 2006)

**2.6 Agua en la atmósfera**

**2.6.1 Relación mezcla ( $w$ )**

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

$$w \equiv \frac{m_v}{m_d} \dots\dots\dots (3)$$

La relación de mezcla normalmente se expresa en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. En los trópicos, la magnitud de  $w$  normalmente se encuentra en valores alrededor de los  $20 \text{ g}/\text{kg}$ . Si no se produce condensación ni evaporación, la relación de mezcla de una parcela es constante. (Wallace & Hobbs, 2006)

**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)

$$q \equiv \frac{m_v}{m_v+m_d} = \frac{w}{1+w} \dots\dots\dots (4)$$

### 2.6.3 Humedad Relativa (HR)

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

$$HR \equiv 100 \frac{w}{w_s} \dots\dots\dots (5)$$

### 2.6.4 Agua precipitable

El total de agua precipitable es el contenido en una columna de unidad de corte que se extiende desde la superficie de la tierra hasta la "parte superior" de la atmósfera. Matemáticamente, si  $x(p)$  es la relación de mezcla en el nivel de presión  $p$ , entonces el vapor de agua precipitable ( $W$ ), contenido en una capa limitada por las presiones  $p_1$  y  $p_2$  está dado por:

$$W = \frac{1}{\rho g} \int_{p_1}^{p_2} x dp \dots\dots\dots (6)$$

Donde  $\rho$  representa la densidad del agua y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

En tormentas de lluvia reales, las cantidades de lluvia muy a menudo exceden el total de agua precipitable en la atmósfera. Esto es el resultado de la acción de convergencia que trae la tormenta hacia un área que a menudo es bastante grande. Sin embargo, existe una correlación general entre las cantidades de precipitación en tormentas dadas y el vapor de agua precipitable de las masas de aire involucradas en esas tormentas. (American Meteorological Society, 2015)

## 2.7 Escalas meteorológicas

Los fenómenos de la atmósfera ocurren a distintas escalas espacio-temporales, desde las escalas sinópticas con fluctuaciones en la circulación asociadas a grandes sistemas de presión, con longitudes de onda en torno a 5 000 km y periodos en torno a 5 días, a escalas mesoescalares con fluctuaciones locales en la circulación derivadas de la interacción entre calentamientos diferenciales inducidos por el ciclo diurno y la inhomogeneidad en superficie, con longitudes de onda en torno a 200 km de tamaño (Orlanski, 1975; Jansá, 1990). Las escalas se clasificaron en:

### 2.7.1 Microescala

Esta escala describe fenómenos meteorológicos definidos por un rango espacial de orden de metros o incluso inferior y temporal del orden de segundos. Algunos fenómenos pertenecientes a esta escala son los vórtices entre zonas urbanas, la turbulencia atmosférica o las células convectivas de Kelvin-Helmholtz. En la figura 02, se ve un ejemplo de vórtices entre edificios.

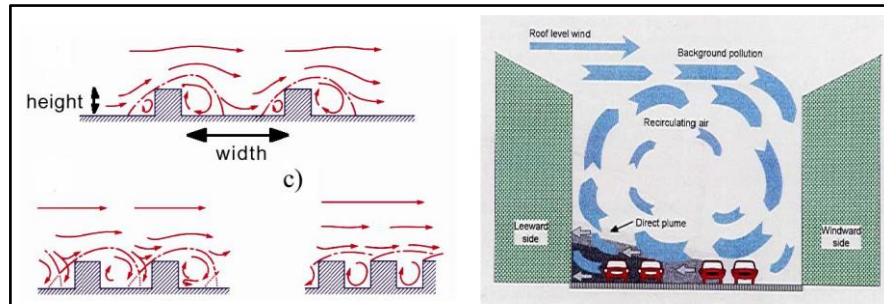


Figura 02: La creación de vórtices entre edificios de una ciudad

FUENTE: Proyecto final de Carrera, Remón

### 2.7.2 Mesoescala

Esta escala meteorológica describe fenómenos meteorológicos entre los rangos de 10 hasta 100 kilómetros y temporalmente desde minutos hasta horas de duración. Es una escala influenciada por la orografía y que normalmente presenta un ciclo diario muy marcado, siendo posible distinguir diferentes comportamientos durante la noche y el día. Los fenómenos presentes en esta escala son las brisas tierra-mar, vientos en valles y laderas, un ejemplo de ello es el ciclo diario de brisas que se muestra en el figura 03.

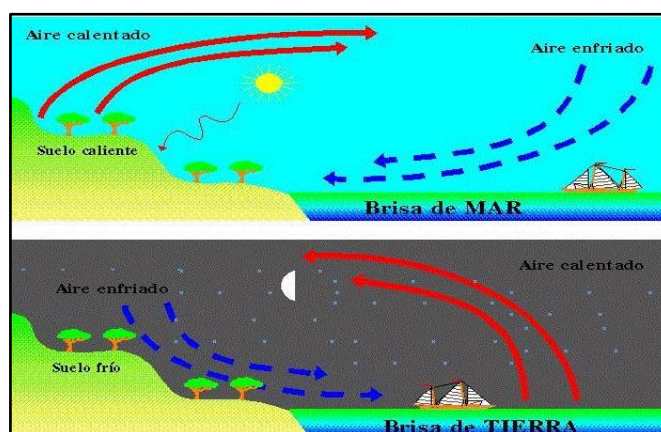


Figura 03: Esquema del ciclo diario de brisas

FUENTE: Proyecto final de Carrera, Remón



### 2.7.3 Escala Sinóptica

Esta escala meteorológica describe los fenómenos definidos por un rango espacial de cientos a miles de kilómetros y cuyos procesos tienen una duración de días. Esta es la escala que mayormente se utiliza, para los pronósticos de tiempo o estudios de algún evento en concreto. Se puede observar fenómenos como núcleos de altas presiones (anticiclones), de bajas (ciclones), frentes de diferentes tipos (cálidos, fríos, ocluidos, estacionales), etc. En la figura 04, se observa un ejemplo de mapa sinóptico de presión y espesores.

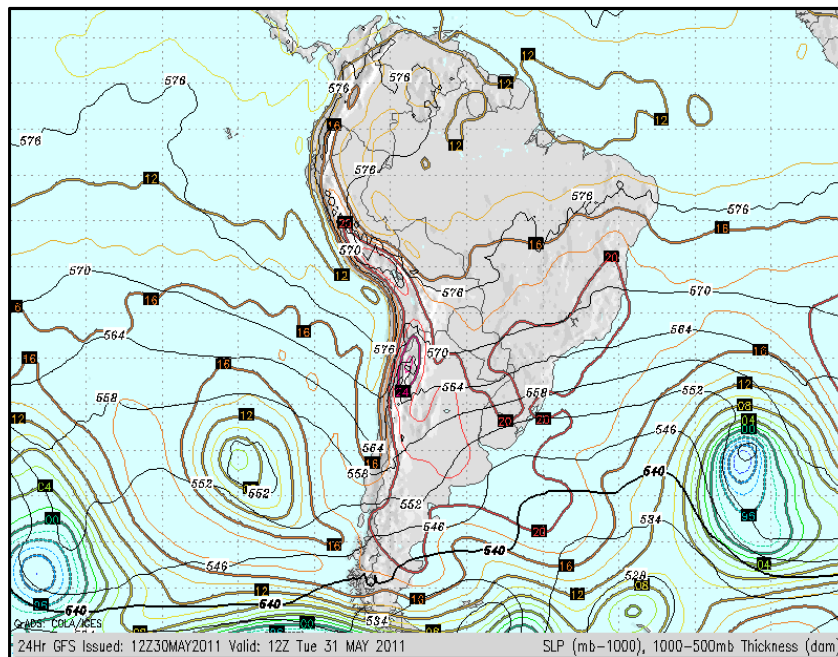


Figura 04: Ejemplo del mapa sinóptico de presión y espesores de 1000-500 mb

FUENTE: Proyecto final de Carrera, Remón

### 2.7.4 Escala Global

Esta escala describe los fenómenos que abarcan todo o gran parte del planeta y siendo su rango temporal muy extenso (semanas, meses o incluso estaciones). Los fenómenos que se pueden encontrar en esta escala son la corriente de chorro (jet stream), el fenómeno de El Niño, o la célula circulatoria de Hadley (ver figura 05).

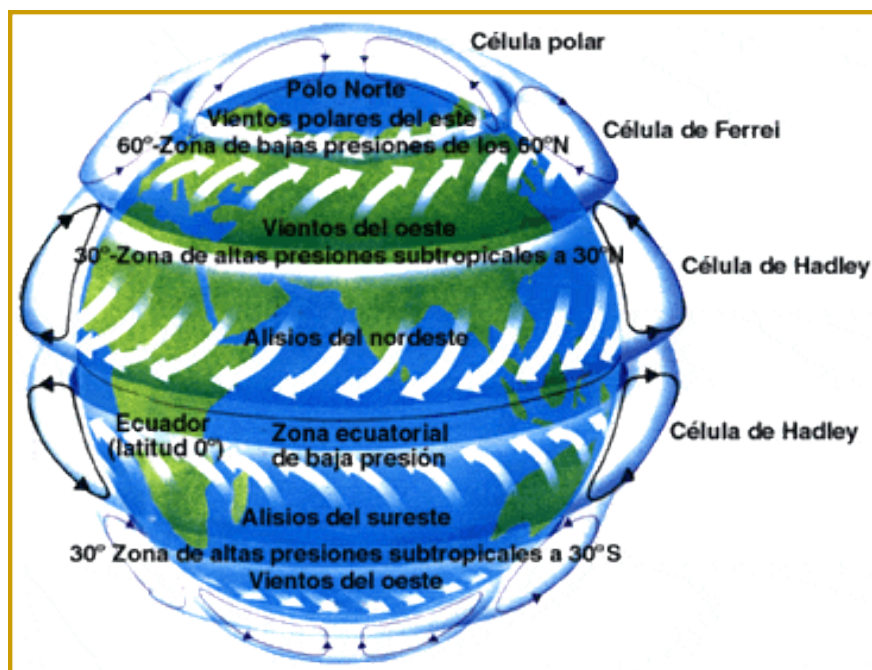


Figura 05: Esquema de las células de Hadley

FUENTE: Proyecto final de Carrera, Remón

En Tabla 02, se describe las escalas espaciales y temporales de las diferentes escalas meteorológicas.

Tabla 02: Resumen de las diferentes escalas meteorológicas

| Escala      | Dimensión Espacial           | Dimensión Temporal | Algunos Eventos                               |
|-------------|------------------------------|--------------------|---|
| Global      | Miles de Kms a todo el globo | Semanas a Meses    | Alisios, vientos del oeste, ondas planetarias |
| Sinóptica   | Cientos a miles de Kms       | Días a semanas     | Ciclones, anticiclones, frentes, huracanes    |
| Mesoescala  | Uno a cientos de Kms         | 1 hora a 2 días    | Brisas de mar, montaña, tormentas, tornados   |
| Microescala | Cm a metros                  | Minutos            | Turbulencia, remolinos, ráfagas de polvo      |

## 2.8 Patrones de circulación sinóptica en Sudamérica

### 2.8.1 Baja Tropósfera

#### 2.8.1.1 Anticiclón del Pacífico Sur (APS)

En el pacífico sur se encuentra esta célula de alta presión de núcleo cálido semipermanente (Anticiclón del Pacífico Sur-APS), que está bloqueada por la cordillera de los Andes evitando que se desplace hacia el este. Las presiones centrales oscilan entre los 1 020 mb en Abril y 1 026 mb en Octubre. La APS tiene un flujo de salida divergente que tiene una influencia en las regiones costeras de Perú y Chile. En los rangos de 10 y 30° S, los vientos en superficie tienen una dirección sur y suroeste. En los 30 y 45° S, el núcleo se encuentra más al sur en verano, haciendo que la superficie de salida gire hacia el ecuador; mientras que en invierno el núcleo se posiciona más al norte, haciendo que la superficie de salida gire hacia los polos. Al sur de los 45° S, la cordillera de los Andes ya no influye tanto en los vientos de bajo nivel, variando estos de noroeste a suroeste. (SOUTH AMERICA - South of the Amazon River). El APS, que tiene una circulación de sur a norte transporta la humedad existente hacia las costas, donde se condensa en forma de nubes bajas, con alto contenido de humedad atmosférica. Cuando se intensifica el anticiclón, tenemos mayor afloramiento y presencia de temperaturas bajas. En la Figura 06, se muestra la variación del APS para los meses de enero, abril, julio y octubre.

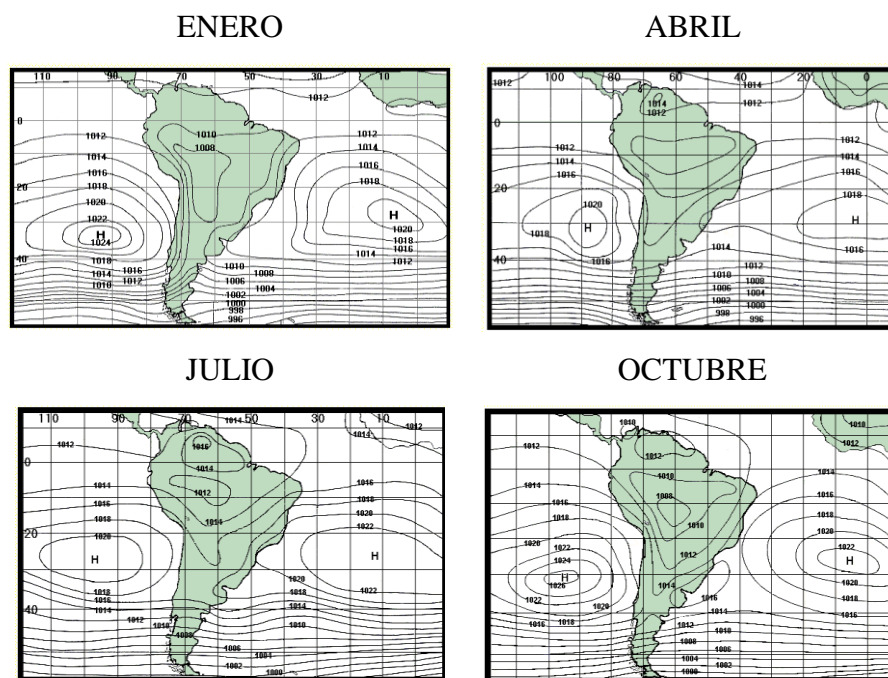


Figura 06: Variación del Anticiclón del Pacifico Sur

FUENTE: SOUTH AMERICA - South of the Amazon River (Agosto, 1992)

### 2.8.1.2 Zona de convergencia Intertropical (ZCIT)

García, Cárdenas y Perdonó (2003) indicaron que la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT, o sus siglas en inglés ITCZ), se origina en la zona donde convergen los vientos

alisios en la franja ecuatorial, por la incidencia de los rayos solares que caen más o menos perpendicular durante todo el año. Lo que genera en esta franja inestabilidad, nubosidad y precipitaciones sobre los océanos y continentes.

La Zona de Convergencia Intertropical también se le conoce con otros nombres: vaguada ecuatorial (VE), convergencia de los alisios cerca del ecuador, Confluencia Intertropical (ITC), eje ecuatorial de inestabilidad, frente intertropical, frente o vaguada monzónica, etc.

Las asimetrías climáticas son prominentes en el Pacífico Tropical Oriental y en el Océano Atlántico. Aquí se pueden encontrar, al norte del ecuador, las máximas temperaturas de la superficie del mar, nubosidad y precipitaciones. Esto ocurre como consecuencia de una serie de interacciones entre el océano, la atmósfera y la geometría de los continentes, determinando las longitudes en las cuales las interacciones son efectivas y en cual hemisferio se localizan las aguas más cálidas y la ITCZ (Gutiérrez et al., 2005). En la figura 07, se observa la variación ITCZ para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera.

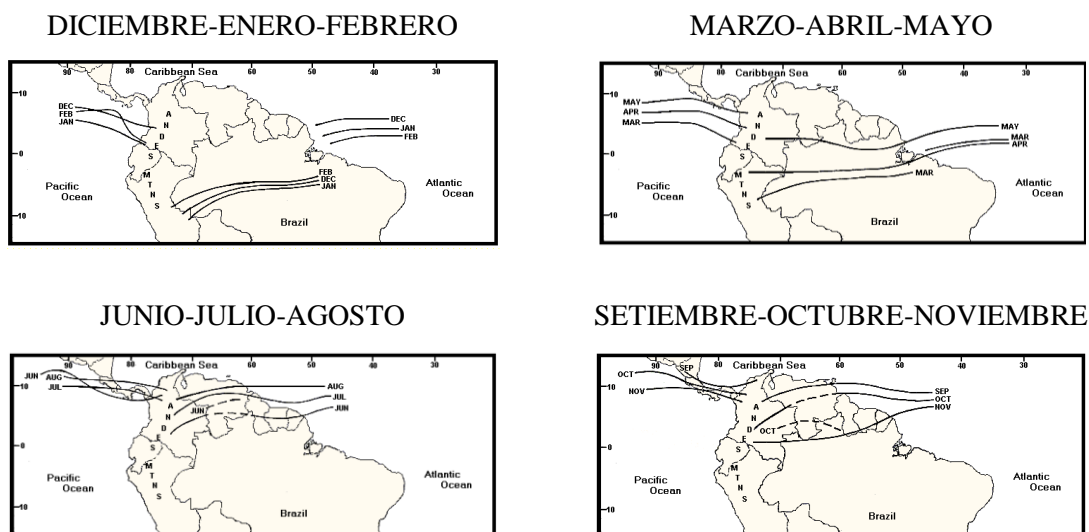


Figura 07: Variación de la Vaguada Ecuatorial

FUENTE: SOUTH AMERICA - South of the Amazon River (Agosto, 1992)

## 2.8.2 Alta Tropósfera

### 2.8.2.1 Alta de Bolivia (AB)

La circulación general de la alta tropósfera sobre Sudamérica ha sido muy estudiada en los últimos años (Santos, 1986; Carvalho, 1989; entre otros). Es un sistema de media y alta tropósfera, que se genera a través de la combinación del calentamiento sobre las montañas

de los Andes y altiplano boliviano, la fuerte convección, condensación y liberación de calor latente sobre la cuenca occidental de la Amazonia. Su mayor intensificación es diciembre y presenta características importantes hasta marzo. Siendo menos intensa en abril y desplazándose hacia el norte. Los vientos en el centro son ligeros entre 5 a 10 nudos en 200 hPa, mientras que alrededor llegan a unos 30 nudos. La AB posee vientos superiores al jet subtropical, siendo ambos participes para el desarrollo de tormentas.

La Alta de Bolivia posee un giro anti-horario y un núcleo cálido, en niveles altos es la única fuente de vientos del este y se ubica al sur, entre la Amazonía, el norte de Bolivia, Brasil y Perú (oriental y occidental). (SOUTH AMERICA - South of the Amazon River, 1992). Su formación en parte se debe a la convergencia de humedad en bajos niveles que van de noreste y del este de Bolivia. En la figura 08, se observa la variación de la AB para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera, teniendo como meses representativos a enero, abril, julio y octubre, respectivamente.

#### **2.8.2.2 Vaguada del Noreste de Brasil (VNB)**

Sistema de núcleo frío en alta tropósfera sobre una vaguada, extendiéndose desde el sur del Atlántico al noreste de Brasil, que está al este de la AB. El flujo entre la AB y la VNB contribuye a la precipitación en los trópicos al traer perturbaciones de nivel superior y de niveles bajos hacia el área. Dicho sistema se presenta en verano, con máxima amplitud entre noviembre-marzo. En la figura 08, se observa el esquema VNB acompañada de la AB.

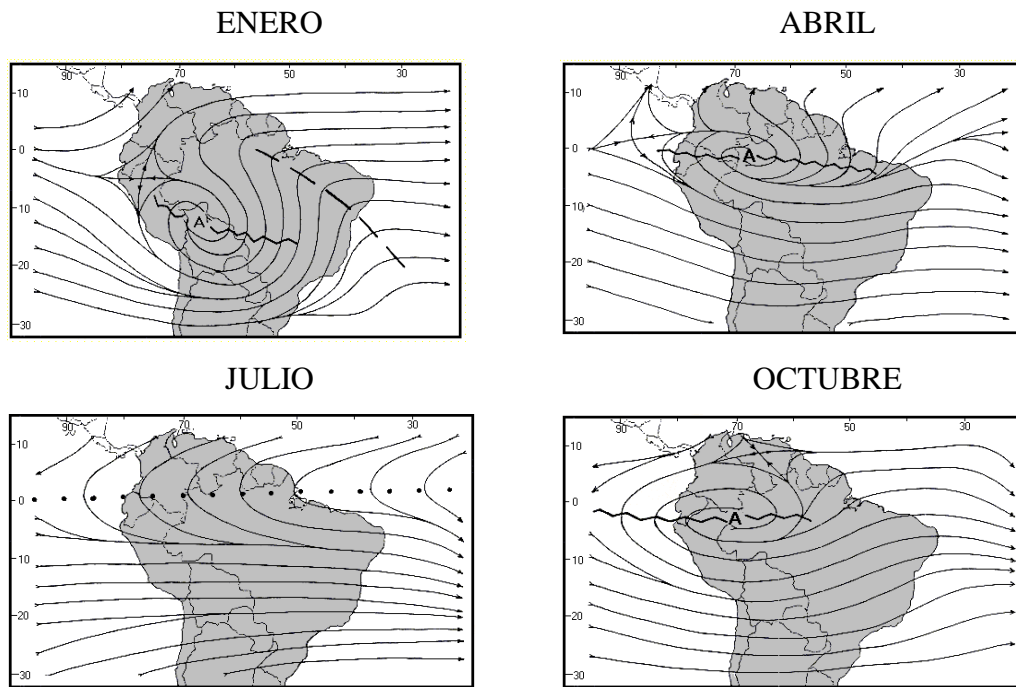


Figura 08: Variación de la Alta de Bolivia y la Vaguada del Norte de Brasil  
 FUENTE: SOUTH AMERICA - South of the Amazon River (Agosto, 1992)

## 2.9 Tipos de modelos numéricos de predicción del tiempo

Los modelos numéricos de predicción del tiempo son abstracciones de representaciones del mundo real aplicadas al tratamiento predictivo, aplicando funciones aproximadas del comportamiento de las propiedades que se quieren estudiar y juegan un papel clave en el proceso de la predicción del tiempo.

### 2.9.1 Modelos Globales de Circulación General

Los modelos globales tienen como prioridad la simulación del flujo de circulación general atmosférica, por tanto, su rejilla de integración debe cubrir toda la Tierra. Se usan principalmente para predicciones a medio plazo, estacionales y climáticas ya que no necesitan ningún dato externo (salvo las condiciones iniciales) para realizar las predicciones. Esta es una gran ventaja, sin embargo, su principal desventaja es que necesitan una gran infraestructura de mantenimiento. Para tener una resolución horizontal adecuada (entre 50 y 80 km) el número de nodos de la rejilla de integración es tan grande que se necesitan ordenadores muy potentes para poder integrarlos.

Se debe resaltar que la cobertura global necesita observaciones de todo el planeta para su asimilación. Como la información de las observaciones es muy desigual, los resultados de dichos modelos dependen mucho de la zona del globo que se considere. Algunos ejemplos de modelos globales:

- European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF)
- Global Forecast System (GFS)

### **2.9.2 Modelos Regionales**

Los modelos regionales tienen características semejantes a los modelos globales, pero solo abarcan una región del globo. Lo cual permite aprovechar los recursos de computación en mejorar la resolución espacial de los cálculos, es decir usar grillas de punto más cercanos.

Debido a su mayor resolución, los modelos regionales tienen una mayor exactitud para reproducir fenómenos de pequeña escala como las tormentas, y también tienen una mejora en la parte orográfica. Estos tipos de modelos requieren de condiciones iniciales, y condiciones de contorno en las fronteras del dominio. Por lo mismo, el modelo regional puede heredar deficiencias del modelo global que proporciona las condiciones de frontera. (IGP, Ken Takahashi). Algunos ejemplos de modelos regionales:

- PSU/NCAR Mesoscale Model versión 5 (MM5)
- ICTP Regional Climate Model (RegCM)
- Weather Research and Forecasting Model (WRF)
- Workstation Eta model
- Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS)

### **2.10 Precipitación**

La precipitación puede adquirir diferentes formas, dependiendo si la condensación del vapor de agua atmosférico se formó en aire libre o en la superficie de la tierra y también de las condiciones locales. Puede ser lluvia, llovizna, granizada, etc. Según la manera en que se ha elevado el aire, por uno o varios factores se puede clasificar en convectivas, orográficas o de convección forzada, ciclónicas, frontales, etc. En la sierra de Perú, suele predominar las precipitaciones de origen orográfico (se presenta cuando hay un choque de las corrientes de aire con las cadenas montañosas, lo cual puede producir precipitaciones en situaciones de inestabilidad condicional debido a que el aire asciende); a diferencia de la

selva, donde la mayoría de los casos es por origen convectivo (producto del ascenso por diferencia de densidad del aire válido y húmedo de la superficie). (García, 1994)

### **2.10.1 Lluvia**

Consiste en gotas de agua líquida y son generalmente mayores a 5 mm de diámetro, que caen a diferentes velocidades (desde “débil” hasta “violenta”) que pueden variar de 1,5 mm/h a más de 50 mm/h.

## **2.11 Estimación de umbrales de lluvia por percentiles**

Para establecer la peligrosidad de un evento meteorológico, es necesario establecer umbrales con criterios climatológicos que facilita la clasificación de un evento o fenómeno meteorológico adverso. Según el Servicio Meteorológico Español (AEMET) un fenómeno meteorológico adverso se caracteriza por su “rareza”, que en términos estadísticos se entiende como “menos probable”. De acuerdo con el IPCC (Climate Change 2007, Working Group I: The Physical Science Basis) un fenómeno meteorológico adverso o extremo es un evento “raro” en un momento y lugar de terminado. Existe un consenso, que un fenómeno meteorológico extremo puede ser normalmente más “raro” que el percentil 10 o 90 de la función de densidad de probabilidad observada, lo que genera un índice climático de lluvias extremas (Alfaro, 2014). Para estimar umbrales de precipitación es recomendable el uso de estimaciones empíricas, que muestre el promedio o los valores extremos en la precipitación.

### **2.9.1 Umbrales de lluvia**

Alfaro (2014) menciona que el equipo de expertos sobre detección del cambio climático y los índices (ETCCDI por sus siglas en ingles), consideran que los días muy lluviosos (muy fuertes) son aquellos donde su precipitación supera el percentil 95 (p95), mientras que los días extremadamente lluviosos (extremadamente fuertes) son los que sobrepasen el percentil 99 (p99). Para el European Climate Assessment, los días moderadamente lluviosos, son considerados desde el percentil 75 (p75) y este percentil es usado como umbral, para indicar que los valores debajo de ese umbral deben ser considerados datos normales de lluvia (PP). Como resaltan diferentes investigadores, esta clasificación es una de “abundancia” más que de intensidad que ayuda a los pronosticadores a tener un criterio a la hora de clasificar el total acumulado en 24 horas, más que evaluar la intensidad. La caracterización se muestra en la tabla 03.



Tabla 03: Caracterización de extremos de precipitación

| Umbrales de precipitación      | Caracterización de lluvia extrema |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| PP/día > p99 (Percentil 99)    | Extremadamente lluvioso           |
| $p95 < \text{PP/día} \leq p99$ | Muy Lluvioso                      |
| $p90 < \text{PP/día} \leq p95$ | Lluvioso                          |
| $p75 < \text{PP/día} \leq p90$ | Moderadamente lluvioso            |

## 2.9.2 Función empírica de probabilidad y estimación de percentiles

El percentil es el valor que divide a un grupo ordenado de datos estadísticos de forma que un porcentaje de tales datos este por debajo de dicho valor (RAE). La estimación empírica de percentiles es el ordenamiento de los valores históricos de mayor a menor, por ejemplo, si tenemos 30 valores de datos, los 10 valores más bajos son el tercil inferior, los 10 mayores son el tercil superior y los valores medios se relacionan con el tercil medio. (De los Milagros, et al., 2005).

Según De los Milagros (2005), es necesario realizar un remuestro, para poder reducir la variabilidad y la sensibilidad que se tendría con los valores extremos de la serie histórica. Por otro lado, el remuestro permite obtener intervalos de confianza para los percentiles y con el método de “tilting” (es un método de aproximación no paramétrica que puede entenderse como una generalización de la metodología de verosimilitud empírica, que construir regiones de confianza, donde las observaciones son ponderadas para minimizar una función de distancia) se puede obtener intervalos más confiables con una cantidad reducida de datos. Para el cálculo de percentiles para la variable de precipitación, se recomienda los métodos de cálculo empírico, ajuste de función gamma y logsplines.

## 2.12 Modelo conceptual

Un modelo conceptual meteorológico (MCM) «es una descripción cualitativa o semicuantitativa que incorpora una comprensión de la estructura, el mecanismo y el tiempo de vida de algún fenómeno meteorológico. Implica que previamente el fenómeno ha sido reconocido y nombrado». Según esta definición, primero se necesita identificar el fenómeno para poder elaborar un MCM. Se puede decir que el aspecto más expuesto de un modelo conceptual sea definir el tiempo de vida del fenómeno, donde se ve involucrado la coordenada tiempo y por ello se puede decir que tiene un carácter predictivo.

Según la acción de la Unión Europea COST 78 (2001), un MCM ha de proporcionar una serie de elementos:

- Definición del fenómeno: características reconocibles en observaciones, análisis y simulaciones validadas.
- Descripción del ciclo de vida: aspecto, tamaño, intensidad y tiempo asociado.
- Establecimiento de los procesos físicos fundamentales: evolución del fenómeno.
- Especificación de los campos meteorológicos clave para explicar los procesos.
- Orientación para la predicción del desplazamiento y evolución de los fenómenos.
- Orientación para la predicción de las condiciones meteorológicas complementando las salidas de los modelos numéricos de predicción.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Materiales**

##### **3.1.1 Zona de Estudio**

Para el análisis del presente trabajo, donde se observa el comportamiento de las lluvias en base a los patrones sinópticos presentes, se tomó en cuenta las siguientes áreas (Figura 09):

La primera línea (verde continúa) que abarca una parte Sudamérica desde los 15°N a 50°S latitud y 110°W a 20°W longitud, donde se hace un análisis general de los patrones de circulación a escala sinóptica para los 20 casos identificados y luego para el promedio de patrones que tienen comportamiento similar

La segunda línea (celeste entrecortada) es un área más pequeña que abarca de 5°N a 30°S latitud y 90°W a 50°W, es donde se observa el transporte de la humedad desde la amazonia a los Andes, o en un enfoque general la presencia o ausencia de la humedad.

Para las precipitaciones, la región de análisis es la línea roja continua que abarca la sierra sur (occidental y oriental) de la cordillera sur de los Andes, considerando estaciones por encima de los 3500 msnm de las regiones de Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Arequipa, Puno, Moquegua y Tacna.

##### **3.1.2 Información de estaciones meteorológicas**

Se trabajó con información de precipitaciones de las estaciones automáticas y convencionales de SENAMHI con datos mayores a 30 años y para el periodo de estudio que corresponde del 2008 al 2012. Luego se seleccionaron estaciones de la región andina, que se extiende entre los 3 500 y 6 000 msnm (figura 01), quedando al final 57 estaciones con las que se trabajó para identificar eventos extremos de lluvias, ubicándose en Huancavelica (1 estación), Cusco (4 estaciones), Arequipa (13 estaciones), Puno (32 estaciones), Moquegua (1 estación) y Tacna (6 estaciones).

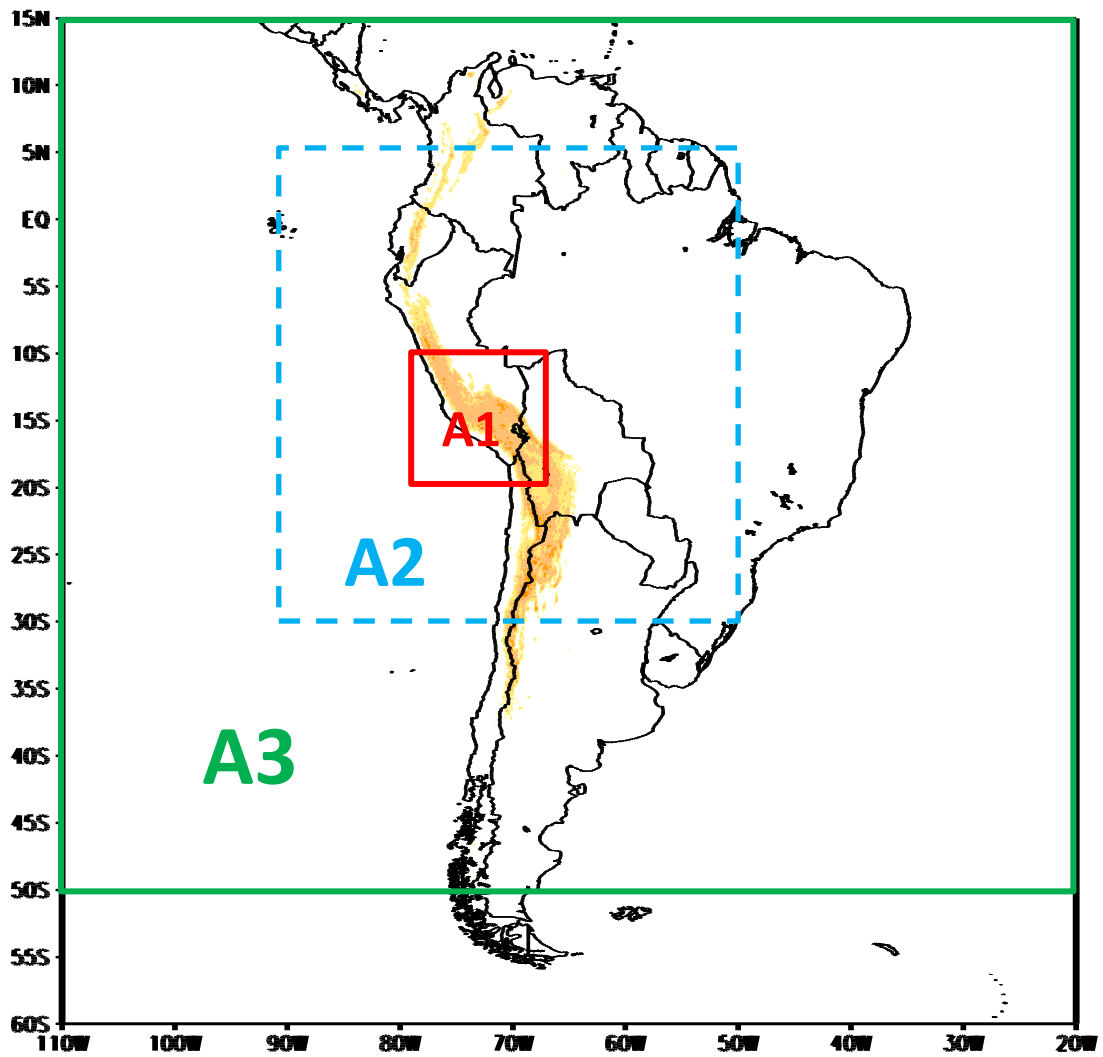


Figura 09: Zona de Estudio y Área sur del Perú

FUENTE: Elaboración Propia

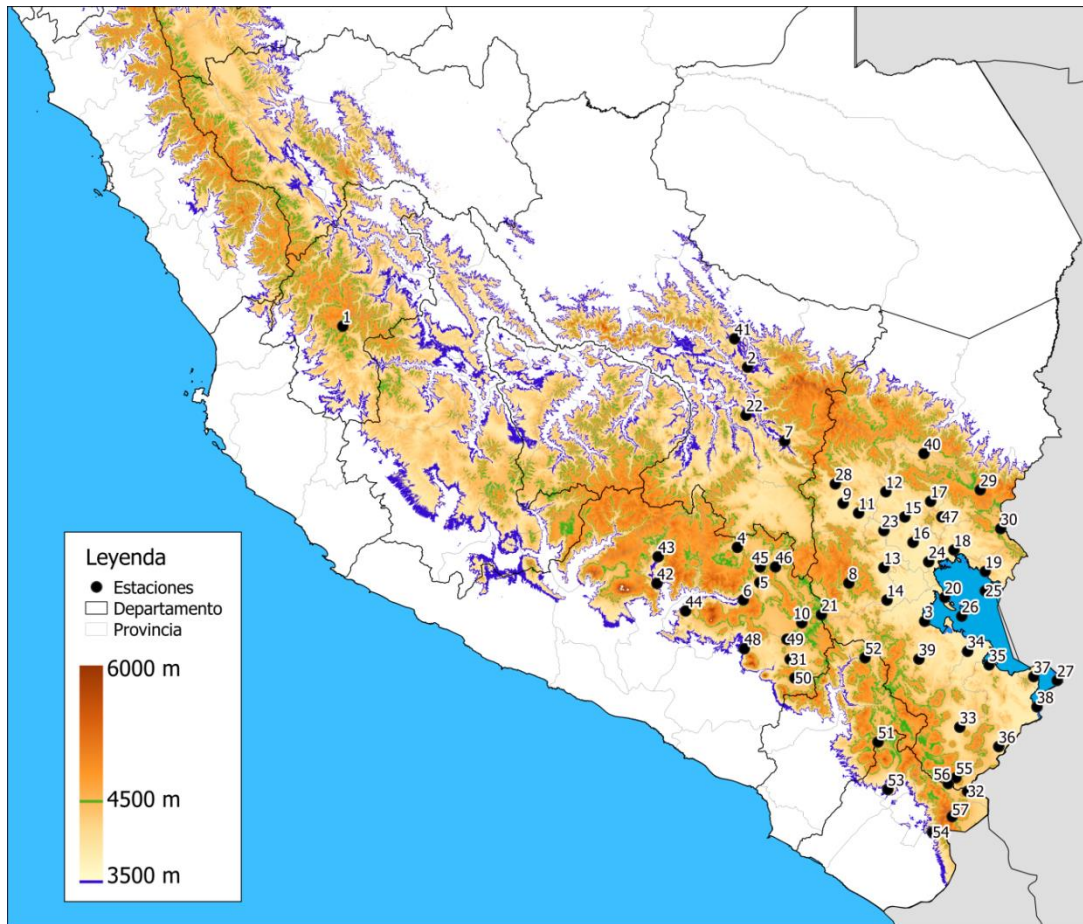


Figura 10: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas de SENAMHI (Ver Tabla 04)

FUENTE: Elaboración Propia

Tabla 04: Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de SENAMHI

| N° | DEPARTAMENTO | ESTACIÓN       | LONGITUD | LATITUD | ALTITUD |
|----|--------------|----------------|----------|---------|---------|
| 1  | HUANCAVELICA | TUNELCERO      | -13.254  | -75.085 | 4475    |
| 2  | CUSCO        | CCATCCA        | -13.610  | -71.560 | 3693    |
| 3  | PUNO         | PUNO           | -15.823  | -70.018 | 3840    |
| 4  | AREQUIPA     | LAANGOSTURA    | -15.180  | -71.649 | 4256    |
| 5  | AREQUIPA     | SIBAYO         | -15.486  | -71.453 | 3827    |
| 6  | AREQUIPA     | CHIVAY         | -15.638  | -71.597 | 3661    |
| 7  | CUSCO        | SICUANI        | -14.254  | -71.237 | 3574    |
| 8  | PUNO         | PAMPAHUTA      | -15.491  | -70.678 | 4320    |
| 9  | PUNO         | CHUQUIBAMBILLA | -14.796  | -70.728 | 3910    |
| 10 | AREQUIPA     | IMATA          | -15.837  | -71.088 | 4445    |
| 11 | PUNO         | AYAVIRI        | -14.881  | -70.593 | 3920    |
| 12 | PUNO         | PROGRESO       | -14.695  | -70.356 | 3905    |
| 13 | PUNO         | LAMPA          | -15.356  | -70.373 | 3900    |
| 14 | PUNO         | CABANILLAS     | -15.639  | -70.346 | 3890    |
| 15 | PUNO         | AZANGARO       | -14.915  | -70.191 | 3863    |

Continuación...

|           |             |                 |                |                |             |
|-----------|-------------|-----------------|----------------|----------------|-------------|
| <b>16</b> | <b>PUNO</b> | <b>ARAPA</b>    | <b>-15.136</b> | <b>-70.119</b> | <b>3920</b> |
| <b>17</b> | PUNO        | MUNANI          | -14.779        | -69.966        | 4119        |
| <b>18</b> | PUNO        | HUANCANE        | -15.203        | -69.763        | 3860        |
| <b>19</b> | PUNO        | HUARAYAMOHO     | -15.390        | -69.491        | 3890        |
| <b>20</b> | PUNO        | CAPACHICA       | -15.616        | -69.844        | 3819        |
| <b>21</b> | PUNO        | CRUCEROALTO     | -15.767        | -70.917        | 4470        |
| <b>22</b> | CUSCO       | POMACANCHI      | -14.028        | -71.573        | 3686        |
| <b>23</b> | PUNO        | PUCARA          | -15.034        | -70.373        | 3885        |
| <b>24</b> | PUNO        | TARACO          | -15.305        | -69.983        | 3820        |
| <b>25</b> | PUNO        | ISLASOTO        | -15.559        | -69.491        | 3853        |
| <b>26</b> | PUNO        | ISLATAQUILE     | -15.779        | -69.695        | 3815        |
| <b>27</b> | PUNO        | ISLASUANA       | -16.339        | -68.864        | 3845        |
| <b>28</b> | PUNO        | SANTAROSA       | -14.627        | -70.796        | 3940        |
| <b>29</b> | PUNO        | ANANEA          | -14.679        | -69.534        | 4660        |
| <b>30</b> | PUNO        | COJATA          | -15.017        | -69.356        | 4344        |
| <b>31</b> | AREQUIPA    | ELFRAYLE        | -16.155        | -71.189        | 4119        |
| <b>32</b> | TACNA       | CHUAPALCA       | -17.305        | -69.644        | 4177        |
| <b>33</b> | PUNO        | MAZOCRUZ        | -16.746        | -69.712        | 3970        |
| <b>34</b> | PUNO        | ILAVE           | -16.085        | -69.644        | 3850        |
| <b>35</b> | PUNO        | JULI            | -16.203        | -69.457        | 3825        |
| <b>36</b> | PUNO        | PIZACOMA        | -16.915        | -69.373        | 3940        |
| <b>37</b> | PUNO        | TAHUACO-YUNGUYO | -16.305        | -69.068        | 3860        |
| <b>38</b> | PUNO        | DESAGUADERO     | -16.569        | -69.040        | 3860        |
| <b>39</b> | PUNO        | LARAQUERI       | -16.153        | -70.068        | 3970        |
| <b>40</b> | PUNO        | CRUCERO         | -14.363        | -70.024        | 4130        |
| <b>41</b> | CUSCO       | COLQUEPATA      | -13.363        | -71.673        | 3699        |
| <b>42</b> | AREQUIPA    | ANDAHUA         | -15.494        | -72.349        | 3528        |
| <b>43</b> | AREQUIPA    | ORCOPAMPA       | -15.261        | -72.339        | 3801        |
| <b>44</b> | AREQUIPA    | HUAMBO          | -15.734        | -72.100        | 3500        |
| <b>45</b> | AREQUIPA    | TISCO           | -15.350        | -71.450        | 4175        |
| <b>46</b> | AREQUIPA    | PORPERA         | -15.350        | -71.317        | 4152        |
| <b>47</b> | PUNO        | PUTINA          | -14.915        | -69.868        | 3878        |
| <b>48</b> | AREQUIPA    | PAMPADEARRIEROS | -16.063        | -71.589        | 3715        |
| <b>49</b> | AREQUIPA    | PILLONES        | -15.981        | -71.217        | 4431        |
| <b>50</b> | AREQUIPA    | LASSALINAS      | -16.318        | -71.148        | 4322        |
| <b>51</b> | TACNA       | PAMPAUMALZO     | -16.875        | -70.424        | 4609        |
| <b>52</b> | MOQUEGUA    | ICHUNA          | -16.141        | -70.537        | 3792        |
| <b>53</b> | TACNA       | CAIRANI         | -17.288        | -70.339        | 3920        |
| <b>54</b> | TACNA       | TOQUELA         | -17.661        | -69.949        | 3566        |
| <b>55</b> | PUNO        | CAPAZO          | -17.186        | -69.746        | 4419        |
| <b>56</b> | TACNA       | CHALLAPALCA     | -17.237        | -69.813        | 4280        |
| <b>57</b> | TACNA       | PAUCARANI       | -17.525        | -69.779        | 4556        |

FUENTE: SENAMHI-PERU

### 3.1.3 Modelo numérico

Se utilizó el análisis del GFS (Global Forecast System) con 1° de resolución horizontal, 26 niveles de presión y variación temporal de 6 h para el periodo de diciembre a marzo del 2008 al 2012 de tiempo. Para la realización de los gráficos se utilizó el visualizador de GrADS.

Para la realización de los patrones sinópticos se decidió trabajar con los datos de análisis que mejor representan las condiciones reales de la atmósfera, lo cual ayudará a verificar los patrones que se encuentran presentes en las fechas para los eventos extremos.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Establecer umbrales de lluvias mediante la metodología de percentiles:

Para realizar el primer objetivo específico, se seguirán los siguientes pasos:

#### a) Estimación empírica de los percentiles 90, 95 y 99

Para determinar los percentiles de las 57 estaciones, se usará el método planteado por **Alfaro (2014)**, que se aplicó en las estaciones de Yurimaguas, Tumbes, Aeropuerto internacional Jorge Chávez y Juliaca. Donde nos indica considerar “lluvia diaria” a las precipitaciones con acumulados diarios que sean mayor a 0,1 mm, para el cálculo del percentil. Así mismo, también nos sugiere que para los valores atípicos se debe excluir los años 1982 y 1983 que fueron los eventos “El Niño”, para que no se vea reflejado en la función empírica de probabilidad. Para el cálculo de percentiles se consideraron los siguientes pasos:

- a) Excluir el dato más alto de la serie.
- b) Excluir los días que se registraron trazas.
- c) Considerar como día de precipitación cuando supere 0,1 mm.
- d) Usar la función PERCENTIL.INC del *software* Excel.

#### b) Identificar los días superiores a los percentiles 90, 95 y 99

Luego de estimar los percentiles para las 57 estaciones, se procedió a separar las fechas que fueron superiores a los percentiles 90, 95 y 99, finalizando con la elección de 20 fechas que son los casos de estudio. Se siguió los siguientes pasos:

- Primero se seleccionaron las fechas que fueron superiores al percentil 75, cabe indicar que este percentil se le conoce como umbral de días que si se presentaron lluvias.
- Luego se filtró las fechas donde eran superiores a los percentiles 90 y 95.
- Por último, se seleccionó 20 fechas donde hubo el mayor registro de estaciones que superan el percentil 99.

**c) Identificar los patrones de circulación para los 20 casos seleccionados.**

Para determinar los patrones sinópticos que influyen en las lluvias extremas al sur de Perú, se utilizó los datos del modelo GFS (Global Forecast System), con lo cual se analizó la configuración y el posicionamiento de los sistemas atmosféricos en niveles altos (200 y 300 hPa), nivel medio (550 hPa) y nivel bajo (850 hPa).

Para determinar las condiciones sinópticas en niveles altos y medios, se tiene en cuenta que el día del evento es considerado día “D”, las 06 horas antes “D-1” y las 12 horas antes “D-2”. Se analizó las siguientes variables:

- Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa.
- Vientos y divergencia en 200 hPa.
- Relación de mezcla en 550 hPa del día D, D-1 y D-2.
- Jet de bajos niveles a 850 hPa.

Se observaron condiciones sinópticas que tuvieron características similares, luego se seleccionaron los grupos de manera subjetiva y visual, obteniendo con resultado final 6 grupos, que favorecen la lluvia extrema en la sierra sur.

**d) Promedio de los casos para establecer los modelos conceptuales.**

Según Garreaud (2000), la precipitación en el Altiplano que se da en verano es favorecido por flujos del este en niveles medios y altos que transportan la humedad desde el interior del continente hasta los Andes centrales. También la Alta de Bolivia (AB) es un sistema que favorece la precipitación en verano.

Por ello, con los 6 grupos se realizó la identificación de configuraciones típicas, promedio de viento, relación de mezcla, humedad específica, altura geopotencial, agua precipitable y presión a nivel de mar. También, se graficó la radiación de onda larga emergente (ROL) medido por la NOAA de órbita polar, con una resolución de



2,5° en latitud y longitud, que nos ayudó a identificar sistemas de convección profunda.

Se analizó anomalías de ROL y relación de mezcla (550 hPa), en ambos análisis se agregó el promedio de cada grupo y el promedio climático de la variable altura geopotencial a un nivel de 300 hPa. Se graficó de la siguiente manera:

#### NIVELES ALTOS:

- a) Altura geopotencial a 200 hPa.
- b) Viento a 200 hPa.

#### NIVELES MEDIOS:

- a) Viento e intensidad a 500 hPa.
- b) Altura Geopotencial a 500 hPa.
- c) Relación de mezcla a 500 hPa.
- d) Relación de mezcla a 550 hPa.

#### NIVELES BAJOS:

- a) Viento e intensidad a 850 hPa.
- b) Relación de mezcla a 850 hPa.
- c) Radiación de onda larga (ROL).
- d) Anomalía de ROL y altura geopotencial.
- e) Anomalía de relación de mezcla y altura geopotencial.
- f) Agua precipitable.
- g) Presión a nivel de mar.
- h) Corte latitudinal de humedad específica, velocidad vertical y viento resultante.
- i) Casos donde el jet del norte de bajos niveles está presente.

### **3.2.2 Establecer mecanismos físicos de la ocurrencia de lluvias extremas.**

Para conocer los mecanismos físicos que se interrelacionan entre la alta y baja tropósfera, se realizaron cortes longitudinales que facilitaron la visualización del comportamiento de la estructura vertical de la atmósfera. En estos cortes se observó la relación directa o indirecta de niveles altos y bajos, observando el comportamiento de los vientos y la humedad de la atmósfera.

La interacción de los vientos desde niveles bajos y de niveles altos, confluyendo por encima de la cordillera, nos señalan que estas lluvias se presentaron por movimientos verticales de ascenso orográfico y convección.

### **3.2.3 Establecer modelos conceptuales de patrones de circulación sinóptica en ocurrencia de eventos extremos de lluvias.**

Para obtener el modelo conceptual de los patrones sinópticos nos basamos en la información de las configuraciones típicas del evento durante el análisis, es decir identificamos la estructura y mecanismo para la formación de lluvias extremas en la sierra sur.

Luego de establecer el análisis de las conexiones de las diferentes variables para la participación en dicho evento, se procedió a analizar la interacción de los diferentes sistemas meteorológicos de niveles altos, medios y bajos, para finalmente obtener los modelos conceptuales con fines de pronósticos.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Establecer umbrales de lluvias mediante la metodología de percentiles

#### 4.1.1 Estimación empírica de los percentiles 90, 95 y 99

Utilizando la metodología de Alfaro (2014), se calculó el percentil 75 (p75), percentil 90 (p90), percentil 95 (p95) y percentil 99 (p99) para las 57 estaciones ubicadas en el área de estudio, teniendo en cuenta que los meses en que se calculó los percentiles fueron enero, febrero, marzo y diciembre.

Los valores obtenidos de los p90, p95 y p99 de las 57 para los 4 meses del año, muestran su comportamiento y valores máximos que se llega en cada estación. Para ello se dividió en dos grupos, grupo A (29 estaciones) y grupo B (28 estaciones), presentándose en la siguiente tabla:

Tabla 05: Estaciones en 2 grupos

| <b>Grupo A</b>        | <b>Grupo B</b>         |
|-----------------------|------------------------|
| <b>TUNELCERO</b>      | <b>COJATA</b>          |
| <b>CCATCCA</b>        | <b>ELFRAYLE</b>        |
| <b>PUNO</b>           | <b>CHUAPALCA</b>       |
| <b>LA ANGOSTURA</b>   | <b>MAZOCRUZ</b>        |
| <b>SIBAYO</b>         | <b>ILAVE</b>           |
| <b>CHIVAY</b>         | <b>JULI</b>            |
| <b>SICUANI</b>        | <b>PIZACOMA</b>        |
| <b>PAMPAHUTA</b>      | <b>TAHUACO-YUNGUYO</b> |
| <b>CHUQUIBAMBILLA</b> | <b>DESAGUADERO</b>     |
| <b>IMATA</b>          | <b>LARAQUERI</b>       |
| <b>AYAVIRI</b>        | <b>CRUCERO</b>         |
| <b>PROGRESO</b>       | <b>COLQUEPATA</b>      |
| <b>LAMPA</b>          | <b>ANDAHUA</b>         |
| <b>CABANILLAS</b>     | <b>ORCOPAMPA</b>       |
| <b>AZANGARO</b>       | <b>HUAMBO</b>          |
| <b>ARAPA</b>          | <b>TISCO</b>           |
| <b>MUNANI</b>         | <b>PORPERA</b>         |

Continuación...

|              |                   |
|--------------|-------------------|
| HUANCANE     | PUTINA            |
| HUARAYA MOHO | PAMPA DE ARRIEROS |
| CAPACHICA    | PILLONES          |
| CRUCERO ALTO | LAS SALINAS       |
| POMACANCHI   | PAMPA UMALZO      |
| PUCARA       | ICHUNA            |
| TARACO       | CAIRANI           |
| ISLA SOTO    | TOQUELA           |
| ISLA TAQUILE | CAPAZO            |
| ISLA SUANA   | CHALLAPALCA       |
| SANTA ROSA   | PAUCARANI         |
| ANANEA       |                   |

En las figuras 11 y 12, presenta los percentiles calculados para el mes de enero, presentando el valor mayor es 58,2 mm/día para el p99 en la estación de Isla Taquile, seguido por la estación Isla Soto con 56,2 mm/día y para el p90 el valor más bajo es de 8,6 mm/día en la estación Cairani.

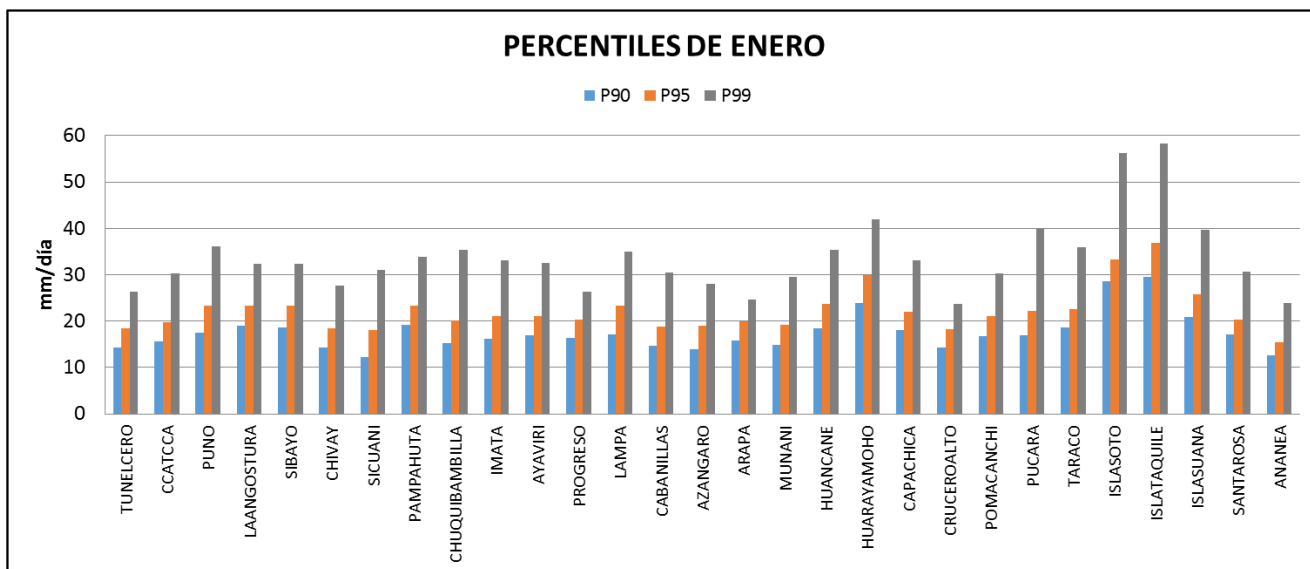


Figura 11: Percentiles del mes de enero grupo A

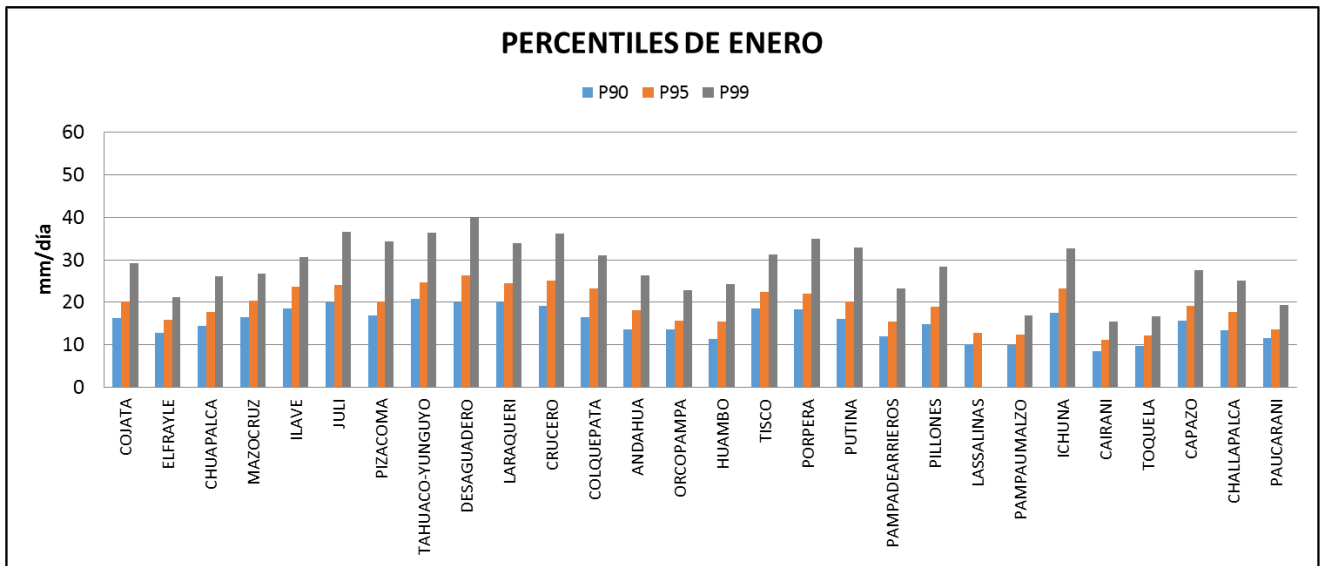


Figura 12: Percentiles del mes de enero grupo B

En las figuras 13 y 14, se muestra los 3 percentiles calculados para el mes de febrero, donde el valor más alto es de 59,9 mm/día que corresponde al p99 para la estación de Isla Taquile, seguido de la estación Desaguadero con un valor de 54,9 mm/día y el valor más bajo para este mes es de 9,2 mm/día en la estación Cairani para el p90.

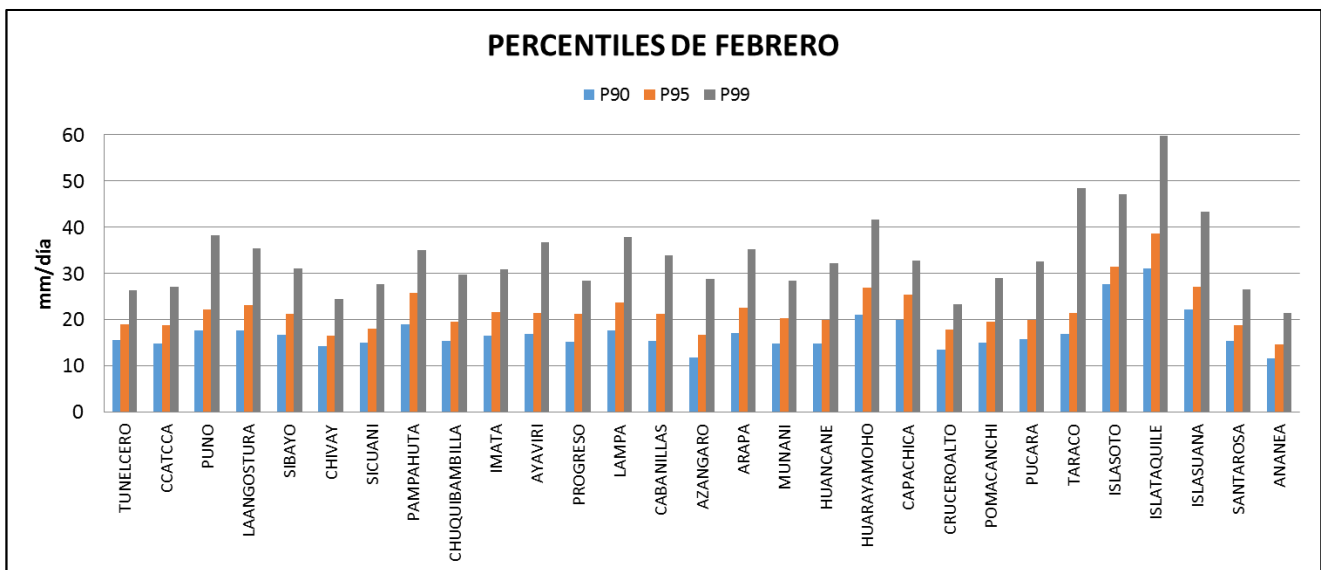


Figura 13: Percentiles del mes de febrero grupo A

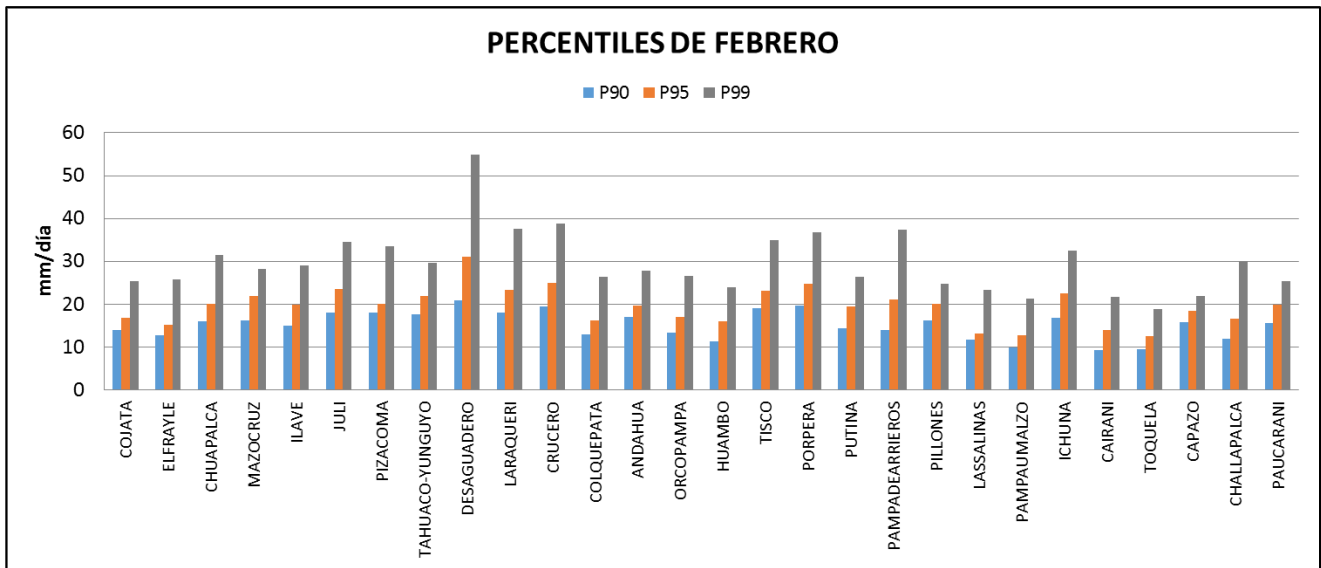


Figura 14: Percentiles del mes de febrero grupo B

En las figuras 15 y 16, se grafica los percentiles para el mes de marzo, donde el valor más alto de precipitación es de 52,6 mm/día que corresponde al p99 en la estación de Isla Taquile, seguido de la estación desaguadero con un valor de 50,6 mm/día. El valor más bajo es de 8,7 mm/día en la estación Tóqueña que corresponde al p90.

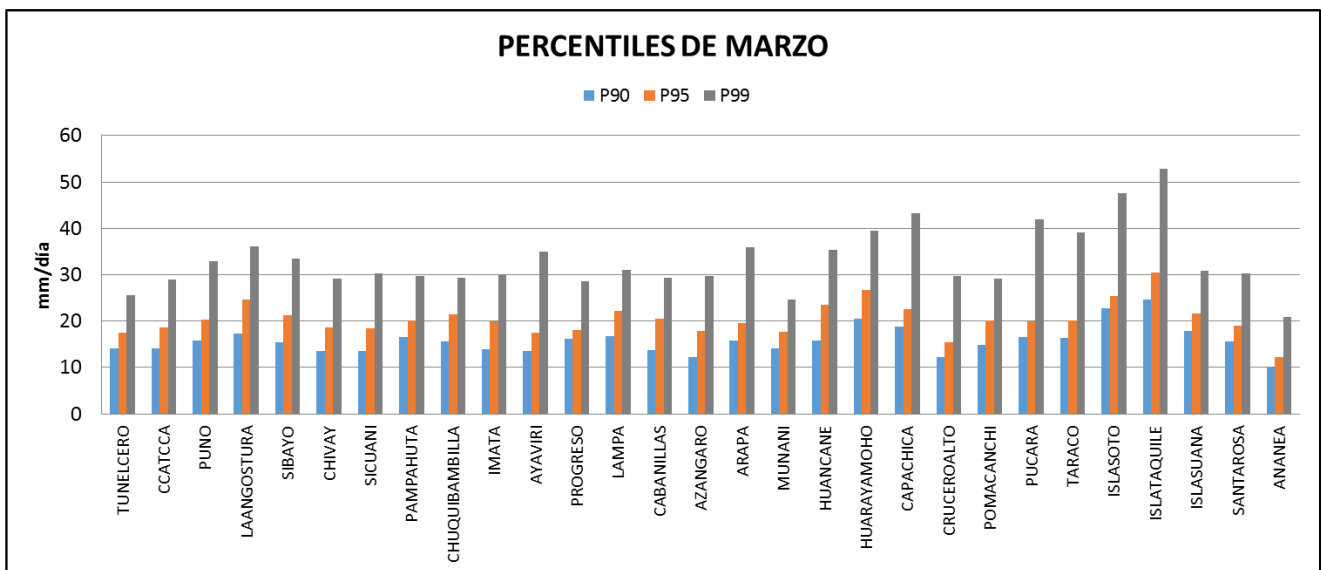


Figura 15: Percentiles del mes de marzo grupo A

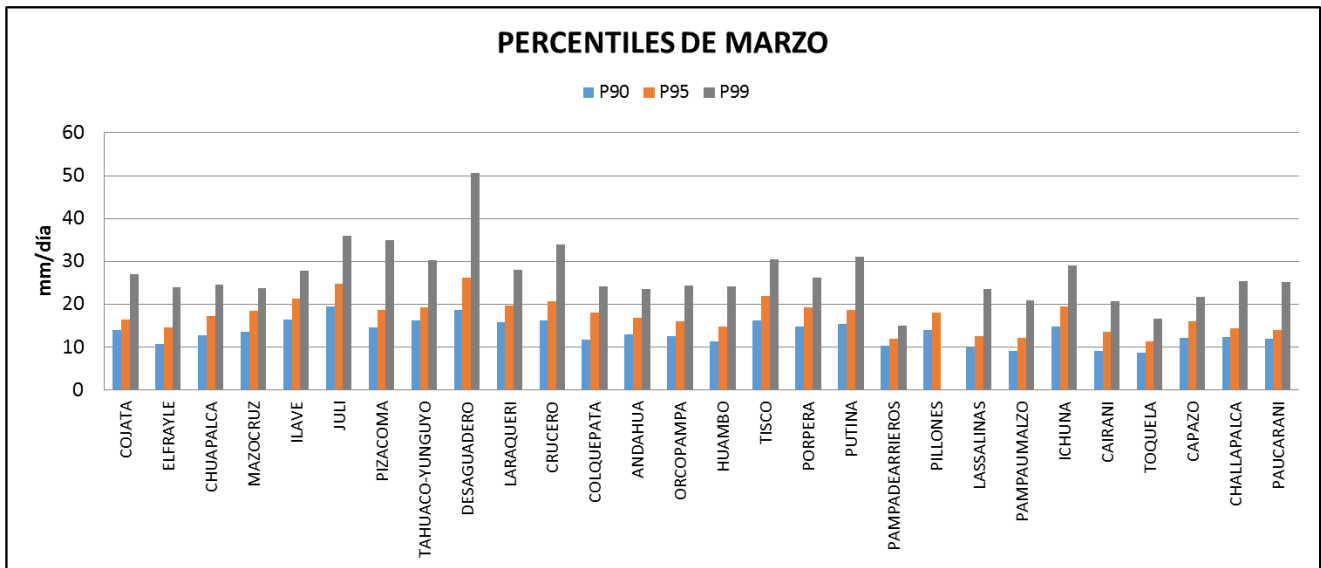


Figura 16: Percentiles del mes de marzo grupo B

En las figuras 17 y 18, se grafica los percentiles para el mes de diciembre, donde el valor más alto de precipitación es de 50,3 mm/día que corresponde al p99 en la estación de Isla Taquile, seguido de la estación Huarayamoho con un valor de 46,6 mm/día y el valor más bajo que corresponde al p90 fue 6,5 mm/día en la estación Cairani.

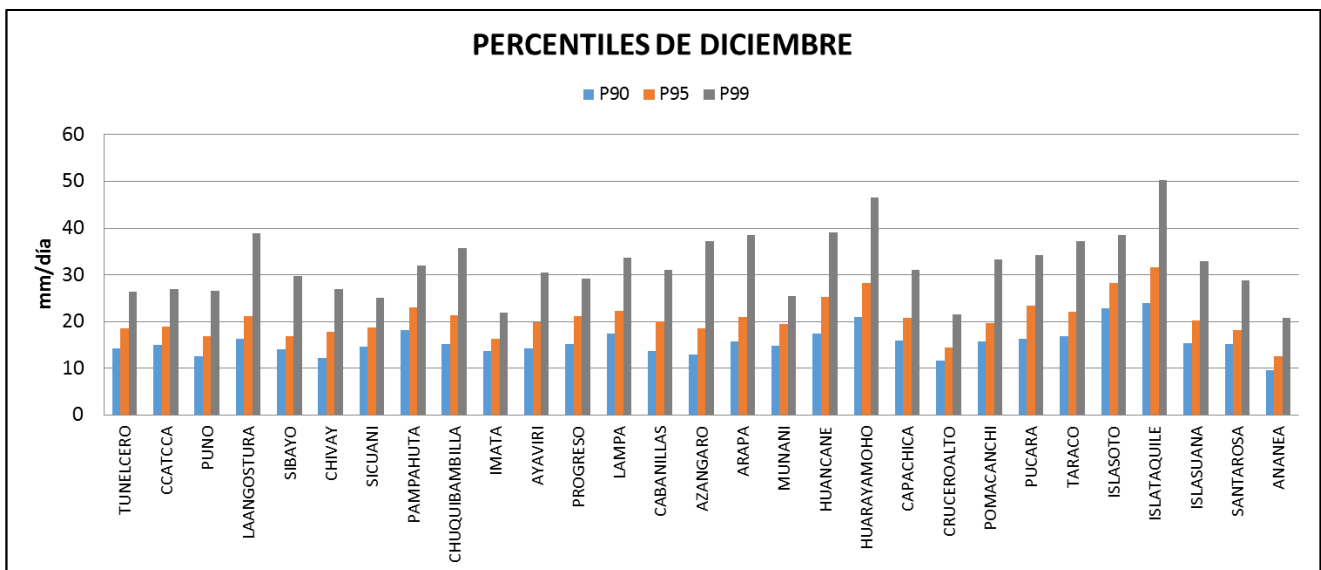


Figura 17: Percentiles del mes de Diciembre grupo A

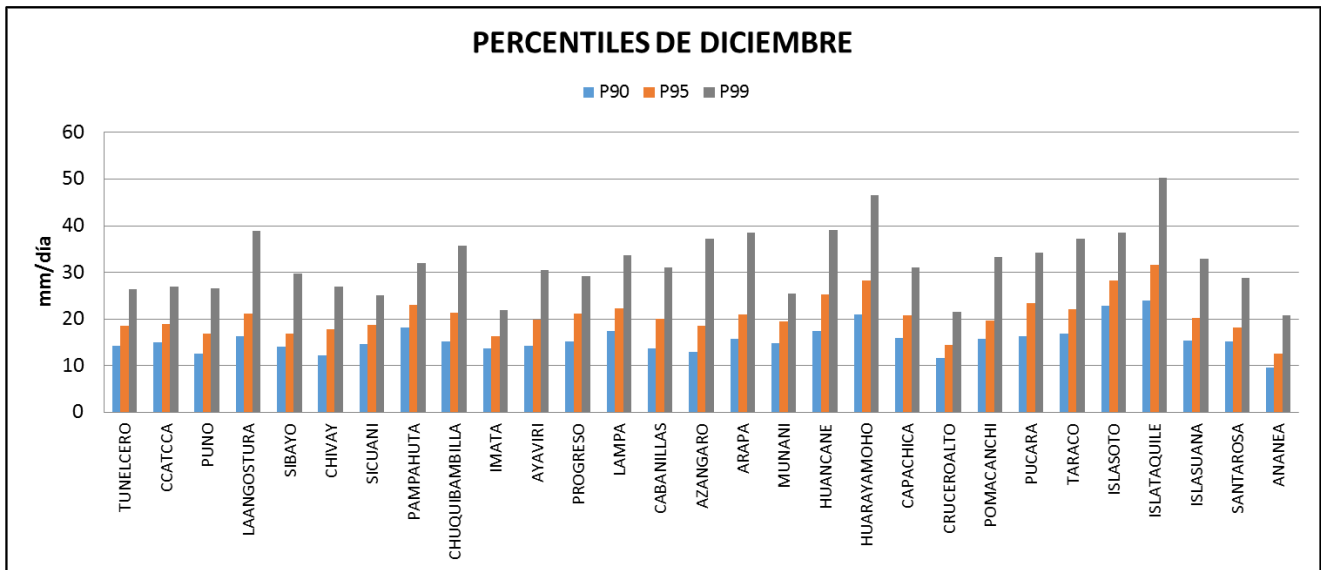


Figura 18: Percentiles del mes de diciembre grupo B

Para saber en qué mes los acumulados de precipitaciones son mayores, se graficó el promedio de precipitaciones del 2008 al 2012 para los meses de enero, febrero, marzo y diciembre para las 57 estaciones.

En el primer grupo que se observa en la figura 19, nos muestra que los mayores acumulados de precipitaciones se dieron en el mes de febrero, de las 9 estaciones graficadas solo dos de ellas (Ccatcca y Chuquibambilla) tienen los mayores acumulados en enero.

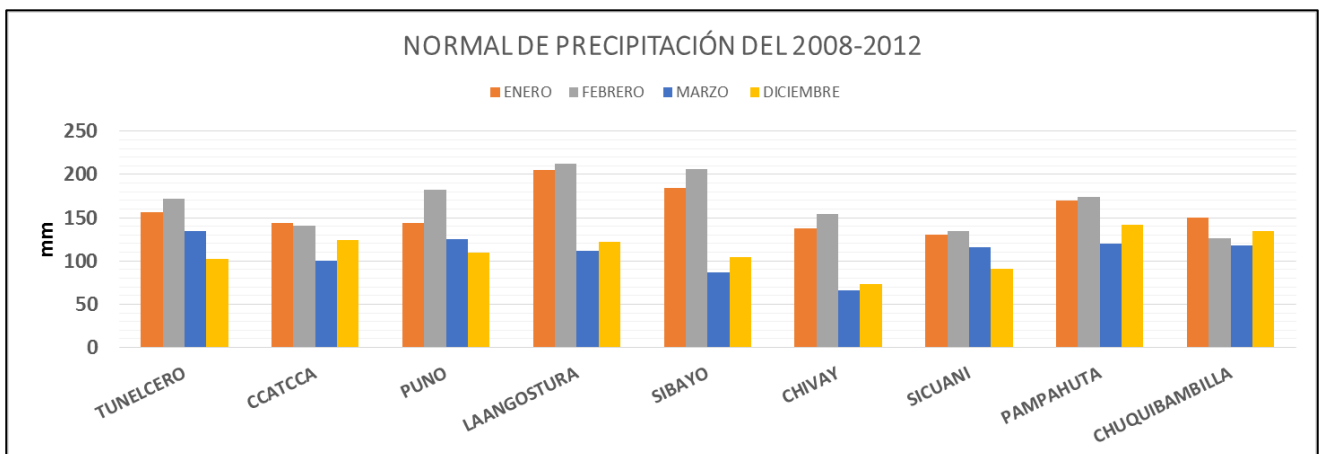


Figura 19: Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012

Para el segundo grupo, figura 20, 5 estaciones (Imata, Ayaviri, Lampa, Arapa, Huancane) de las 9 estaciones, presentaron su mayor acumulado de precipitaciones en febrero y las



otras 4 estaciones (Progreso, Cabanillas, Azángaro, Munani) los acumulados fueron mayores en enero.

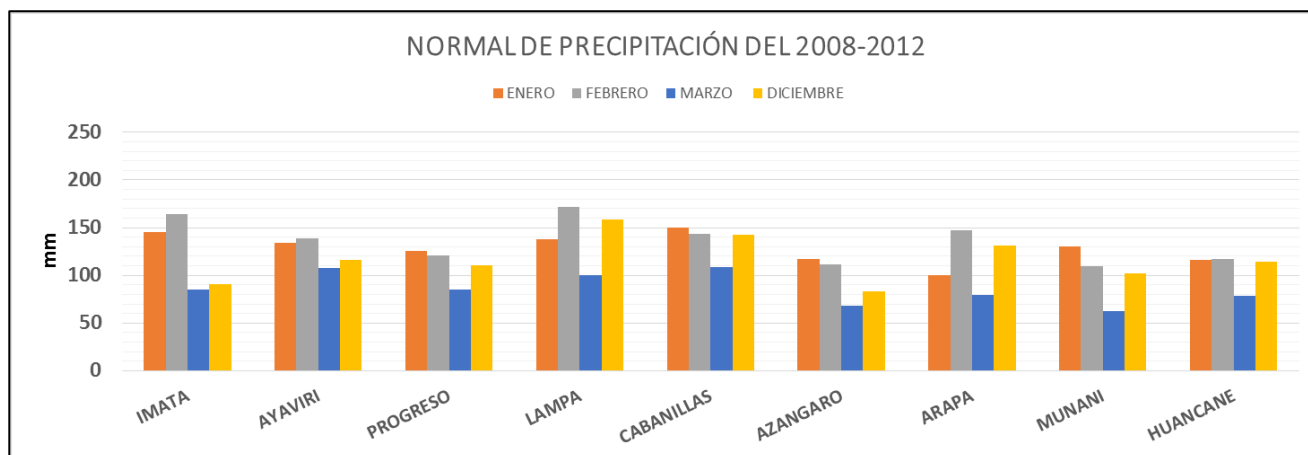


Figura 20: Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012

En la figura 21, se muestra el tercer grupo donde se señala que de 9 estaciones, 6 tienen el mayor acumulado en febrero, 2 estaciones (Crucero Alto y Pomacanchi) sus acumulados más altos son en enero y la estación de Huarayamoho en diciembre.

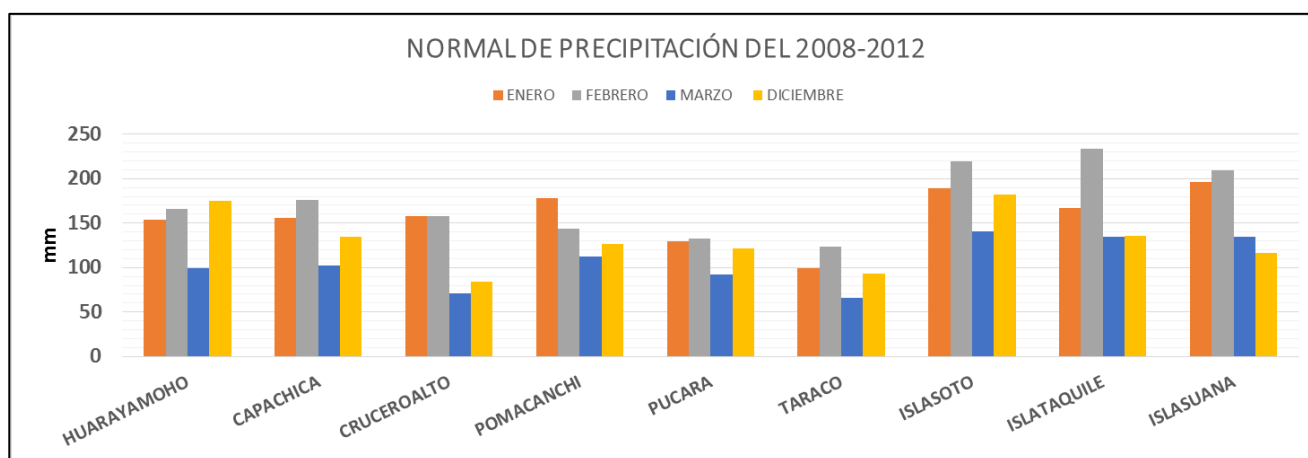


Figura 21: Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012

En el cuarto grupo, figura 22, 5 estaciones tienen su mayor acumulado en enero y las 4 estaciones restantes (Cojata, Chuapalca, Ilave y Pizacoma) tienen los acumulados más altos en febrero.

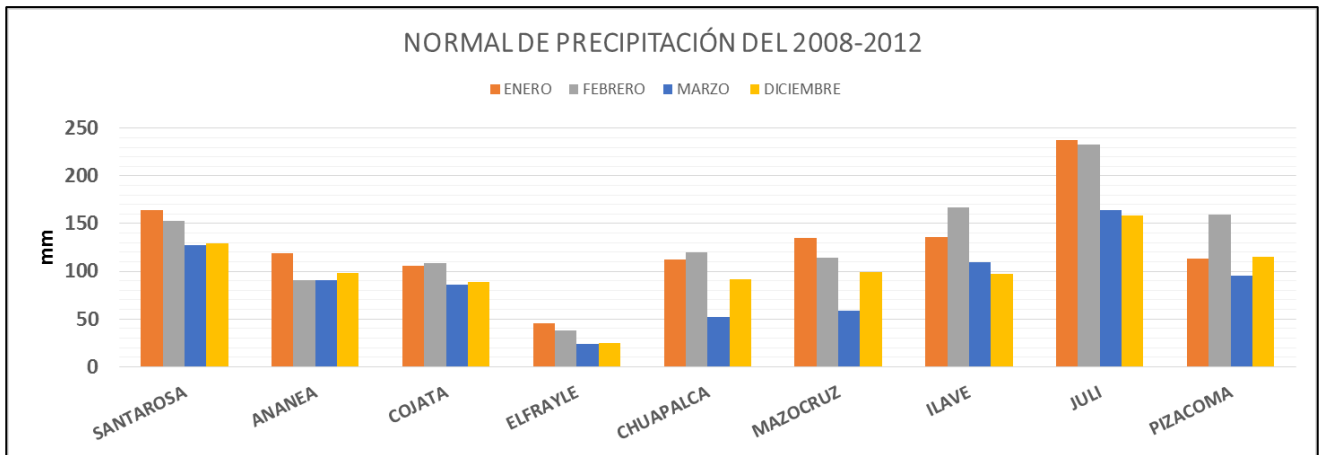


Figura 22: Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012

En la figura 23, se muestra el quinto grupo donde se señala que los mayores acumulados se dan en el mes de febrero para 7 estaciones y que sólo en 2 estaciones (Crucero y Colquepata) sus acumulados más altos son en enero.

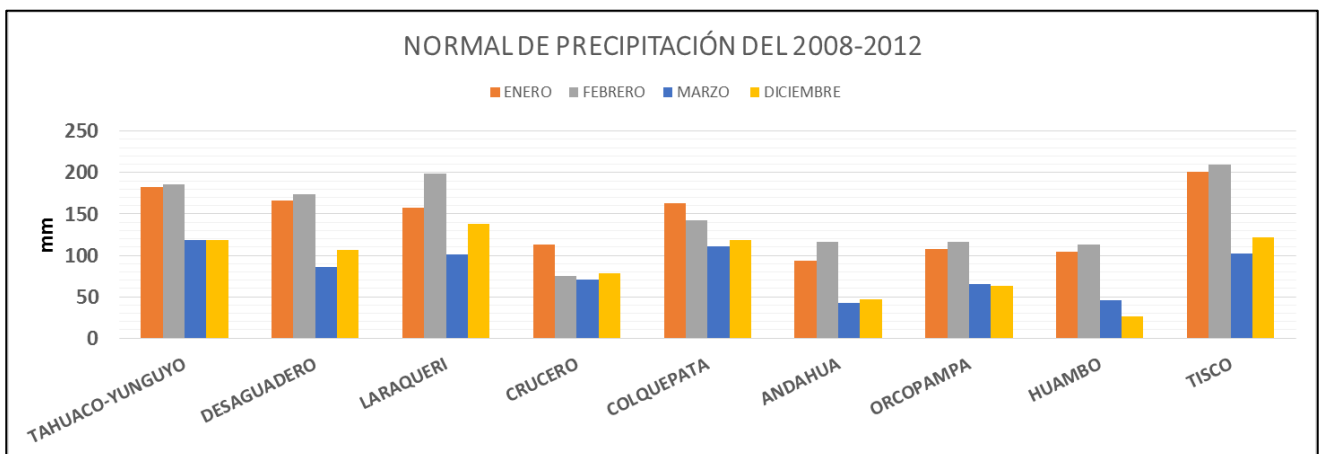


Figura 23: Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012

En el último grupo, figura 24, 8 estaciones de las 12, presentan sus mayores acumulados en febrero y 4 de ellas (Porpera, Pampa de Arrieros, Pampa umalzo y Capazo) tienen los acumulados más altos en enero.

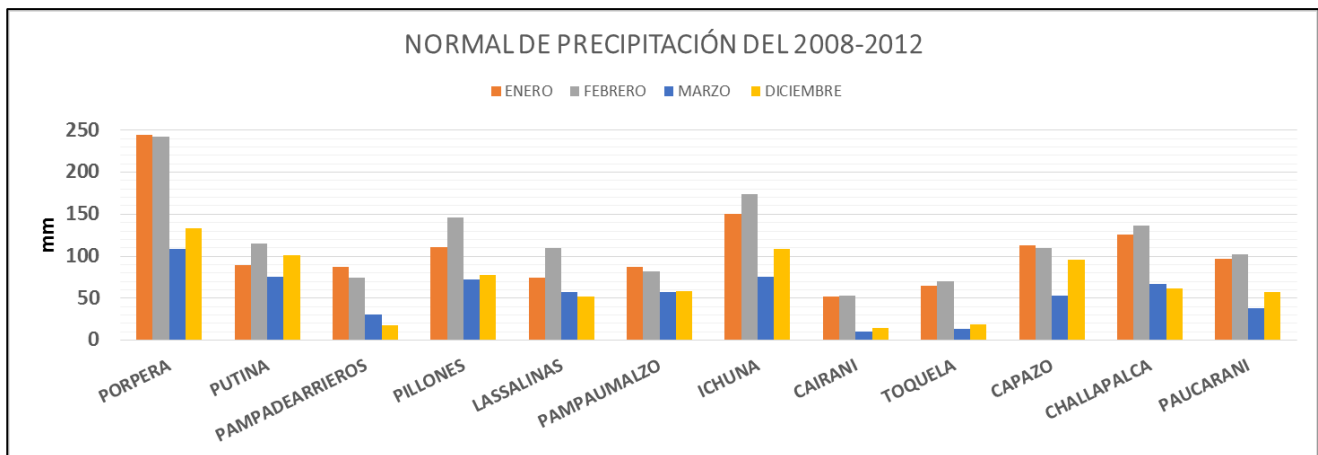


Figura 24: Promedio acumulado de precipitación del 2008 al 2012

El 65% de las estaciones presentaron los mayores acumulados en el mes de febrero, 33% en el mes de enero y solo el 2% tiene los mayores valores en diciembre. En el mes de enero el 82% de estaciones superan los 100 mm/mensual, en febrero el 88%, marzo el 39% y en diciembre el 56%.

#### 4.1.2 Identificar los días superiores a los percentiles 90, 95 y 99

Siguiendo los filtros ya establecidos, se seleccionó 20 fechas para los casos de estudio y se muestra en la tabla 06.

Tabla 06: Número de estaciones por fechas

| Fechas     | N° de Estaciones que superan |     |     |     |
|------------|------------------------------|-----|-----|-----|
|            | P75                          | P90 | P95 | P99 |
| 29/01/2008 | 22                           | 10  | 5   | 3   |
| 23/02/2008 | 19                           | 11  | 8   | 7   |
| 25/02/2008 | 12                           | 9   | 5   | 4   |
| 19/03/2009 | 16                           | 10  | 8   | 5   |
| 24/01/2010 | 26                           | 14  | 11  | 4   |
| 24/01/2011 | 25                           | 14  | 7   | 3   |
| 14/02/2011 | 20                           | 11  | 6   | 4   |
| 15/12/2011 | 15                           | 10  | 8   | 3   |
| 21/12/2011 | 26                           | 15  | 10  | 3   |
| 22/12/2011 | 27                           | 18  | 9   | 5   |
| 26/12/2011 | 18                           | 8   | 6   | 3   |
| 29/12/2011 | 20                           | 13  | 10  | 5   |
| 1/01/2012  | 27                           | 13  | 7   | 3   |
| 4/01/2012  | 15                           | 11  | 8   | 5   |
| 26/01/2012 | 14                           | 10  | 6   | 4   |
| 11/02/2012 | 21                           | 14  | 11  | 7   |

Continuación...

|                   |           |           |          |          |
|-------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>14/02/2012</b> | <b>27</b> | <b>12</b> | <b>5</b> | <b>3</b> |
| <b>15/02/2012</b> | 26        | 13        | 9        | 5        |
| <b>23/12/2012</b> | 13        | 7         | 5        | 3        |
| <b>25/12/2012</b> | 15        | 5         | 4        | 3        |

Para saber la distribución espacial y el comportamiento de la lluvia, se graficó los acumulados de la precipitación diaria a nivel nacional, para las 20 fechas seleccionadas. (Vea figuras del 25 al 30)

Para la primera fecha el 29 de enero de 2008, el acumulado de la precipitación estuvo por encima de los 20 mm/día, en la sierra sur (área de estudio). El día 23 de febrero de 2008, los acumulados fueron mayores a los 15 mm/día para las regiones de Huancavelica y Ayacucho, mientras que en la sierra sur, como las regiones de Puno y Cusco, los valores más altos no superaron los 10 mm/día. El 25 de febrero de 2008, los acumulados diarios variaron entre los 2 y 25 mm/día para todo el área de estudio. El día 19 de marzo de 2009, las precipitaciones más intensas fueron en la zona sur, principalmente entre las regiones de Cusco y Puno, donde los acumulados estuvieron cerca de los 30 mm/día. El 24 de enero de 2010, las precipitaciones estuvieron por encima de los 25 mm/día a lo largo del área de estudio. El 15 de diciembre de 2011, las precipitaciones más intensas se presentaron en la sierra sur oriental, principalmente en las regiones de Cusco y Puno. El 21 de diciembre de 2011, los valores de los acumulados estuvieron entre los 2 y 50 mm/día, en la sierra sur. El 22 de diciembre de 2011, las regiones más afectadas fueron Apurímac, Cusco, Puno, Arequipa, Moquegua y Tacna, con valores cerca de los 25 mm/día. El 26 de diciembre de 2011, las precipitaciones más importantes fueron en las regiones de la sierra sur, con valores desde los 2 mm/día hasta los 30 mm/día. El 29 de diciembre de 2011, las precipitaciones más representativas fueron en la sierra occidental de las regiones de Ayacucho y Arequipa, con valores de hasta 20 mm/día. El 24 de enero de 2011, los acumulados más altos fueron para las regiones de la sierra sur con valores de 2 a 25 mm/día. El 14 de febrero de 2011, los acumulados más intensos se presentaron en la sierra sur occidental con valores que llegaron hasta 40 mm/día. El 23 de diciembre de 2012, las regiones que presentaron mayores acumulados fueron Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Arequipa, Puno y Moquegua. El 25 de diciembre de 2012, los valores más intensos se presentaron en la sierra sur oriental y con acumulados por encima de los 15 mm/día. El 01 de enero de 2012, los acumulados más importantes se presentaron en las regiones de

Moquegua, Tacna y Puno, con valores cerca de los 20 mm/día. El 04 de enero de 2012, los valores fueron desde los 10 hasta los 35 mm/día para las regiones de Ayacucho, Apurímac, Cusco, Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno, en la vertiente oriental. El 25 de enero de 2012, se presentaron valores desde los 2 hasta 20 mm/día hasta en el área de estudio. El 11 de febrero de 2012, los acumulados llegaron hasta 50 mm/día, principalmente en la región de Arequipa. El 14 de febrero de 2012, los mayores acumulados se presentaron en la vertiente oriental sur y regiones de Moquegua y Tacna. El 15 de febrero de 2012, los acumulados de precipitaciones variaron desde los 2 hasta los 35 mm/día, principalmente en la región de Puno.

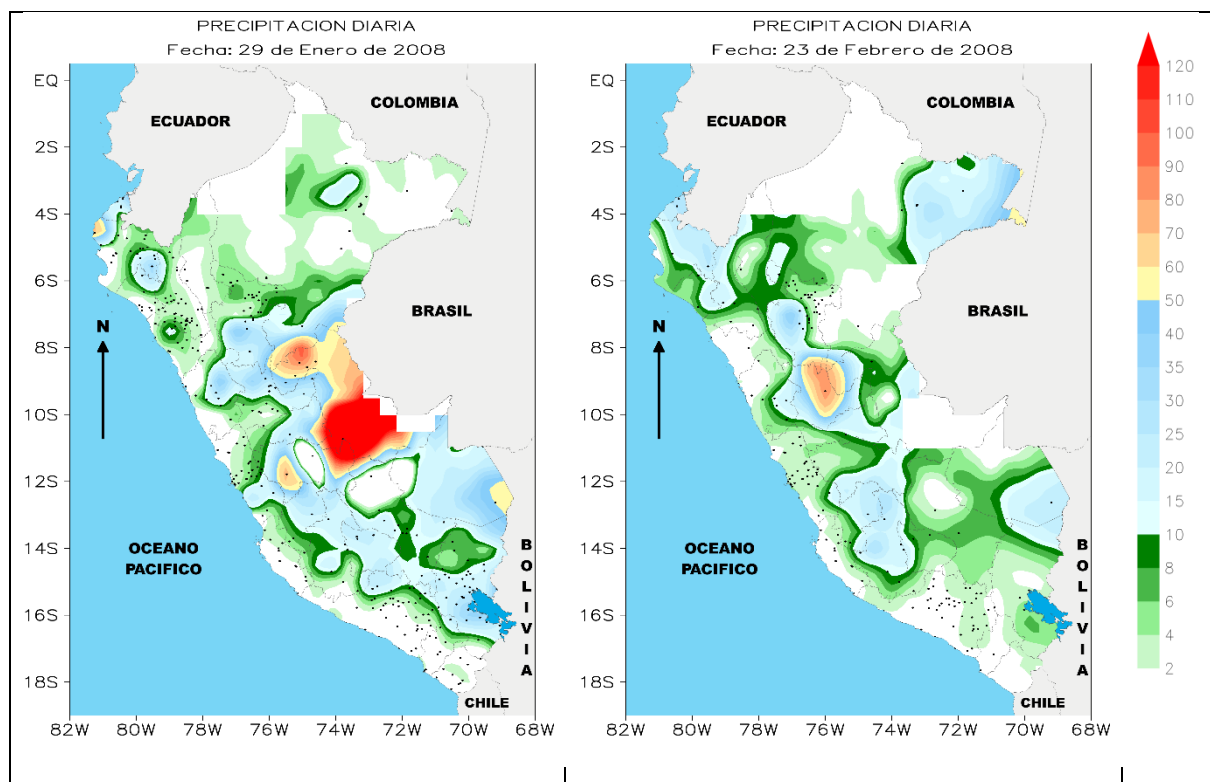


Figura 25 Distribución de lluvia a nivel nacional

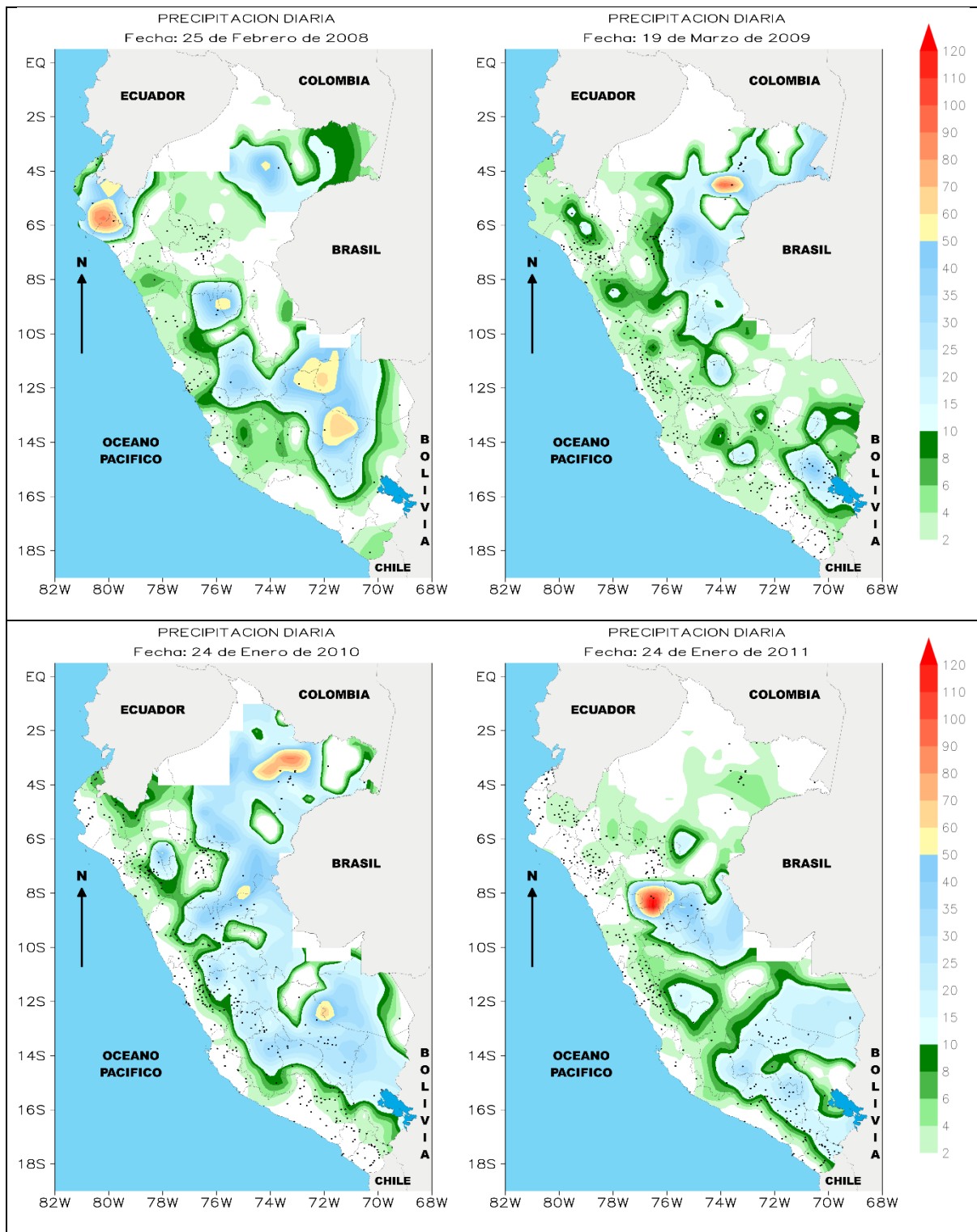


Figura 26 Distribución de lluvia a nivel nacional

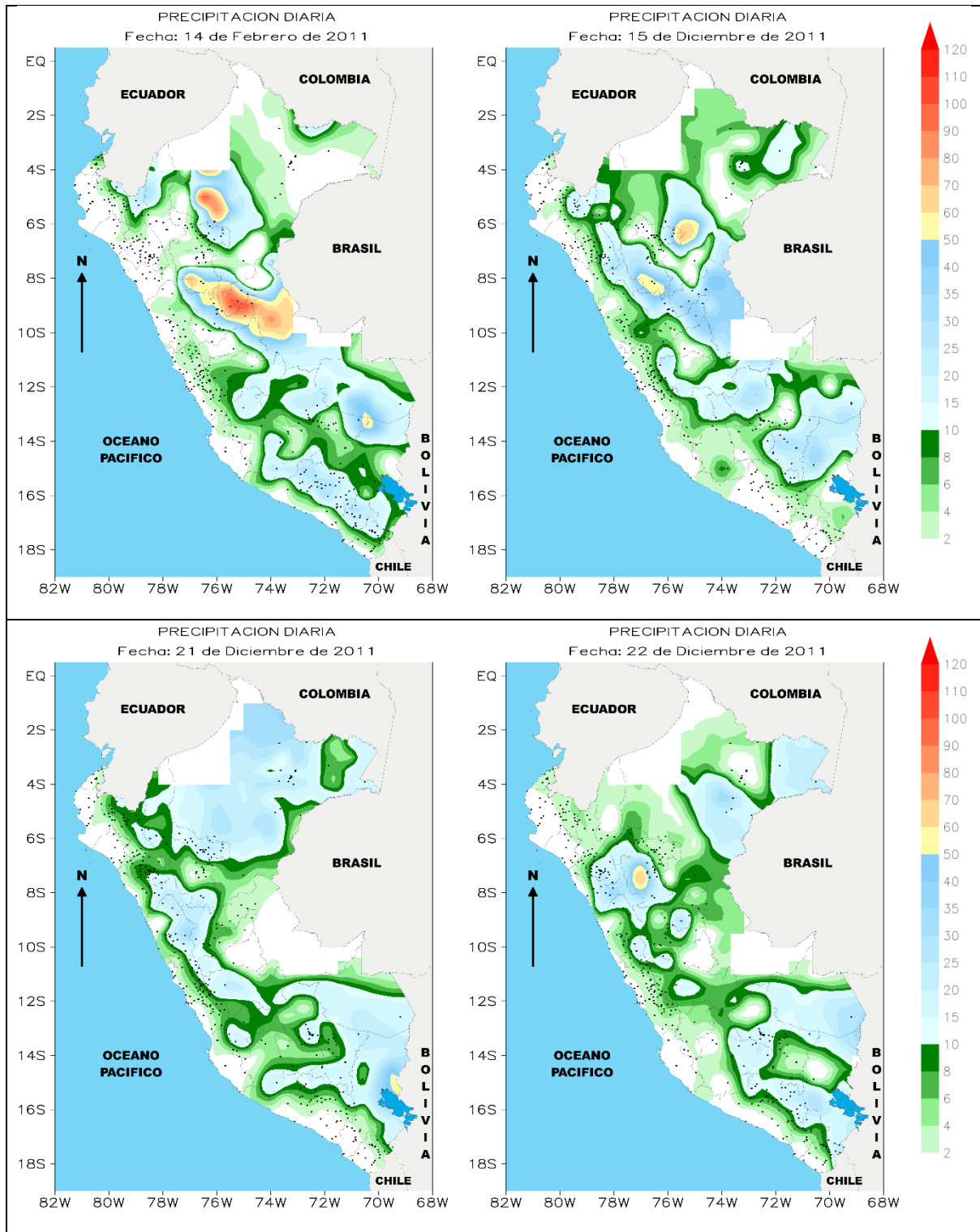


Figura 27 Distribución de lluvia a nivel nacional

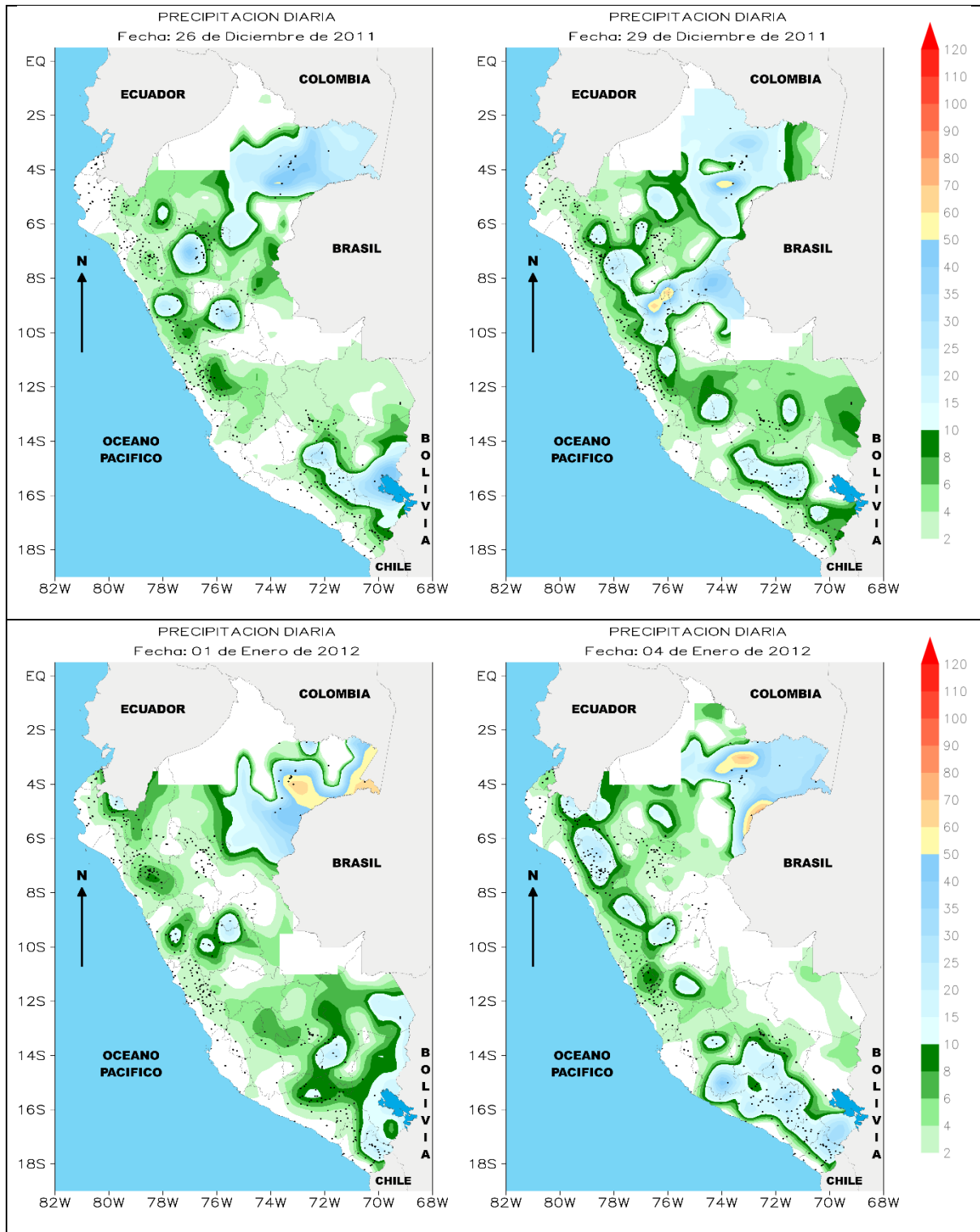


Figura 28 Distribución de lluvia a nivel nacional



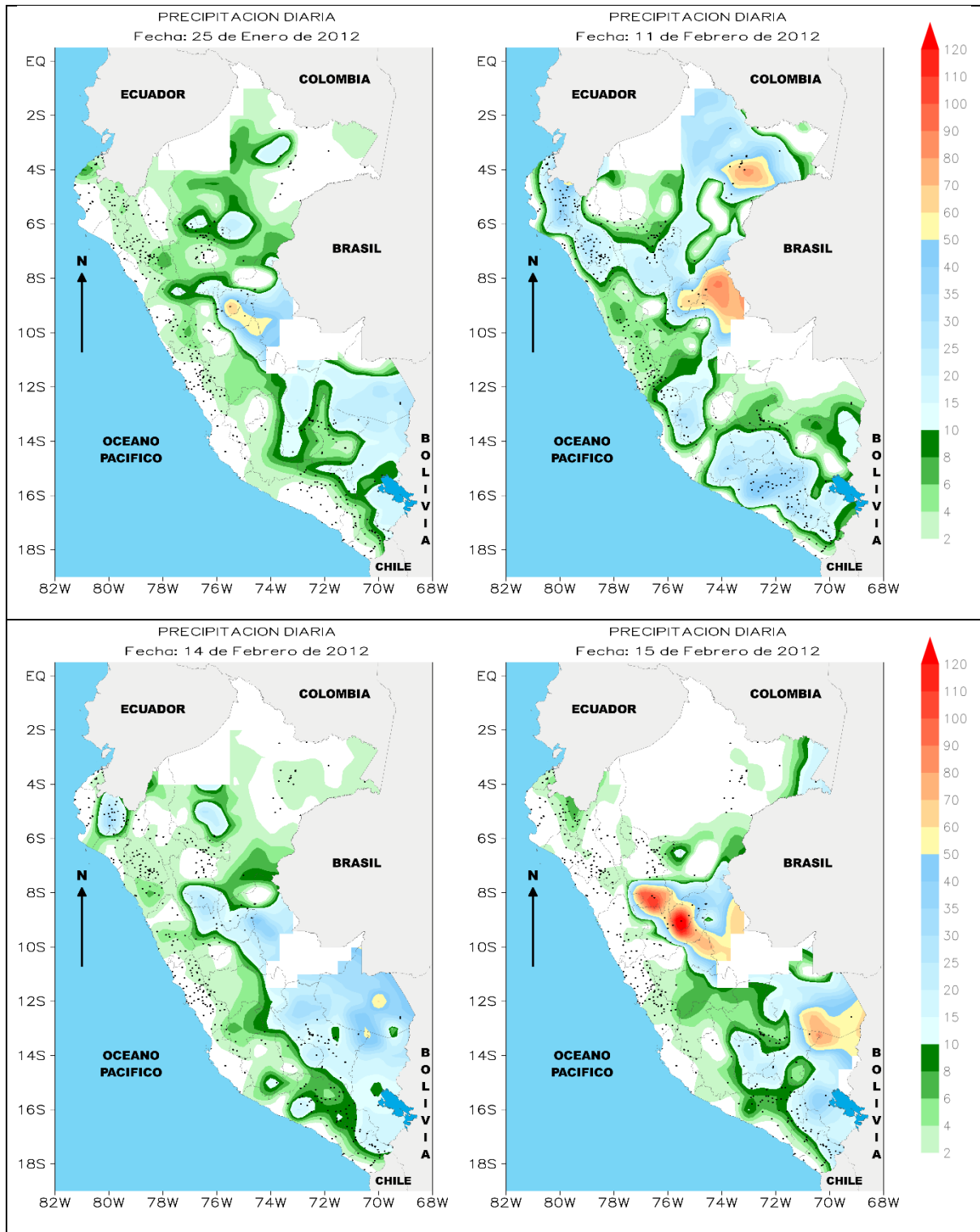


Figura 29 Distribución de lluvia a nivel nacional

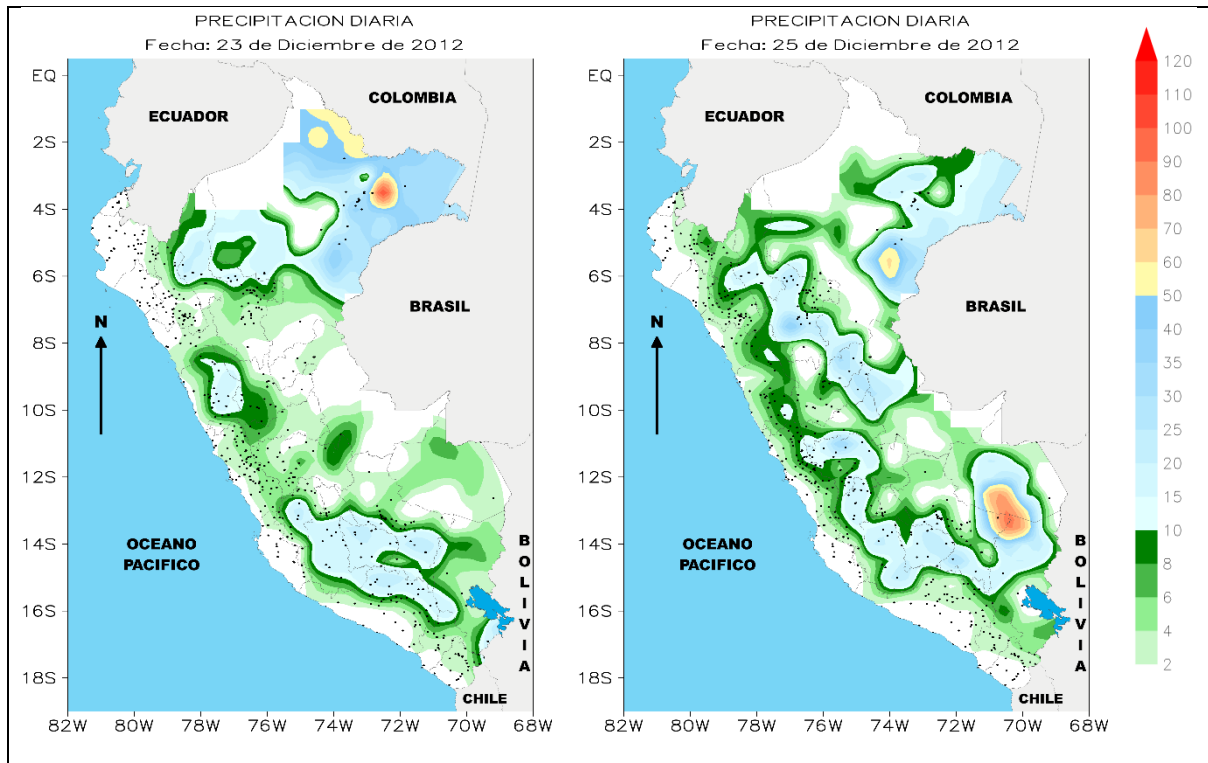


Figura 30: Distribución de lluvia a nivel nacional

#### 4.1.3 Identificar los patrones de circulación para los 20 casos seleccionados.

En las figuras del 31 al 35, se observa la presencia de la Alta de Bolivia (AB) con una fuerte o débil configuración en los 20 casos, en la mayoría de los casos la AB se encuentra posicionada al sur de Perú con el núcleo entre Bolivia y Argentina, cuando se dan estos casos se puede observar la divergencia superior a los  $5 \cdot 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$  en la zona centro y sur de Perú.

En las figuras del 36 al 40, se observa que en algunos casos los vientos tienen una dirección noreste y norte en el sur de Perú, con una divergencia por encima de los  $5 \cdot 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ . En 5 casos, se observa el ingreso de una vaguada y que por su posición la parte delantera genera una fuerte inestabilidad en la zona centro y sur de Perú acompañada de una divergencia superior a los  $6 \cdot 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ .

En los anexos del 4 al 9, se observa que la humedad en 550 hPa es superior a los 5 g/kg en la sierra sur para horas previas al evento, mientras que a las 18z del día del evento la humedad está por encima de los 6 y 7 g/kg.

En los anexos del 2 al 3, el jet del norte de bajos niveles contribuyó en el transporte de humedad desde la Amazonía y de zonas de Brasil hacia la sierra sur del Perú.

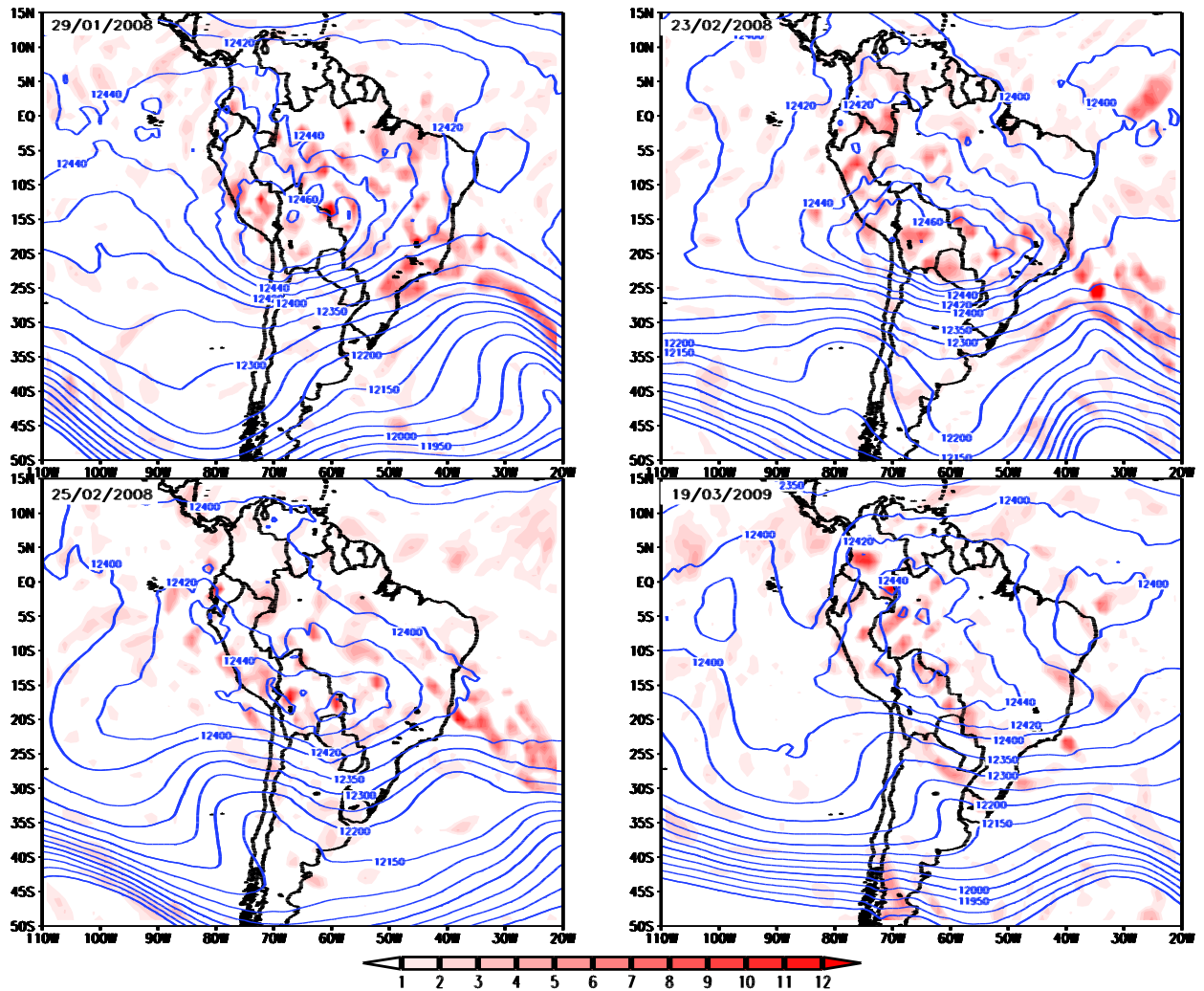


Figura 31: Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte a

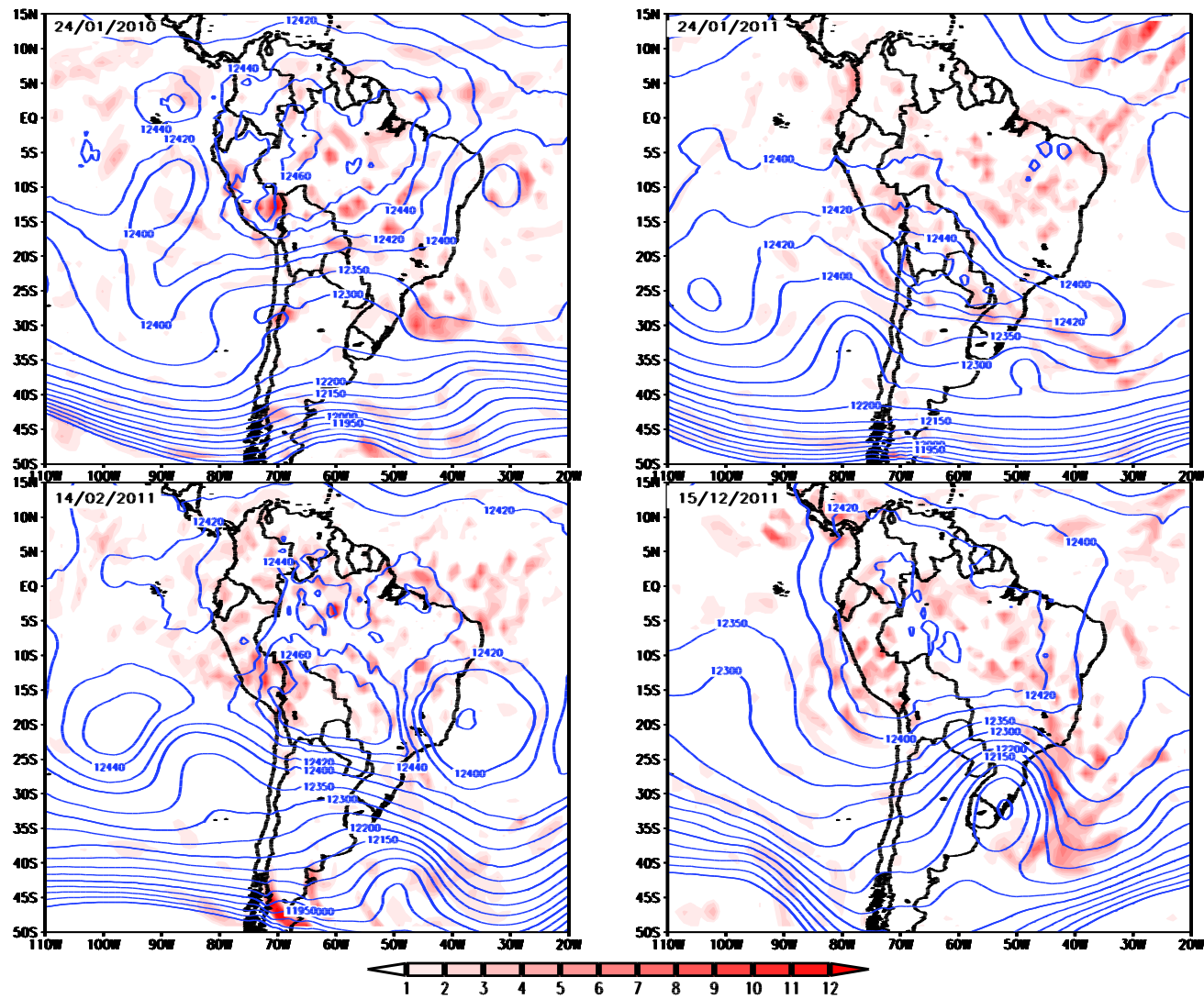


Figura 32: Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte b

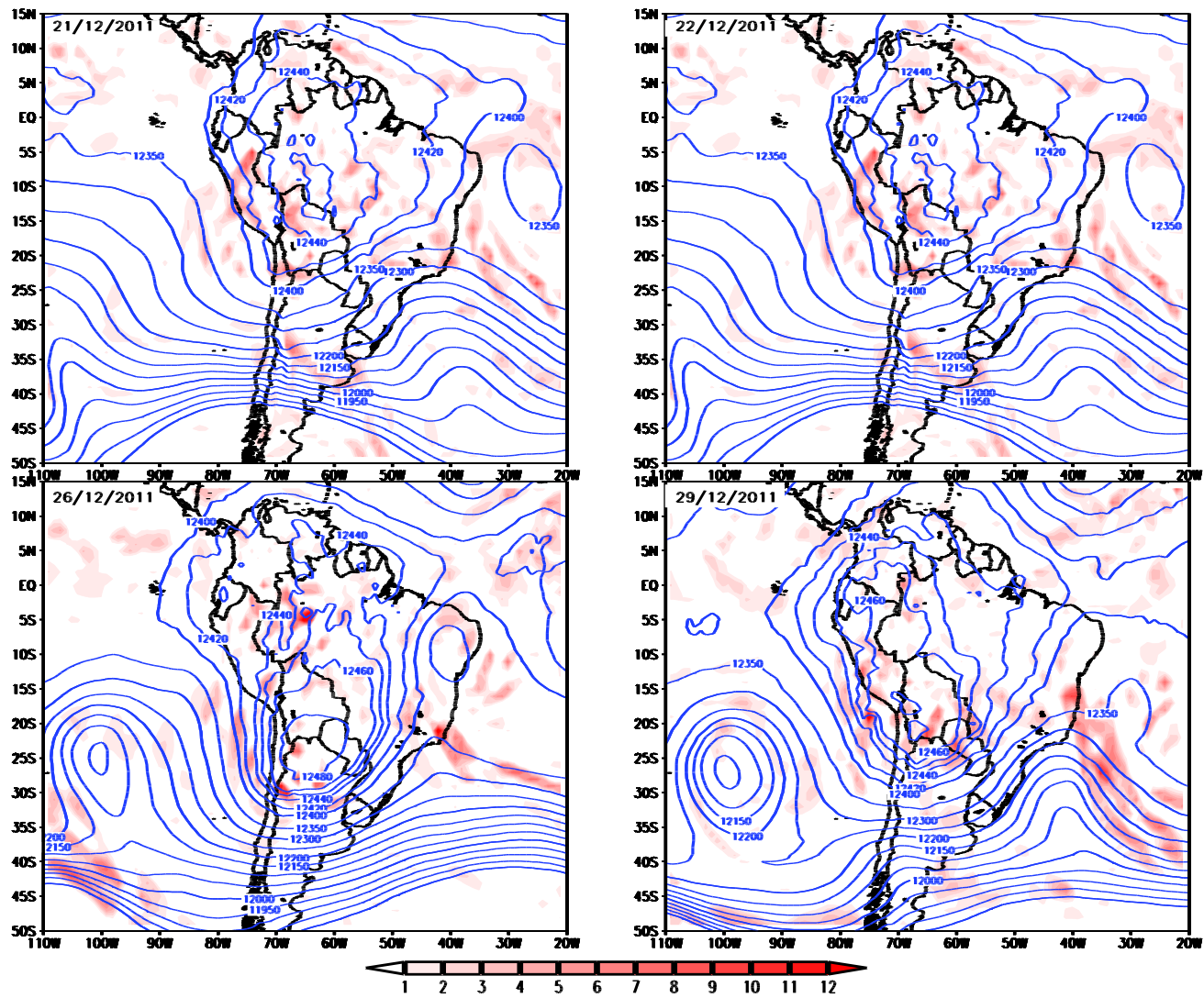


Figura 33: Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte c



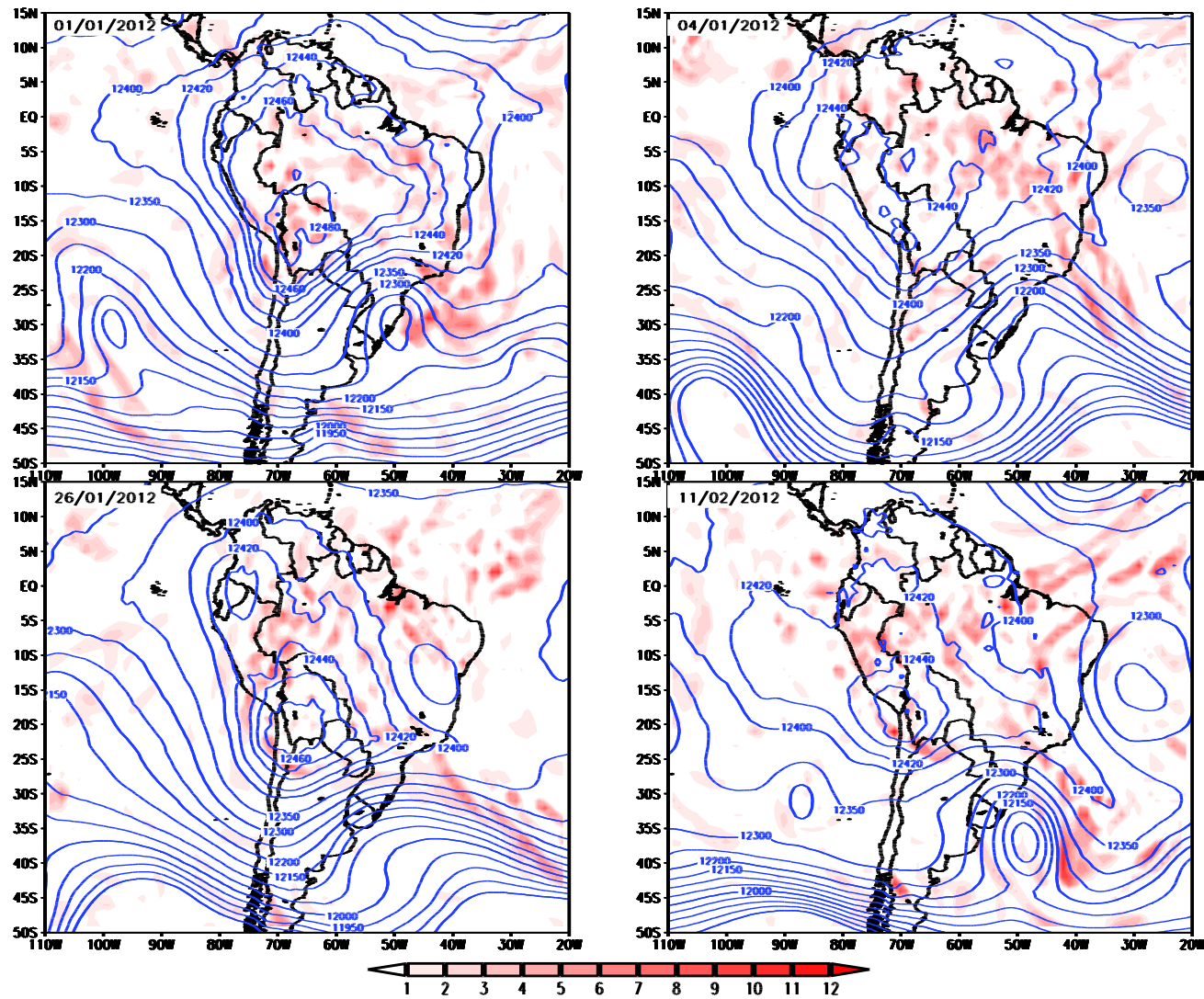


Figura 34: Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte d

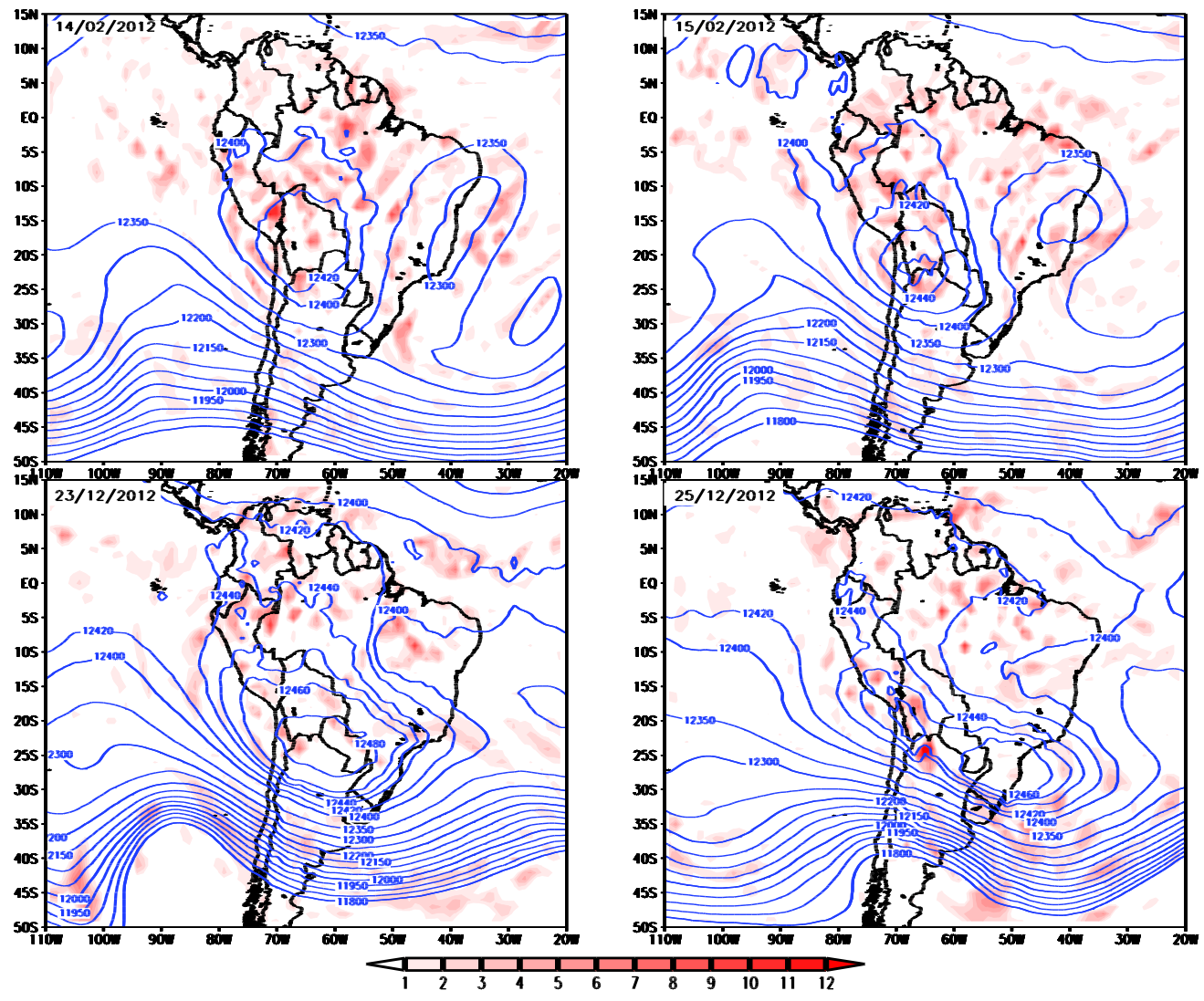


Figura 35: Altura geopotencial y divergencia en 200 hPa parte e

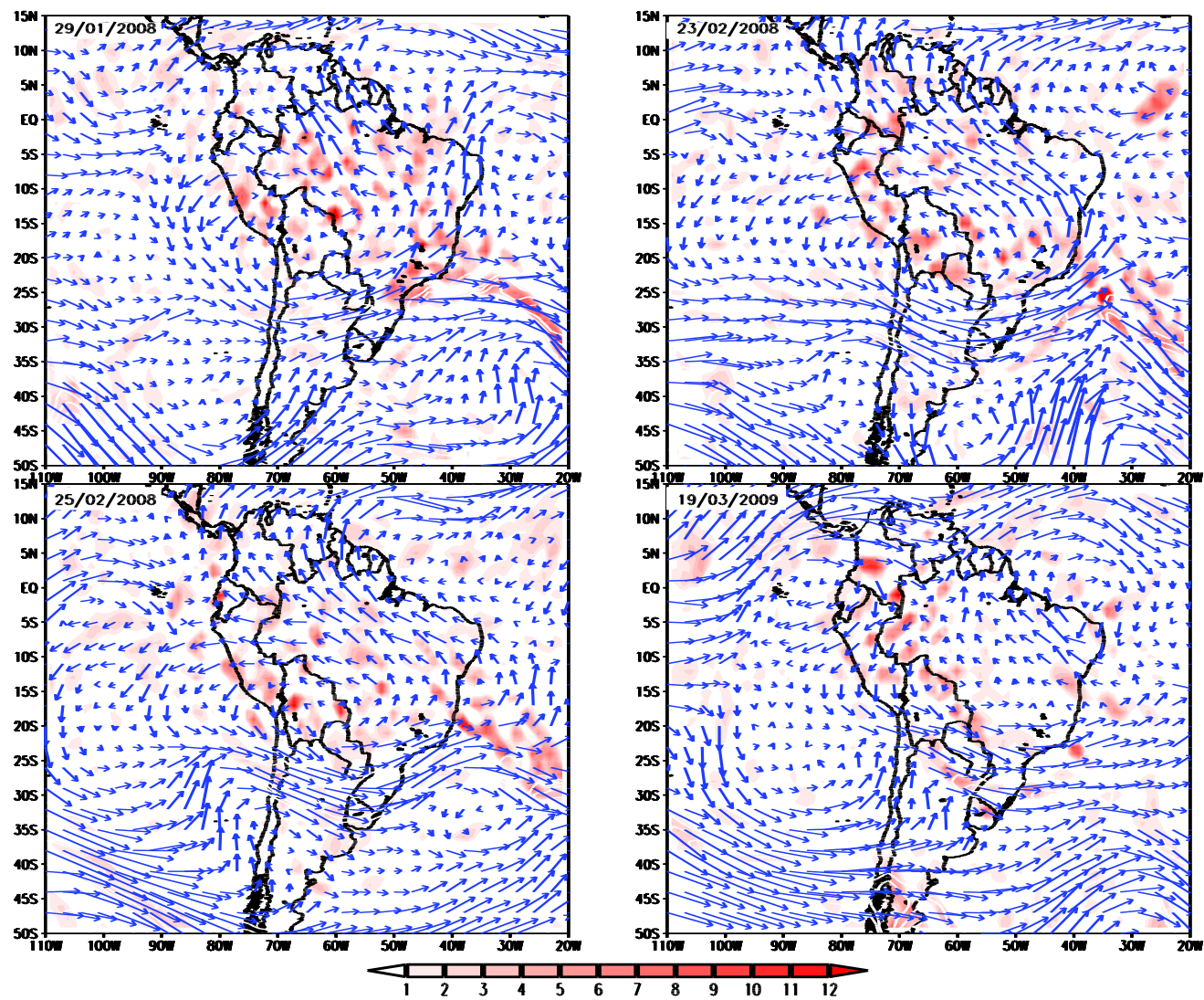


Figura 36: Viento y divergencia en 200 hPa parte a



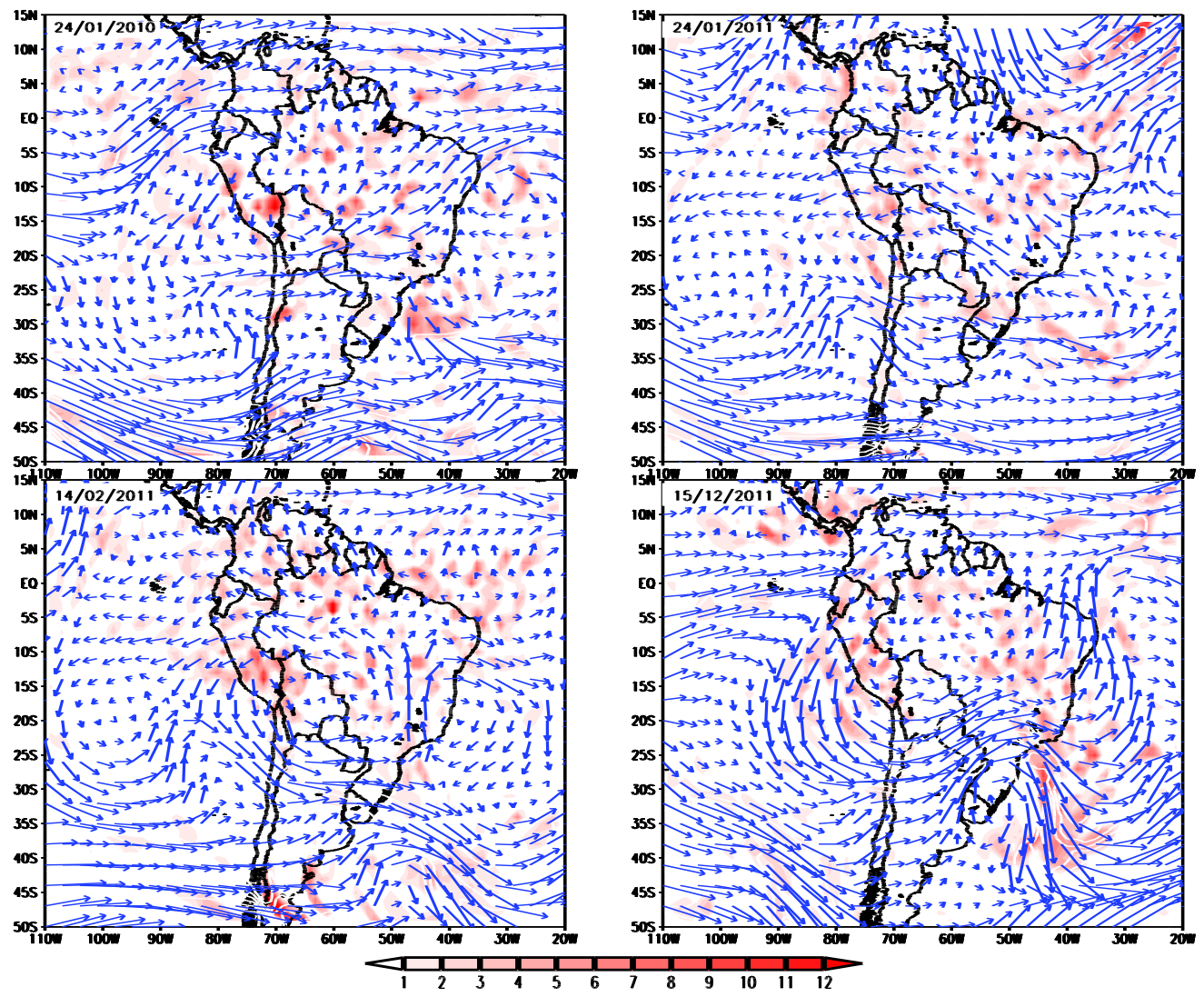


Figura 37: Viento y divergencia en 200 hPa parte b

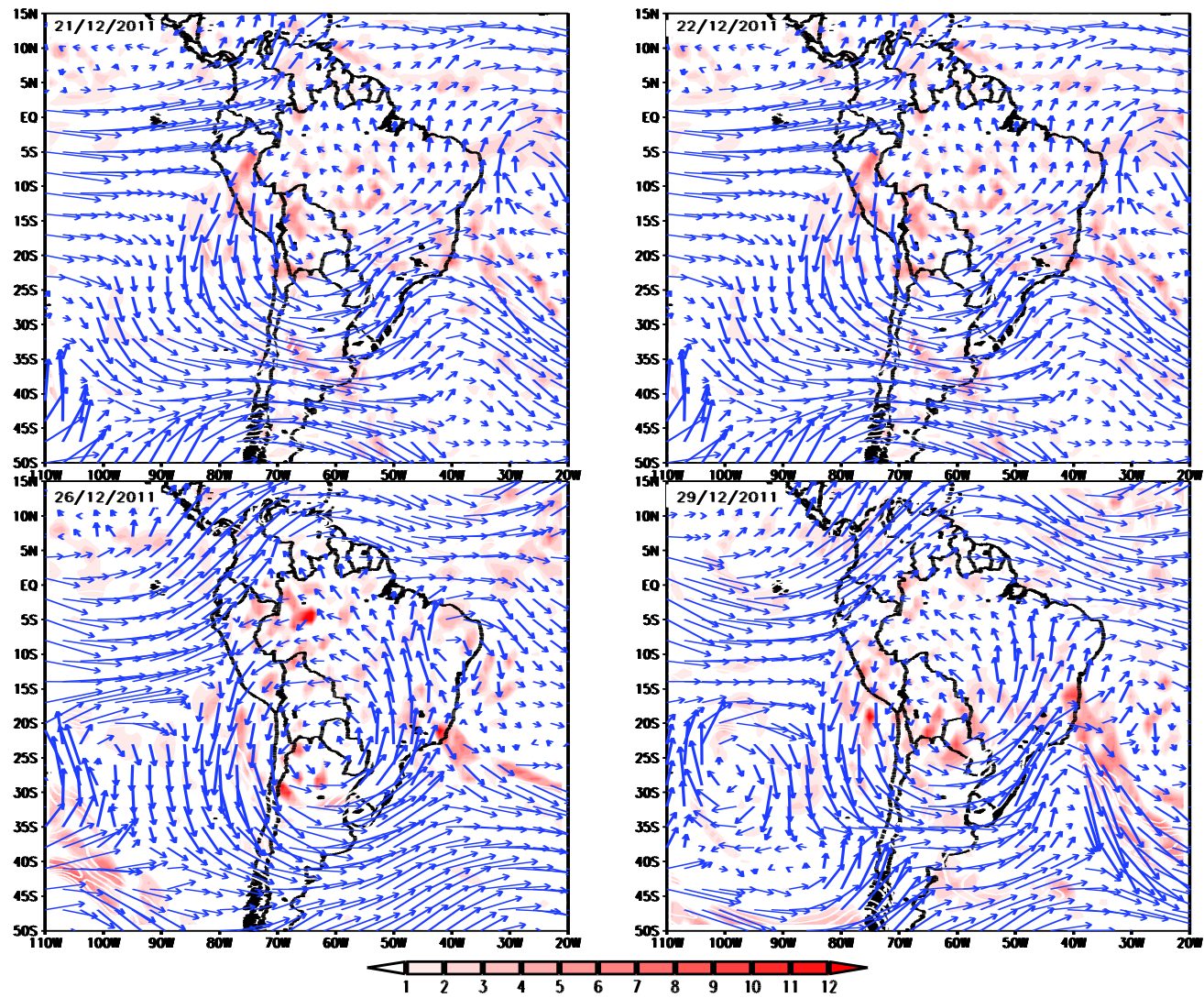


Figura 38: Viento y divergencia en 200 hPa parte c

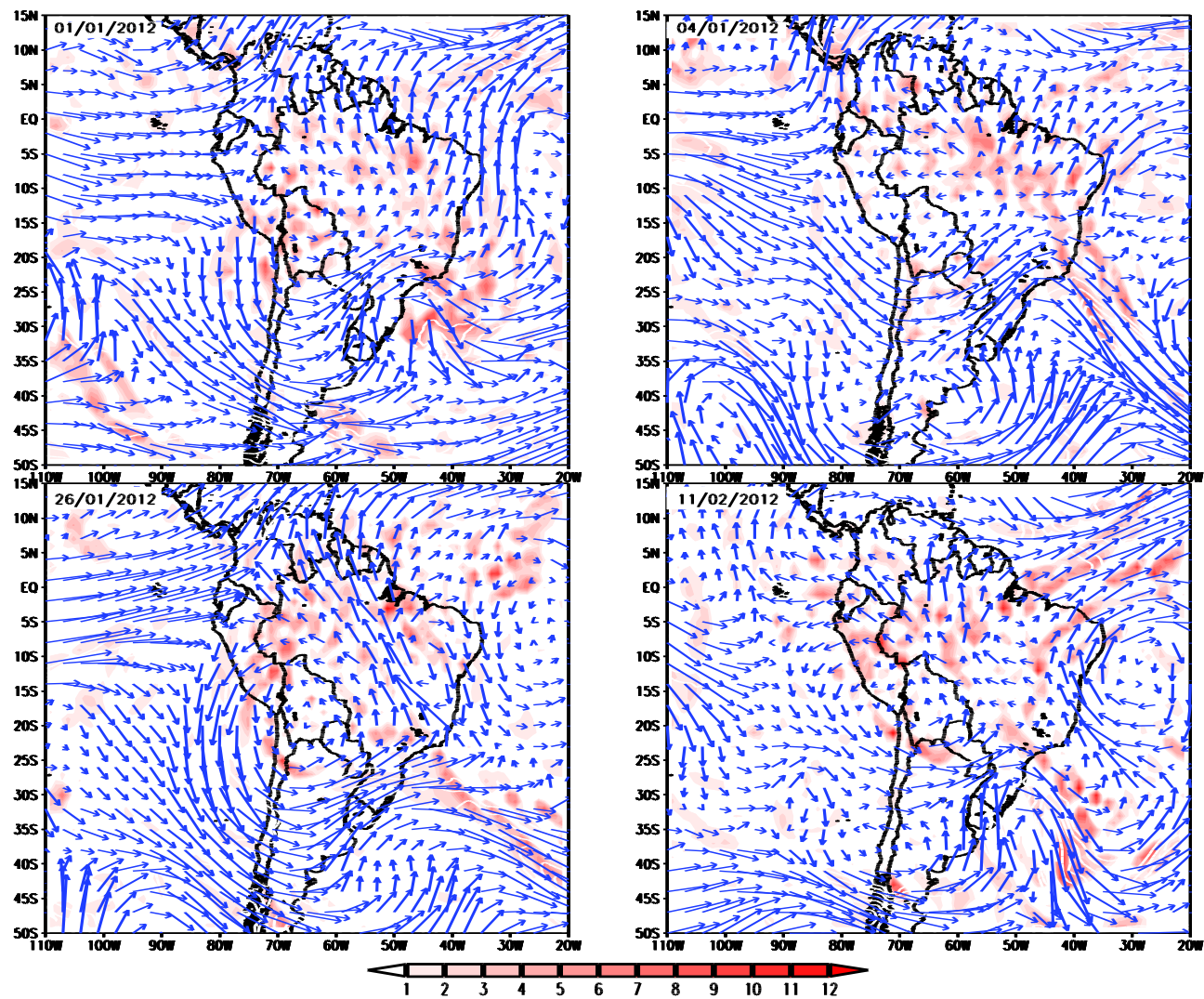


Figura 39: Viento y divergencia en 200 hPa parte d



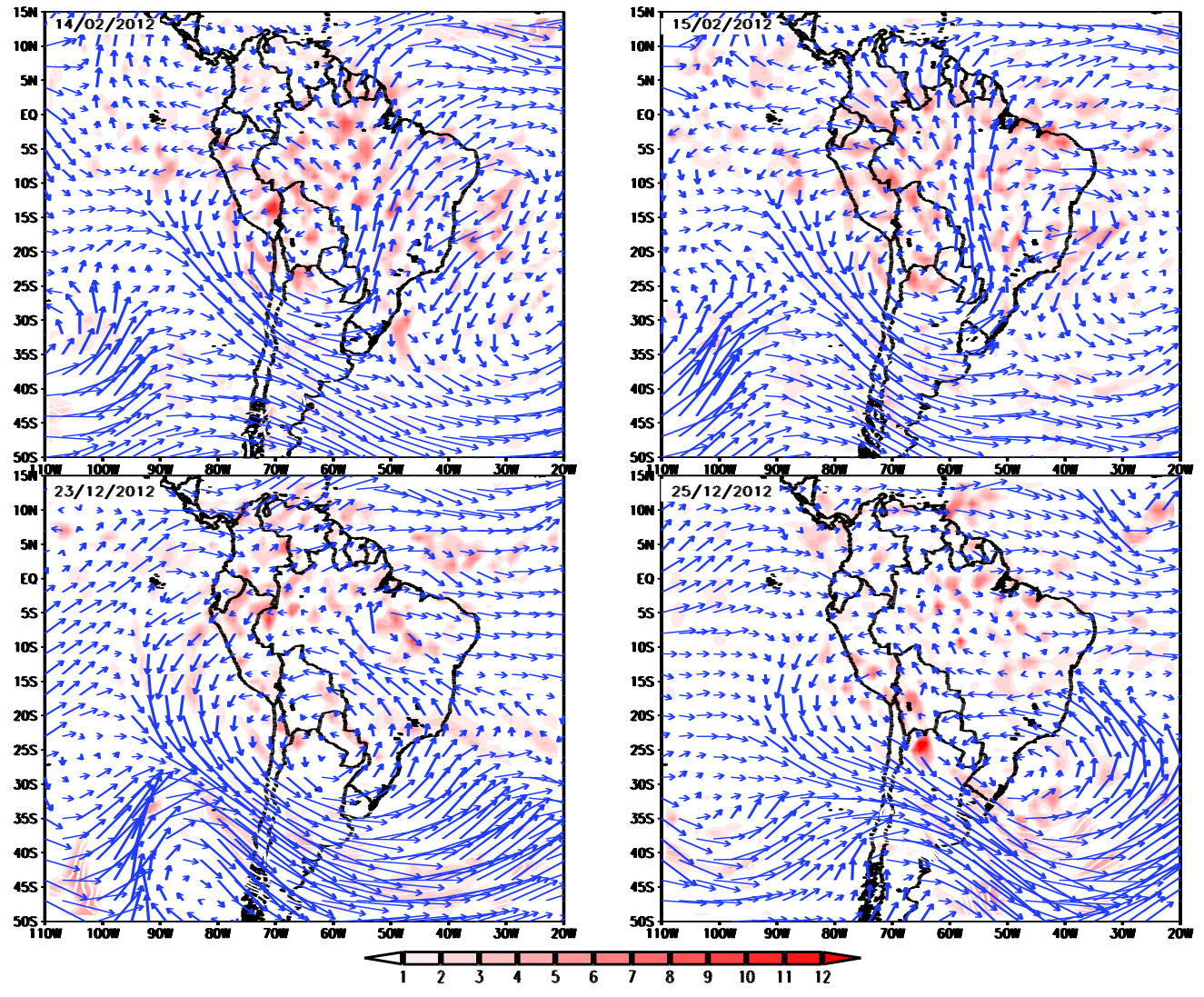


Figura 40: Viento y divergencia en 200 hPa parte e

#### 4.1.4 Promedio de los casos para establecer los modelos conceptuales.

Finalmente se obtuvieron 6 grupos que poseen configuraciones sinópticas similares, teniendo en cuenta que el grupo 6 de dos fechas también está en el grupo 4, las fechas se agruparon de la siguiente manera:

|   |   |  |
|---|---|--|
| (a) Grupo 1:<br>29 enero 2008<br>25 febrero 2008  | (b) Grupo 2:<br>23 febrero 2008<br>25 diciembre 2008<br>14 febrero 2012<br>15 febrero 2012<br>23 diciembre 2012 | (c) Grupo 3:<br>19 marzo 2009<br>24 enero 2010<br>24 enero 2011<br>14 febrero 2011 |
| (d) Grupo 4:<br>21 diciembre 2011<br>22 diciembre 2011<br>26 diciembre 2011<br>29 diciembre 2011<br>01 enero 2012<br>04 enero 2012<br>26 enero 2012 | (e) Grupo 5:<br>15 diciembre 2011<br>11 febrero 2012  | (f) Grupo 6:<br>01 enero 2012<br>04 enero 2012                                     |

### PROMEDIO DE PATRONES MANDATORIOS

#### NIVELES ALTOS

En la figura 41, se muestra la altura geopotencial para un nivel de 200 hPa para los 6 gráficos representativos de los grupos promedios, la mayoría muestra un comportamiento diferente, ya sea en la posición o configuración de la Alta de Bolivia (AB), teniendo en cuenta que cuando la AB está presente y al sur de Perú es un patrón que favorece la lluvia en sierra sur. En la figura 41a) la AB presenta una configuración zonal con su núcleo en Bolivia entre los 16-18°S y 60-63°W, en la figura 41b) la AB está posicionada al sur de Perú con núcleo entre los 20-22°S y 61-63°W, en las figuras 41c) y 41e) no se muestra una buena configuración de la AB, en las figuras 41d) y 41f) la AB de tiene una configuración más meridional, con su núcleo en Bolivia.

Se graficó el promedio de los vientos a 200 hPa como se muestra en la figura 42, en las figuras 42a) y 42b) el núcleo de la AB se encuentra en Bolivia y en esa posición favorece que en la sierra sur predominen los vientos del este y noreste, siendo más resaltante en la 42b). En las figuras 42c) y 42e) no se muestra una buena configuración de la AB, predominando que los vientos tenga una dirección norte y siendo más notorio en el 42e). En las figuras 42d) y 42f) se observa el ingreso de una vaguada al oeste de Perú que genera inestabilidad en la sierra central y sur, predominando vientos del norte y noreste en la sierra sur para la figura 42d) y más norte en la figura 42f).

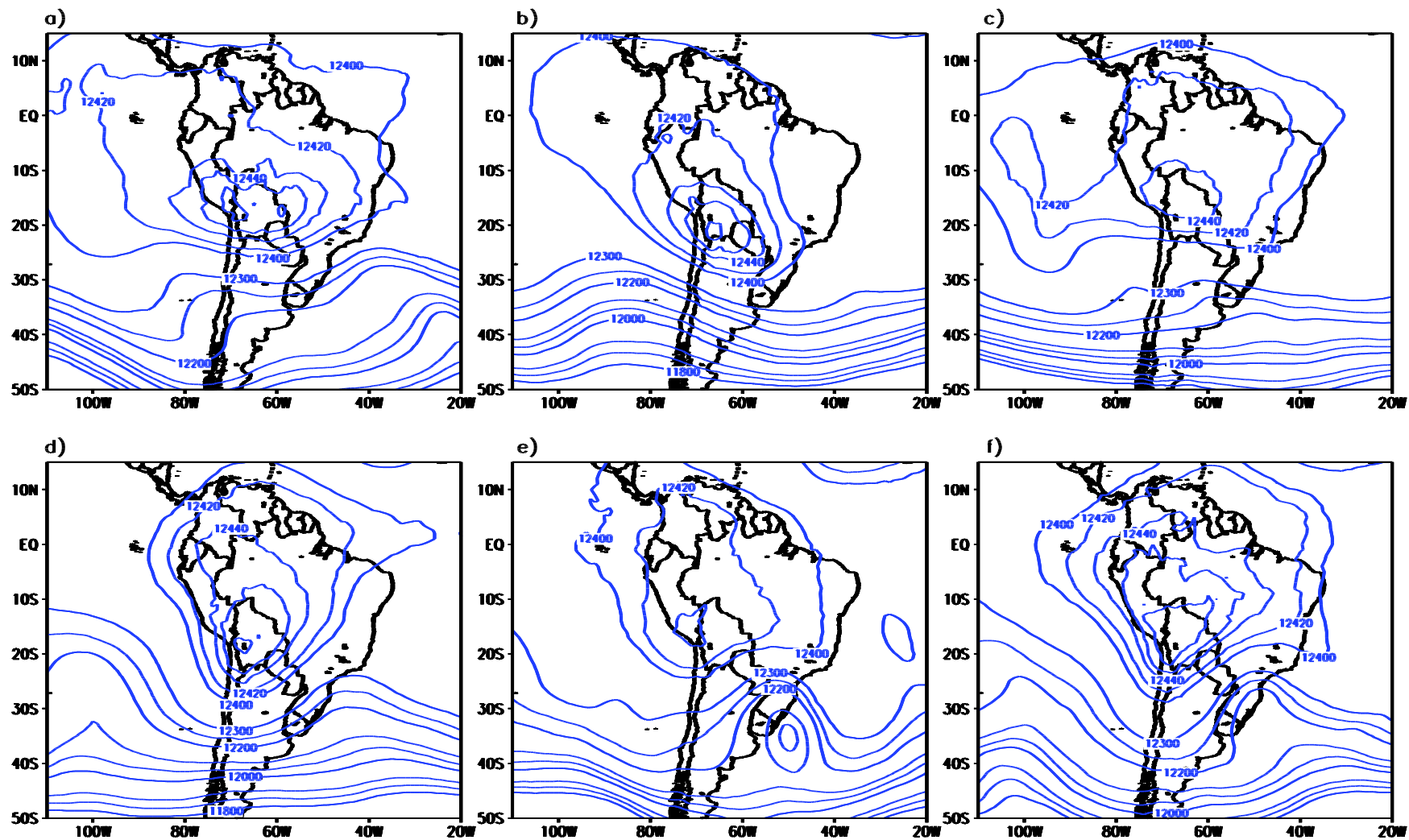


Figura 41: Altura geopotencial a 200 hPa

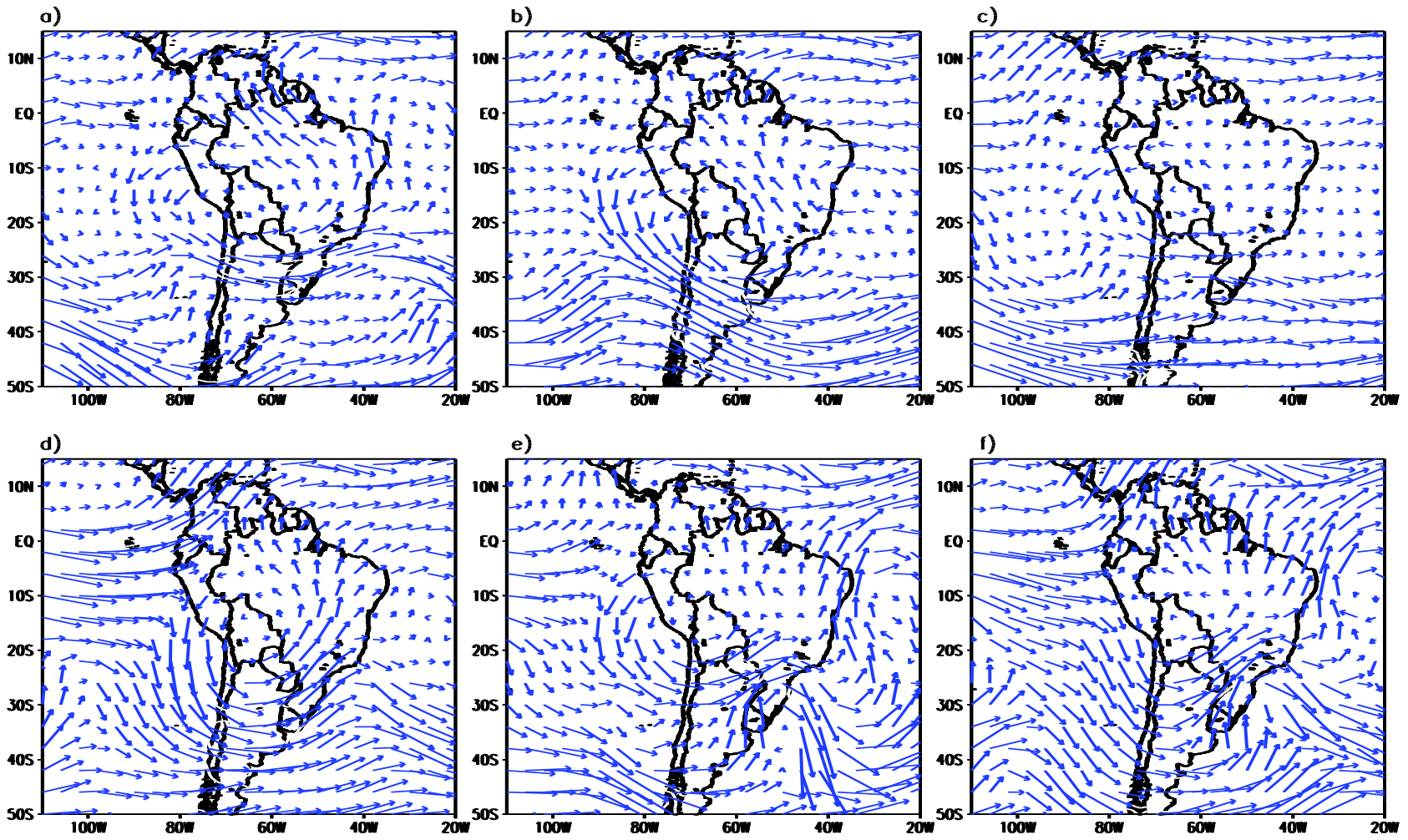


Figura 42: Viento a 200 hPa



## NIVELES MEDIOS

La figura 43 presenta el comportamiento e intensidad de los vientos a 500 hPa, se muestra en la figura 43a) que en la sierra sur los vientos son mayormente del norte y este, mientras que en la figura 43b) los vientos son mayormente del este y esto se debe a la presencia de una circulación anti horaria con un núcleo ubicado entre  $40^{\circ}\text{W}$  y  $25^{\circ}\text{S}$  (vea figura 44b)). En la figura 44d) se observa una circulación anti horaria ubicado al sur de Perú con su centro entre los  $70^{\circ}\text{W}$  y  $26^{\circ}\text{S}$  y que favorece que los vientos en la sierra sur del Perú sean norte y este (vea figura 43d)). En la figura 43e) los vientos mayormente son del este y noreste y se muestra la circulación anti horaria ubicada al oeste de Perú con su centro entre los  $23^{\circ}\text{S}$  y  $95^{\circ}\text{W}$  (vea figura 44e). En la sierra sur se observa la confluencia de vientos del noreste y vientos del oeste (vea figura 43f)). Por último, en la figura 43c) los vientos predominantes son del noreste, también se puede observar una circulación anti horaria al sureste de Brasil, con su núcleo ubicado entre los  $35^{\circ}\text{W}$  y  $26^{\circ}\text{S}$  (ver figura 44c)).

En la figura 45 se observa el transporte de humedad en 500 hPa desde la amazonia peruana y brasilera hacia la sierra sur, esto se debe a la presencia del circulación anti horaria al sureste de Perú (ver figura 44) que favorece el ingreso de los vientos desde el noreste. En los 6 grupos se observa que a esta altura la humedad se encuentra entre los 4 g/kg a 7 g/kg en la sierra sur. El transporte de humedad en algunos casos como en la figura 45a) es debido a los vientos del noreste y noroeste, mientras que en la figura 45b) los vientos transportan humedad desde la selva de Bolivia, en las figuras 45c), 45d) y 45e) los vientos provienen del norte, noroeste, este y noreste. Por último, en la figura 45f) los vientos del noreste, noroeste y suroeste confluyen en la sierra sur.

Pero a un nivel de 550 hPa (figura 46) se observa que el valor mínimo presente en los 6 grupos es de 5g/kg, en algunos casos en la sierra sur oriental los valores de humedad estuvieron por encima de los 6g/kg y algunas regiones donde se presentaron estas condiciones fueron en Apurímac, Cusco, Puno y Arequipa. En la mayoría de los casos los vientos tienen una dirección del norte, noreste y noroeste, que ayudan en el transporte de la humedad desde la Amazonía.

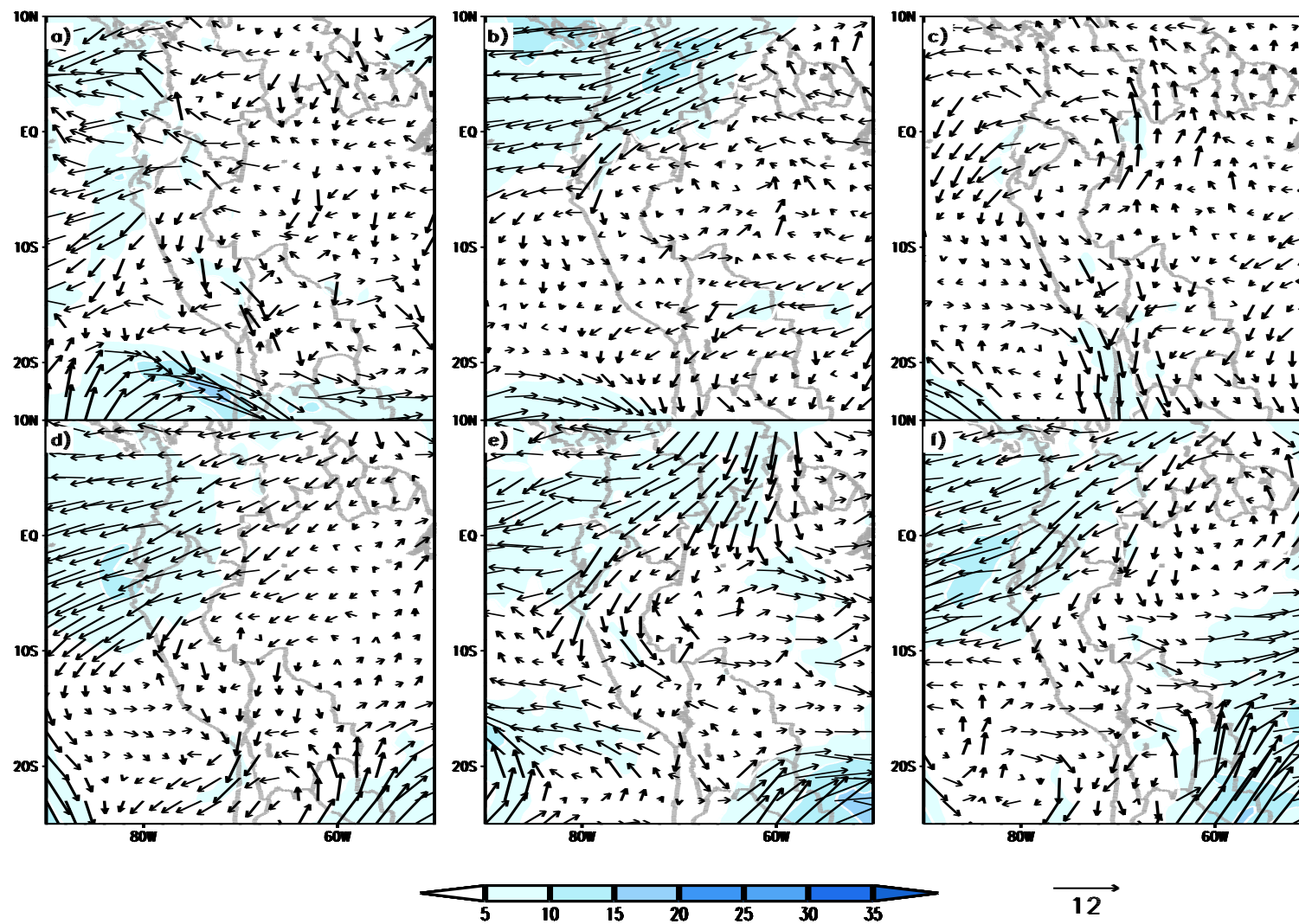


Figura 43: Viento e intensidad a 500 hPa

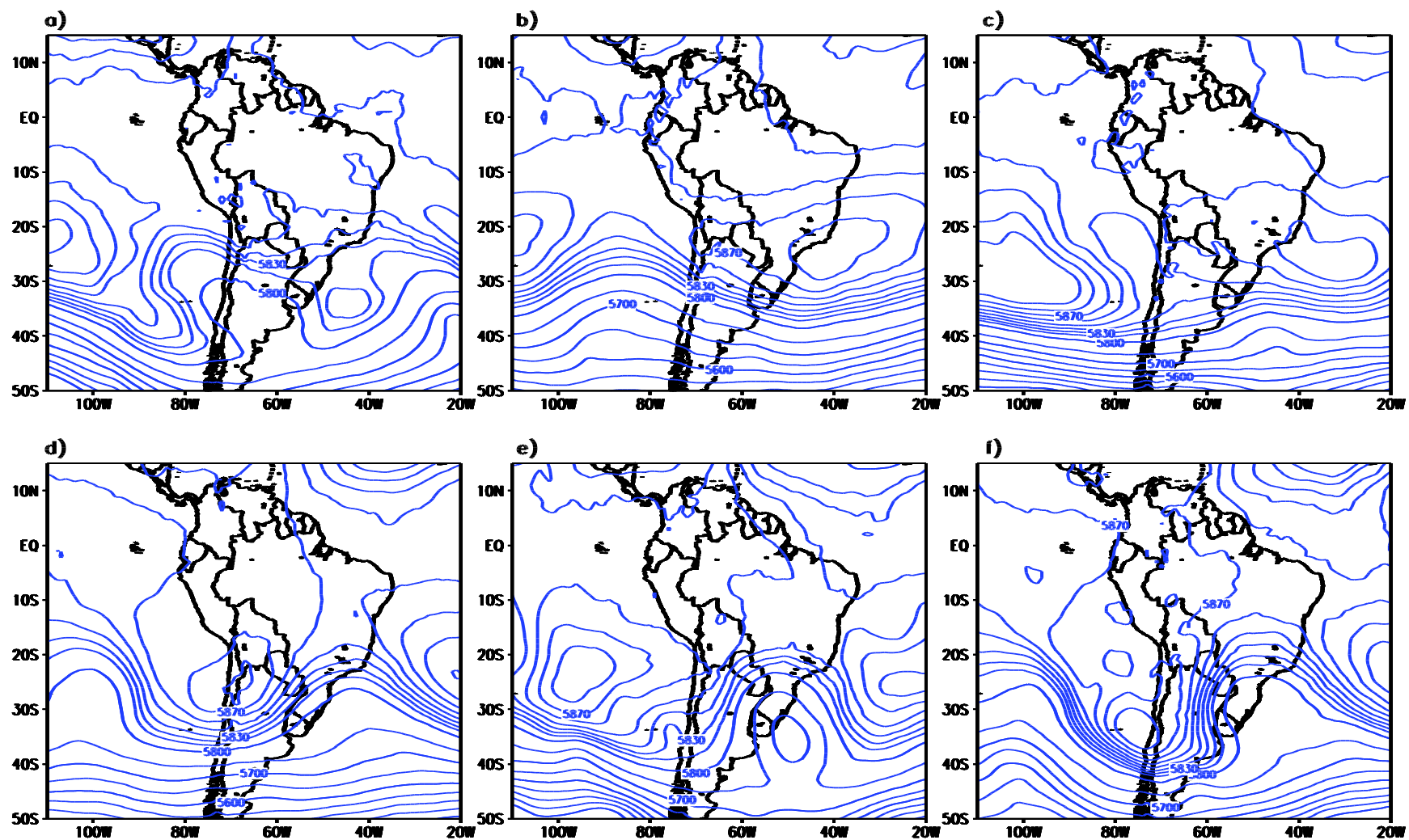


Figura 44: Altura Geopotencial a 500 hPa

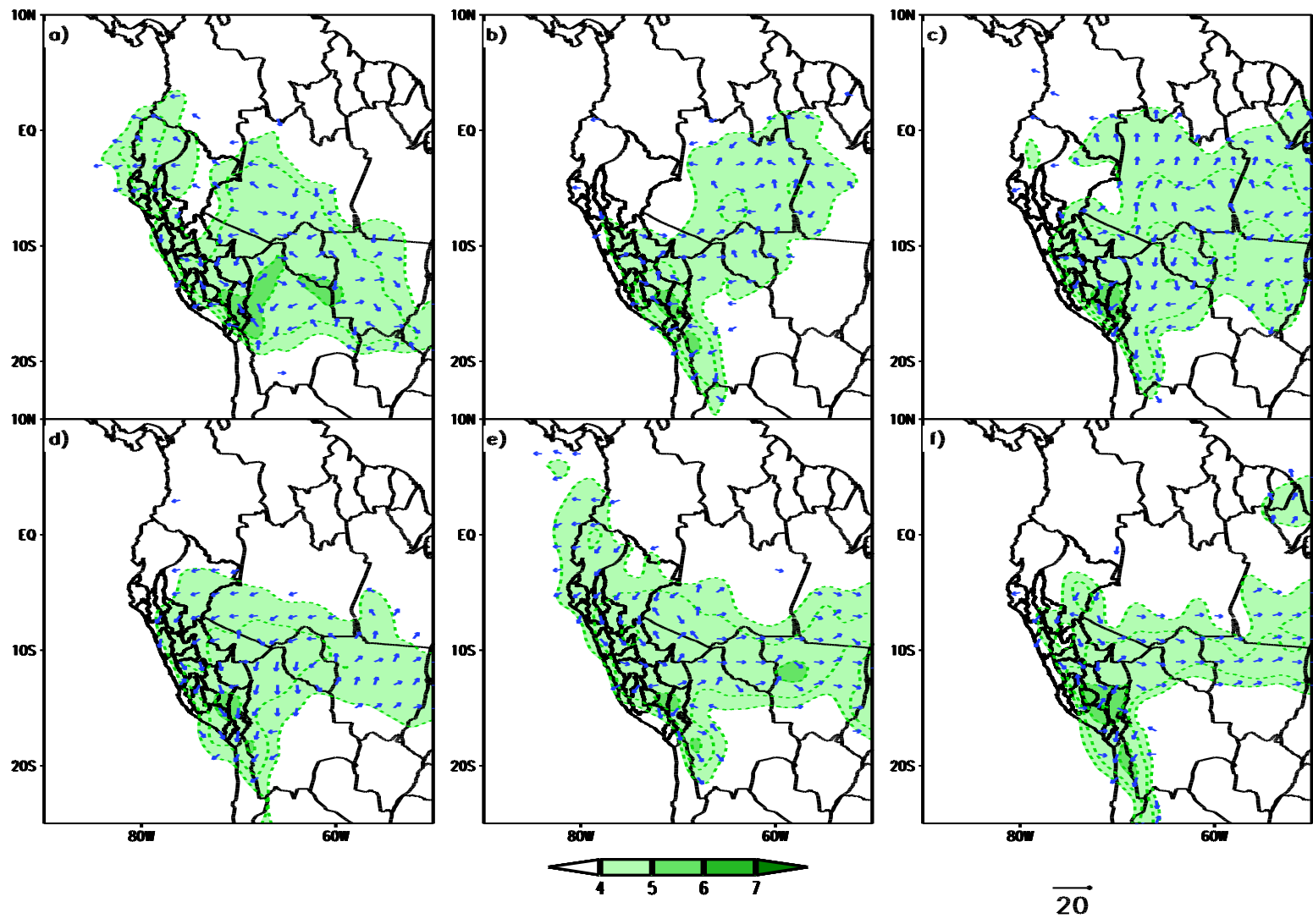


Figura 45: Relación de mezcla a 500 hPa

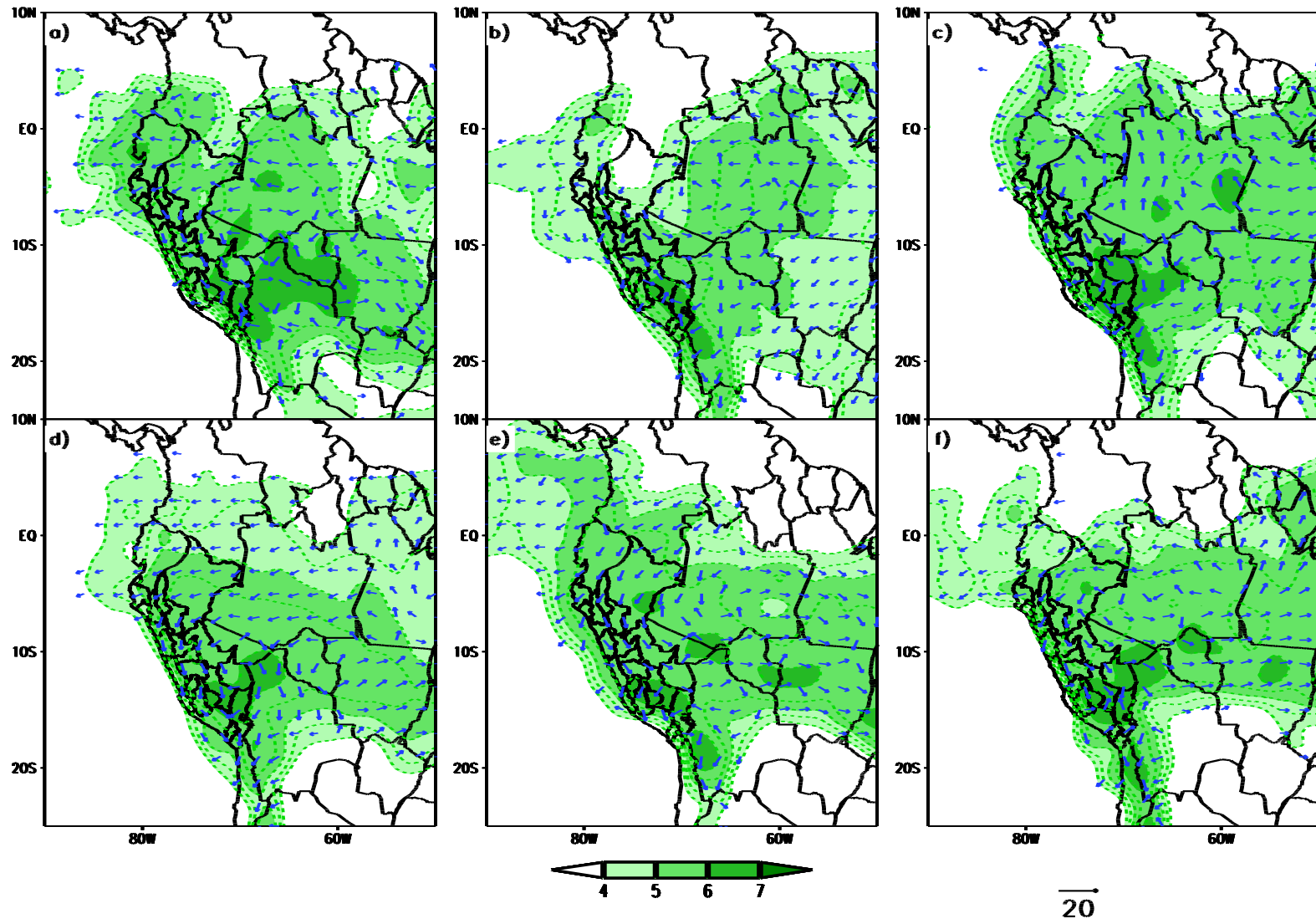


Figura 46: Relación de mezcla a 550 hPa

## NIVELES BAJOS

En la figura 47, muestra los vientos a 850 hPa, donde los vientos mayormente son del norte y cuando se da ese caso la velocidad del viento varia de 8 m/s hasta 12 m/s como se indica en la figura 47a) y 47b). Mientras que; en otros casos, los vientos que son del norte al llegar al zona central del Perú se debilita y las velocidades están por debajo de los 6 m/s. Por último, en la figura 47e) muestra vientos del norte y sur que confluyen en la zona sur de Perú. La dirección del viento indica que transporta humedad principalmente de la Amazonía peruana y en pocos casos de la selva boliviana.

En la figura 48, se grafica la relación de mezcla a un nivel de 850 hPa y que tiene un comportamiento similar a niveles superiores, la humedad proveniente de la Amazonía tiene una dirección norte y noreste. En las regiones de Cusco, Apurímac, Puno y Arequipa, la concentración de la humedad es mayor a 13 g/kg. Los vientos en este nivel son mayormente del norte que transporta humedad desde la amazonia y la cantidad que transporta varía entre los 10 y 12 g/kg. En la figura 48e), se observa que los vientos provienen del norte favoreciendo el avance de la humedad hacia la zona sur de Perú.

En la figura 49, se muestra un sistema de baja presión entre Bolivia, Argentina y Brasil con su centro en 20°S y 60°W (figura 49a)) y una alta presión al sur de Brasil con su centro en 40°S y 40°W, mientras que en las figuras 49b) y 49c) se puede observar un sistema de alta presión al sureste de Brasil que se ve reflejada en niveles medios (500 hPa) en las figuras 44b) y 44c).



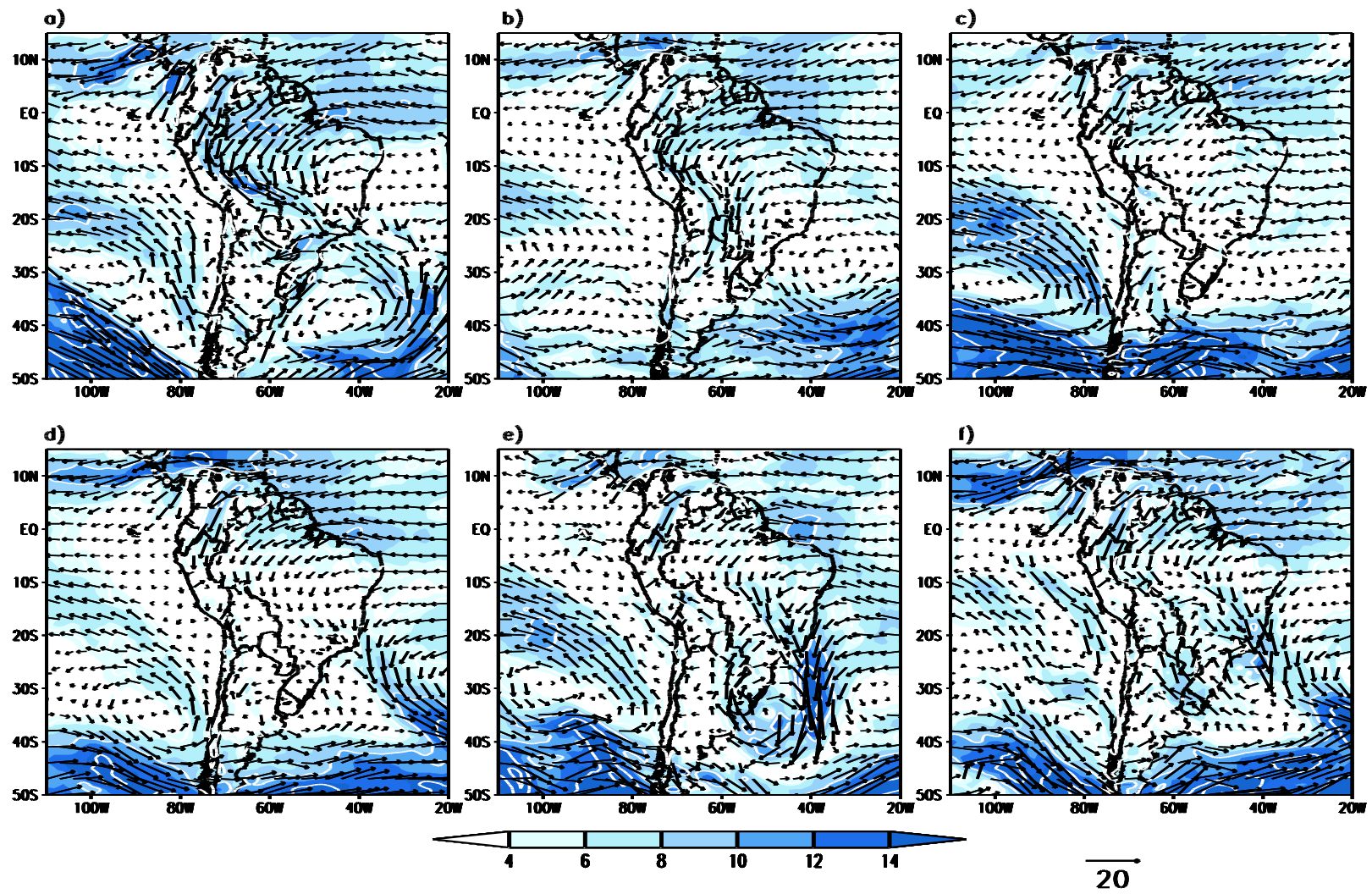


Figura 47: Viento e intensidad a 850 hPa

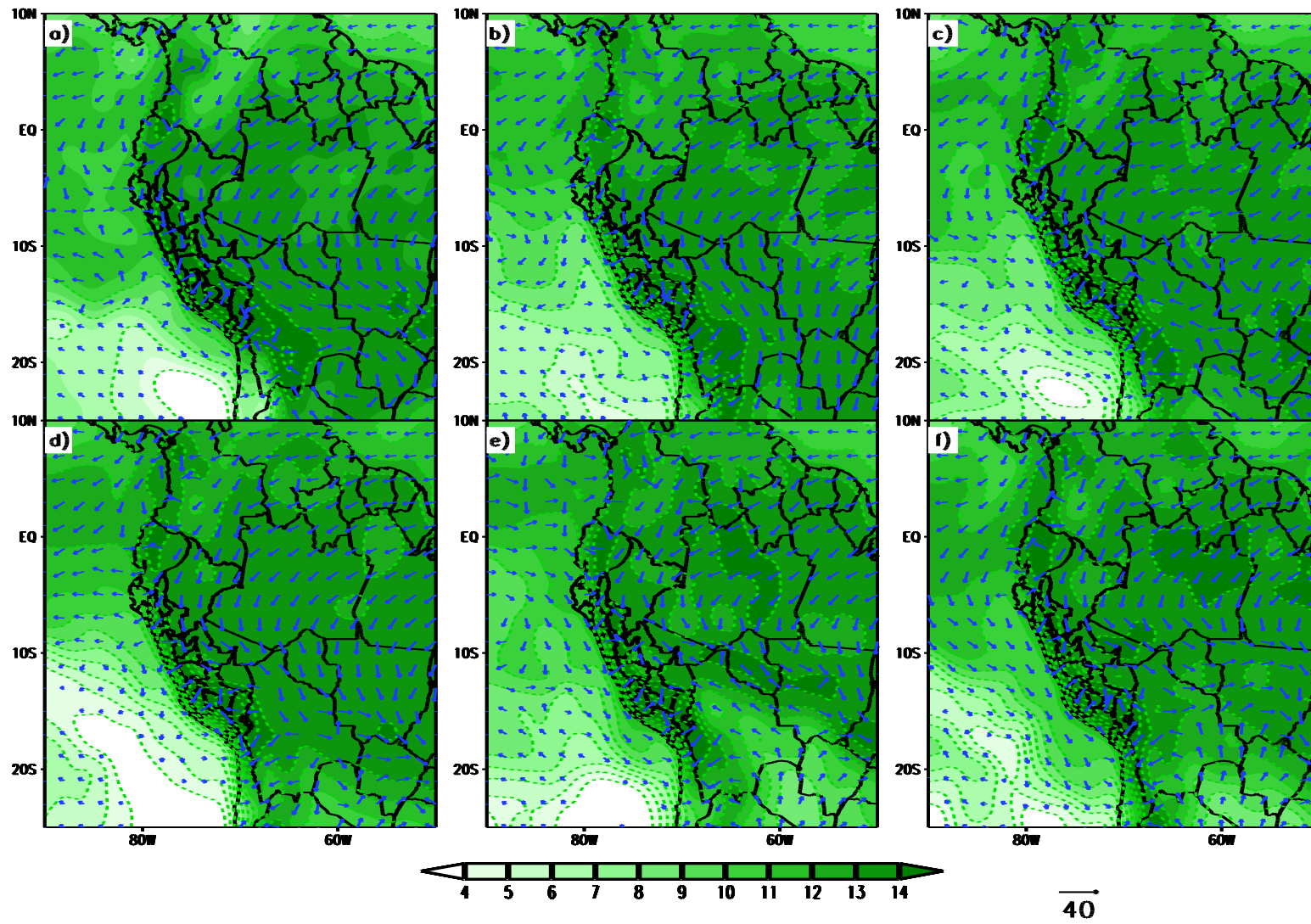


Figura 48: Relación de mezcla a 850 hPa



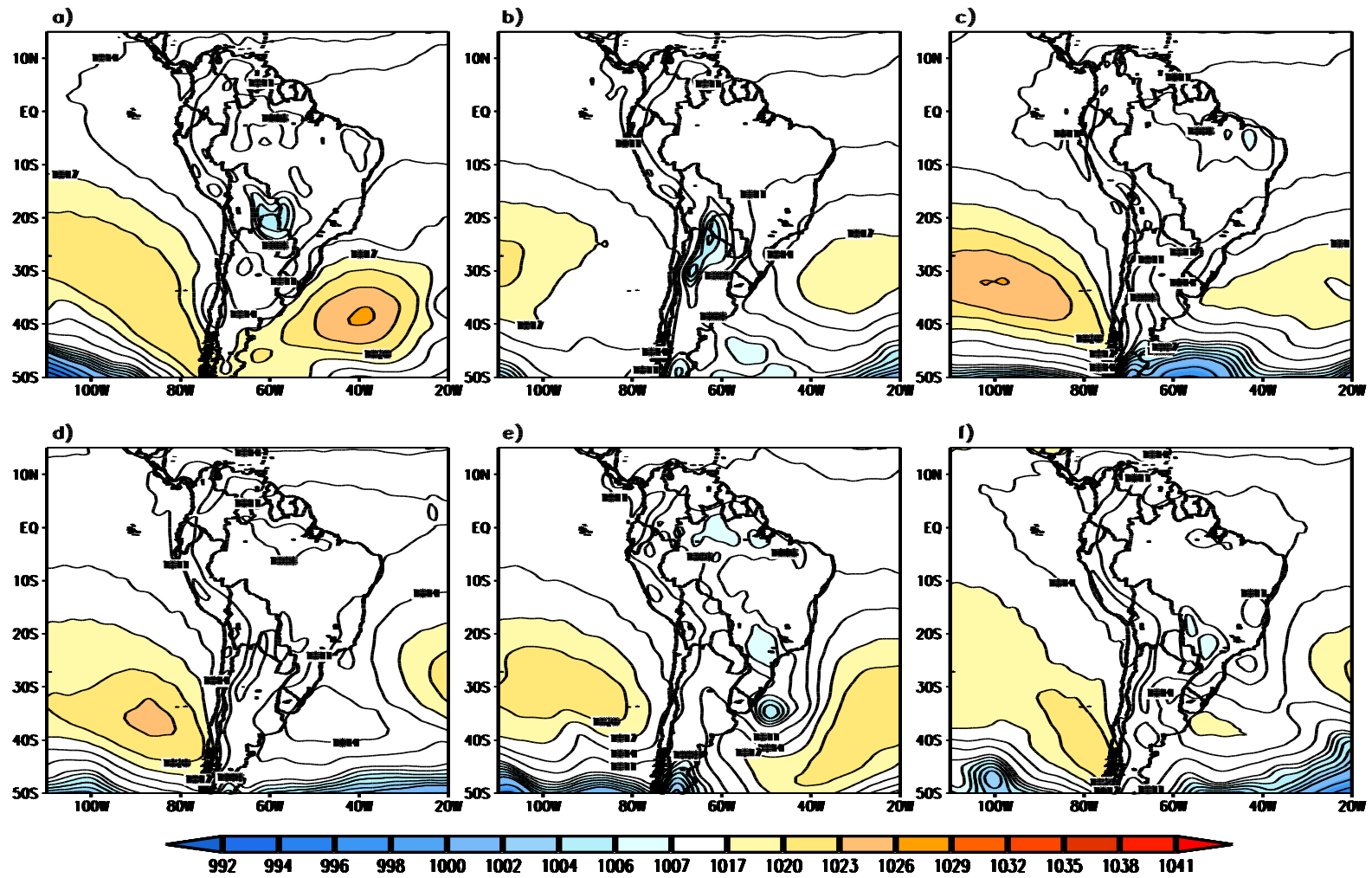


Figura 49: Presión a nivel del mar

Con los datos de estaciones se sabe que días se registró lluvia en la sierra sur, cabe resaltar que hay que necesidad de corroborar si hubo un sistema convectivo, por ello se usó la radiación de onda larga emergente (ROL) medido por la NOAA de órbita polar, su resolución es de  $2.5^\circ$  en latitud y longitud, además Arkin y Ardanuy (1989) han realizado estudios de actividad convectiva en regiones tropicales y subtropicales, entre otros. Para ellos un umbral menor a  $230 \text{ Wm}^{-2}$  es considerado como convección humedad profunda, se considera ello porque resalta que el tope de la nube este por encima de los 300 hPa. Garreaud en su estudio utiliza como umbral  $\text{ROL}_A=220 \text{ Wm}^{-2}$ , lo que indica que cuando es convección activa ( $\text{ROL}_A < 220 \text{ Wm}^{-2}$ ).

En la figura 50 se muestra el promedio de ROL, donde se observa que en la sierra sur los valores de ROL cumplen con el umbral propuesto por Garreaud ( $220 \text{ Wm}^{-2}$ ); en nuestros casos el umbral de ROL está por debajo de  $210 \text{ Wm}^{-2}$  y en las figuras 50b), 50d) y 50e) se observan valores por debajo de  $180 \text{ Wm}^{-2}$ , que nos enfatiza que la convección es profunda y los sistemas que se formaron están por encima de los 300 hPa y con un gran desarrollo vertical.

En la figura 51, se grafica la anomalía de ROL en la mayoría de los casos es negativa, lo que nos indica que los valores de ROL están por debajo de los  $220 \text{ Wm}^{-2}$  y por ende hay presencia de convección profunda en la sierra sur. En los casos donde la anomalía es negativa, el núcleo de la AB promedio medida se encuentra ubicada al sur de Perú y en algunos casos su núcleo es fuerte o débil. Cuando la AB es zonal como en el grupo 51a) solo se observa anomalía negativa en la sierra oriental y cuando la AB es meridional como en el grupo 51d) y 51f) los valores más negativos se dan en la sierra occidental. También se resalta que la AB promedio climática en los grupos 51d) y 51f) se encuentra al sur de Perú, mientras que en los grupos 51a), 51c) y 51e) la AB no está bien desarrollada y se ubica en Brasil.

En la figura 52 se observa la anomalía de relación de mezcla a 500 hPa, donde la mayoría de los grupos presentaron anomalías positivas y evidenciando la presencia de humedad en la sierra sur desde niveles medios hasta niveles bajos. Los vientos promedios del norte en este nivel transportan la humedad desde la selva hacia la sierra y también la presencia de vientos del este que confluyen en la sierra sur y favorecen la formación de nubes de gran desarrollo vertical. Las anomalías positivas son mayores en la sierra sur cuando el núcleo

de la AB promedio medida se encuentra al sur de Perú y el núcleo de la AB promedio climática de los grupos se encuentra al norte o es de menor intensidad.

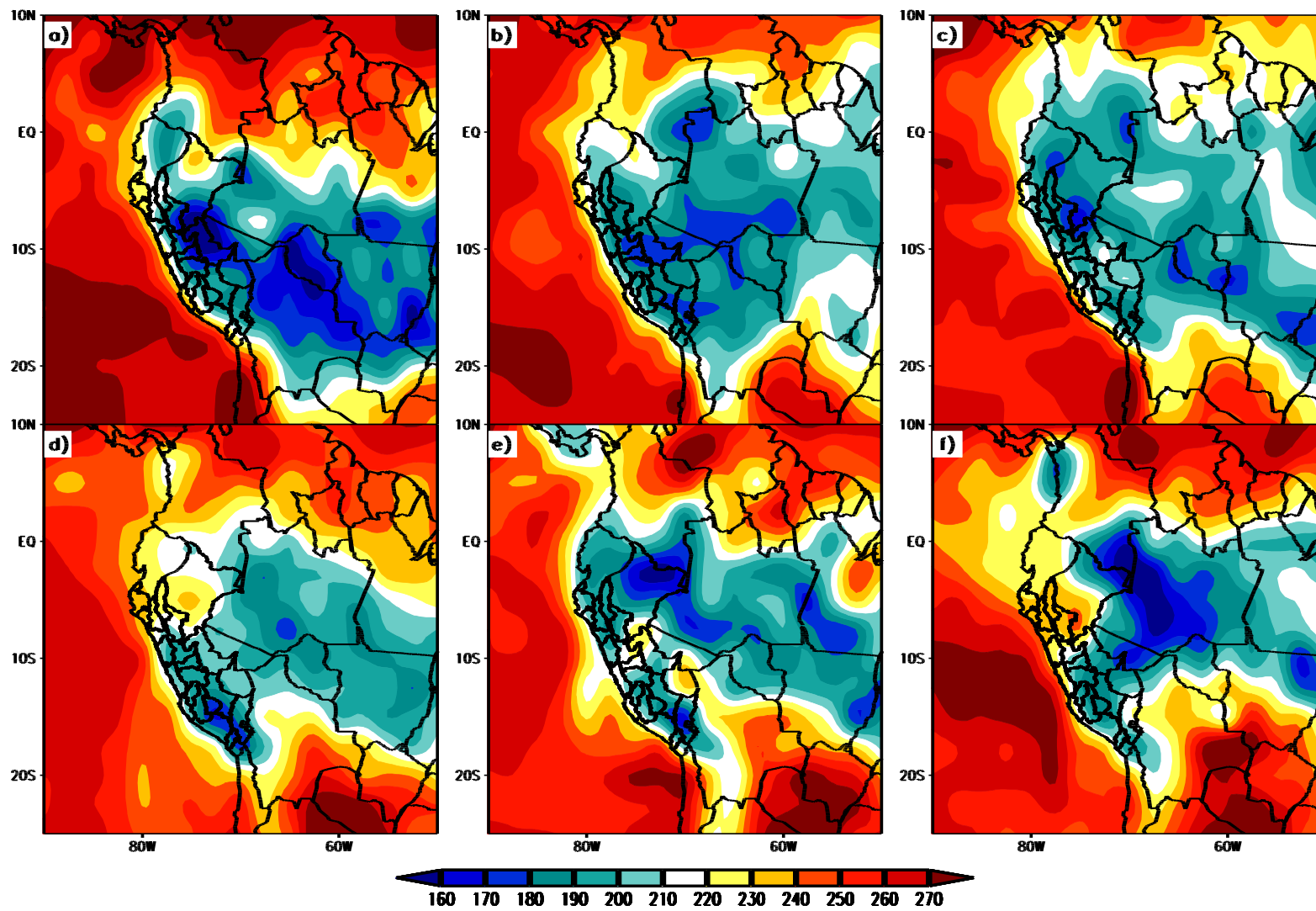


Figura 50: Radiación de onda larga (ROL)

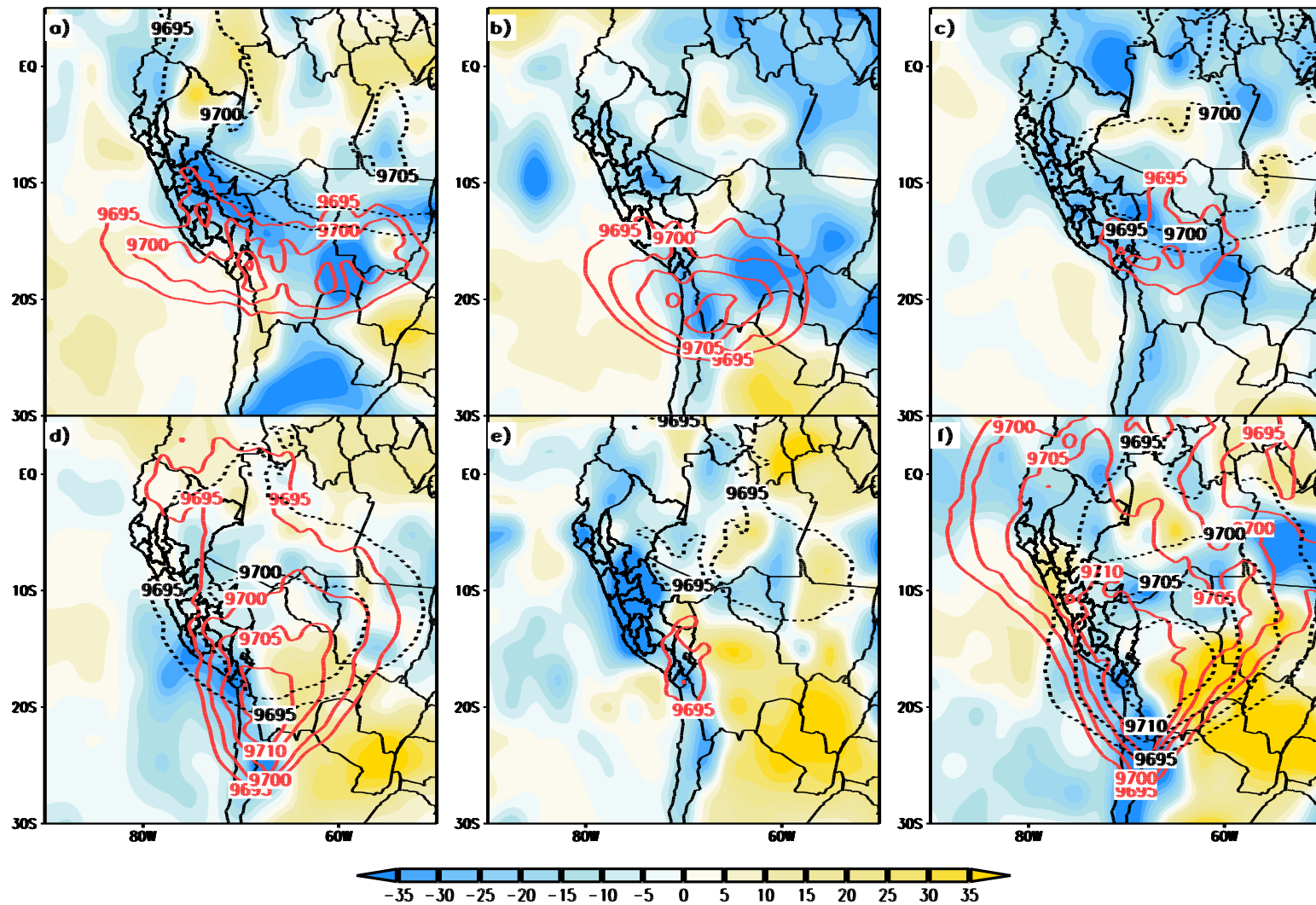


Figura 51: Anomalía de ROL y altura geopotencial medida (línea roja sólida) y climática (línea negra en guion) a 300 hPa



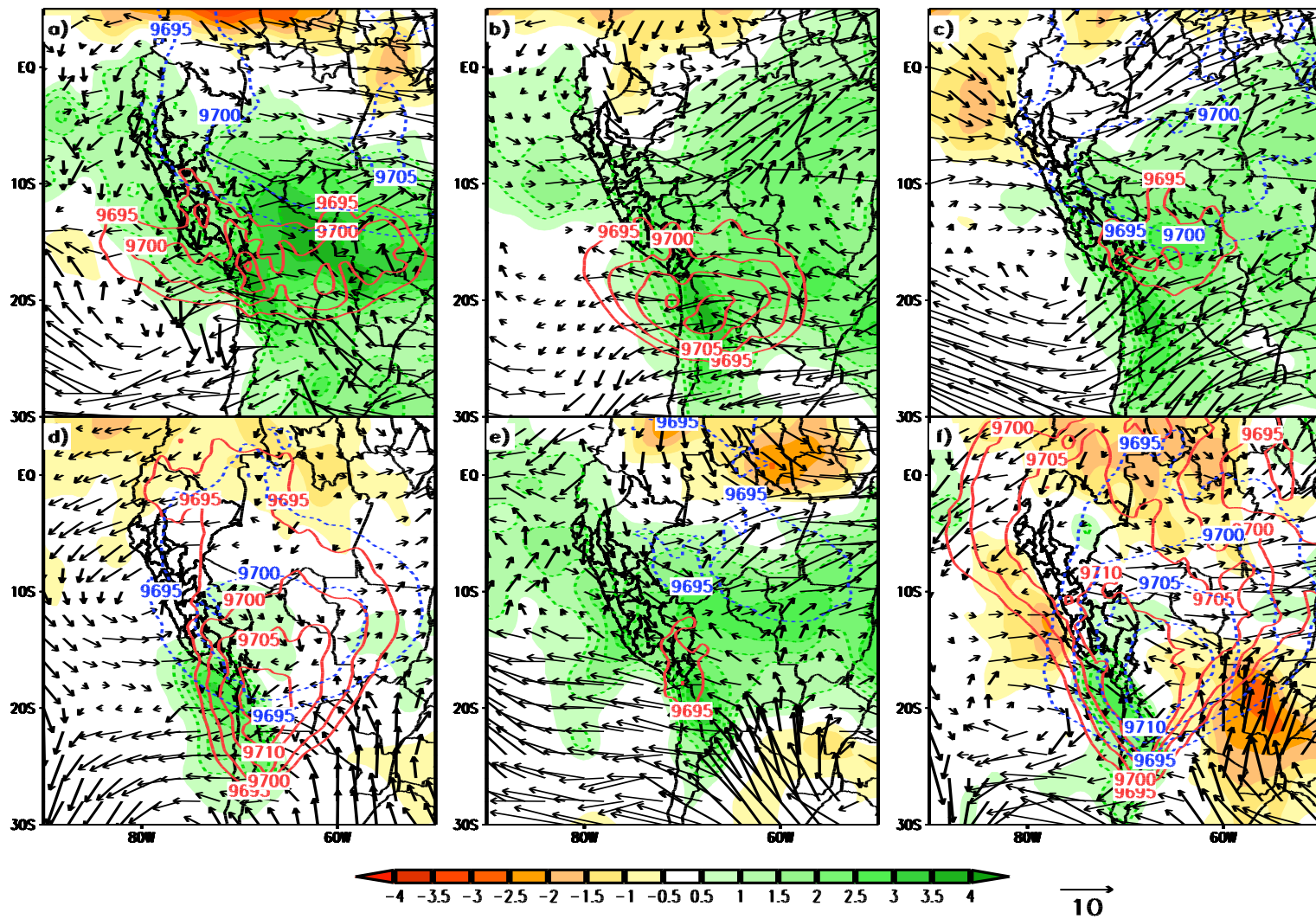


Figura 52: Anomalia de relación de mezcla 500 hPa y altura geopotencial medida (línea roja solida) y climática (línea negra en guion) a 300 hPa

## **4.2 Establecer mecanismos físicos de la ocurrencia de lluvias extremas.**

Para observar los mecanismos físicos que estuvieron presentes se realizó cortes latitudinales en el área donde el número de estaciones es mayor y también donde se presentaron los mayores valores de acumulados mensuales, por ello se seleccionó la latitud de  $-15^{\circ}$  para realizar los cortes.

Desde la figura 53 hasta la figura 58 se observa el corte latitudinal, donde se grafica la humedad específica en toda la capa (1 000 – 200 hPa), viento resultante y velocidad vertical que es un indicador importante para señalar el ascenso de viento. Se observa en las figuras que en niveles bajos desde 900 hPa los vientos tienen un dirección noroeste y cuando se acercan a la cordillera de los andes cambian de dirección por suroeste que asciende paralelamente a la cordillera hasta niveles medios (600 – 500 hPa) donde convergen con los vientos provenientes del norte y de la zona oriental de la cordillera con dirección noreste. Además, la humedad específica que varía desde niveles altos a bajo con valores entre los 4 a 8 g/kg, respectivamente. En el lado occidental de la cordillera se observa un fuerte ascenso de la velocidad vertical entre los -1.4 a -0.2 Pa/s. Todo contribuye para la formación de nubes de extensión vertical que favorece la formación de lluvias extremas.

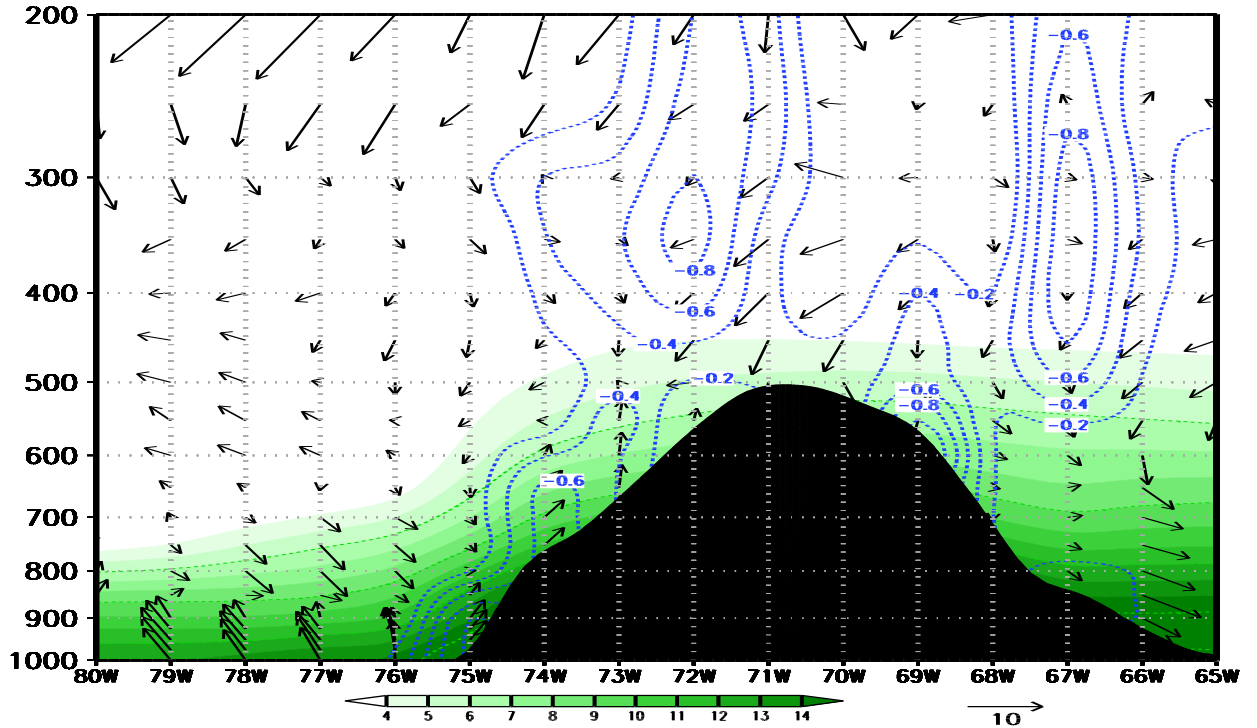


Figura 53: Corte latitudinal en  $-15.5^\circ$ , velocidad vertical (línea discontinua), humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 1

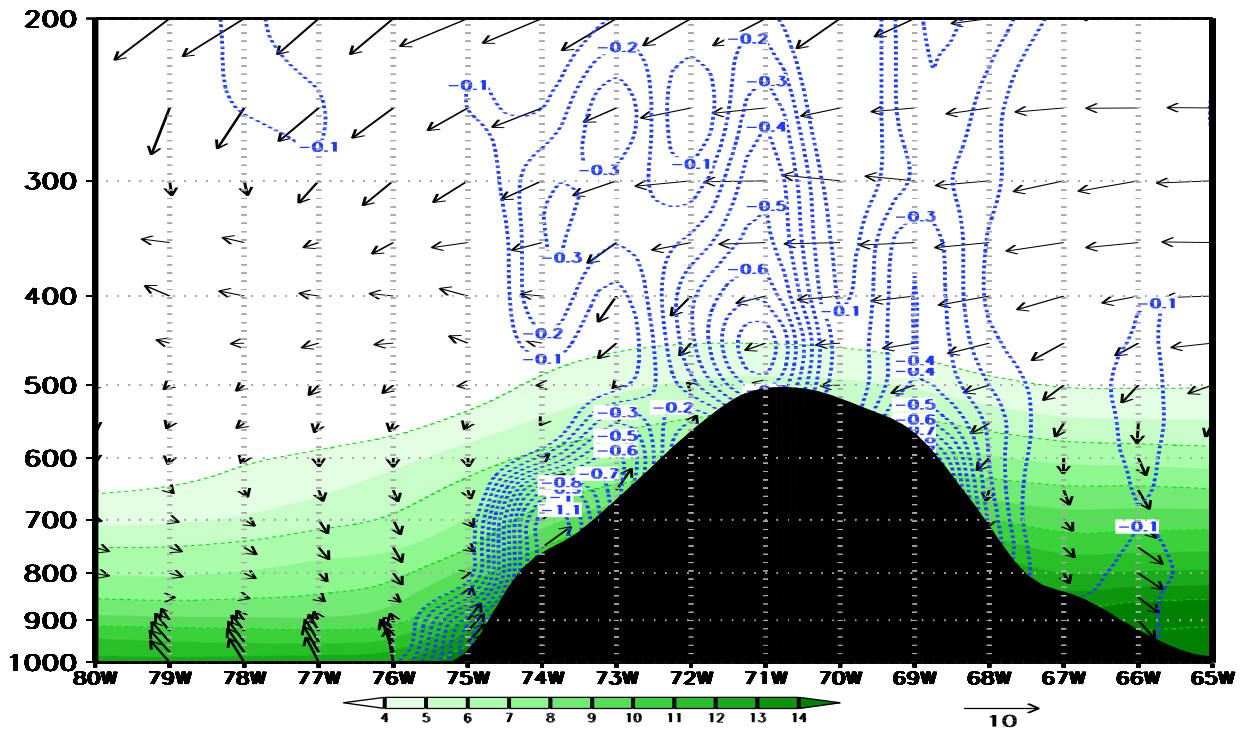


Figura 54: Corte latitudinal en  $-15.5^\circ$ , velocidad vertical (línea discontinua), humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 2



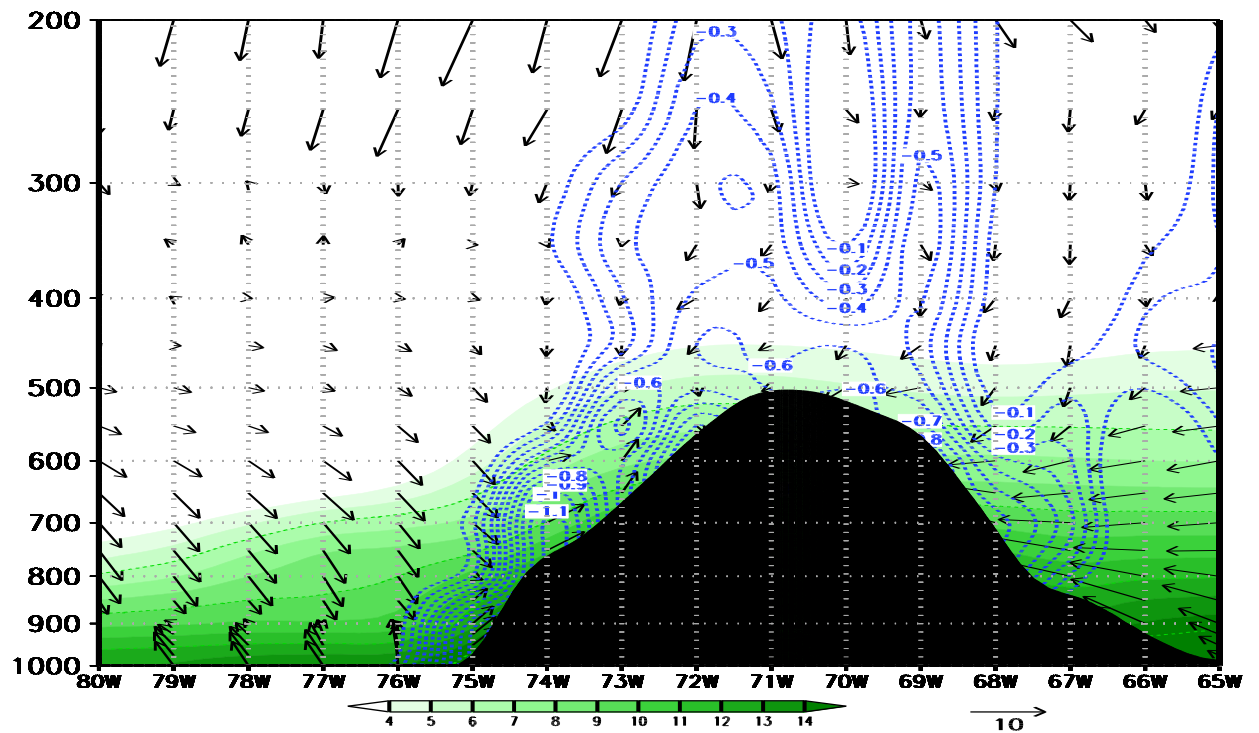


Figura 55: Corte latitudinal en  $-15.5^\circ$ , velocidad vertical (línea discontinua), humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 3

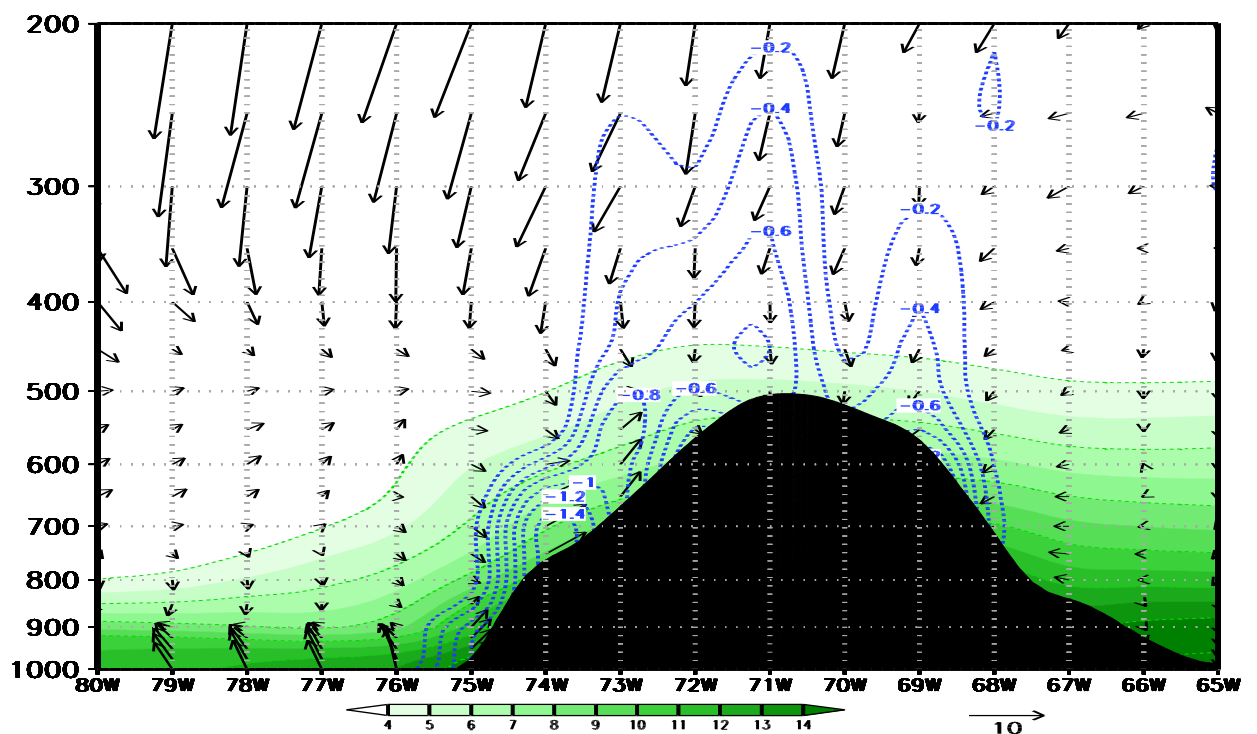


Figura 56: Corte latitudinal en  $-15.5^\circ$ , velocidad vertical (línea discontinua), humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 4

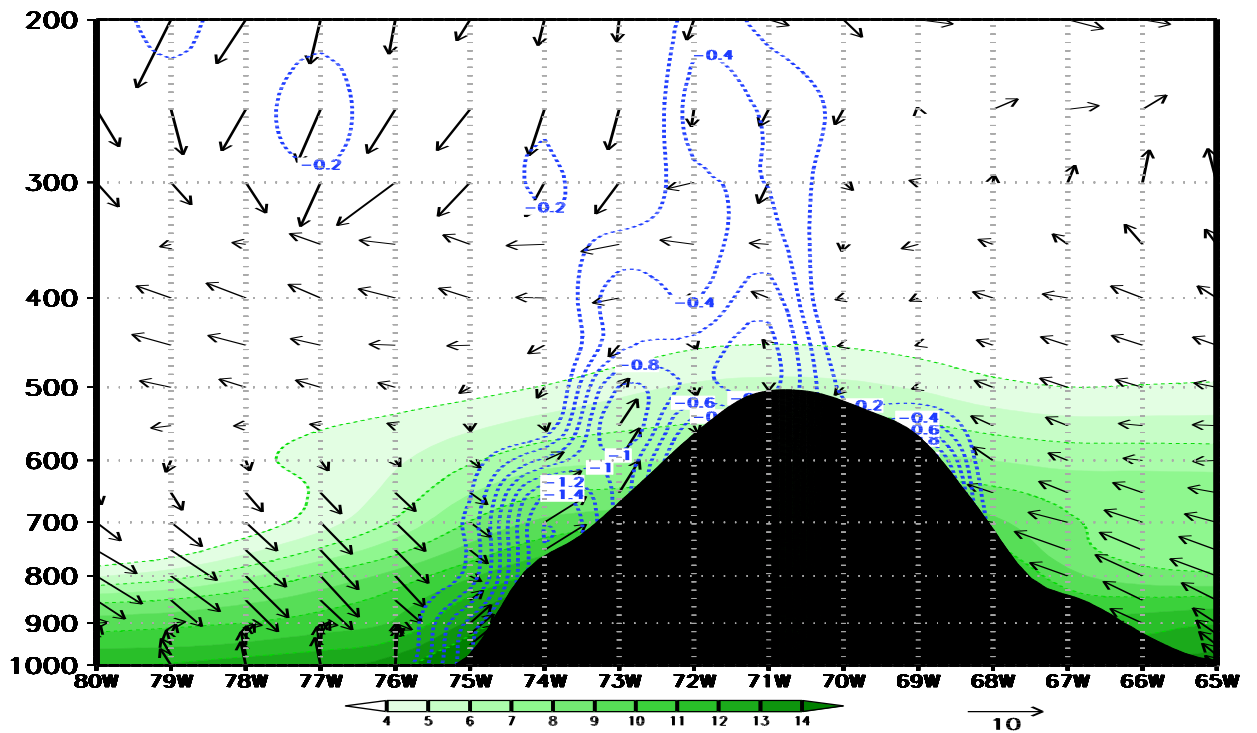


Figura 57: Corte latitudinal en  $-15.5^\circ$ , velocidad vertical (línea discontinua), humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 5

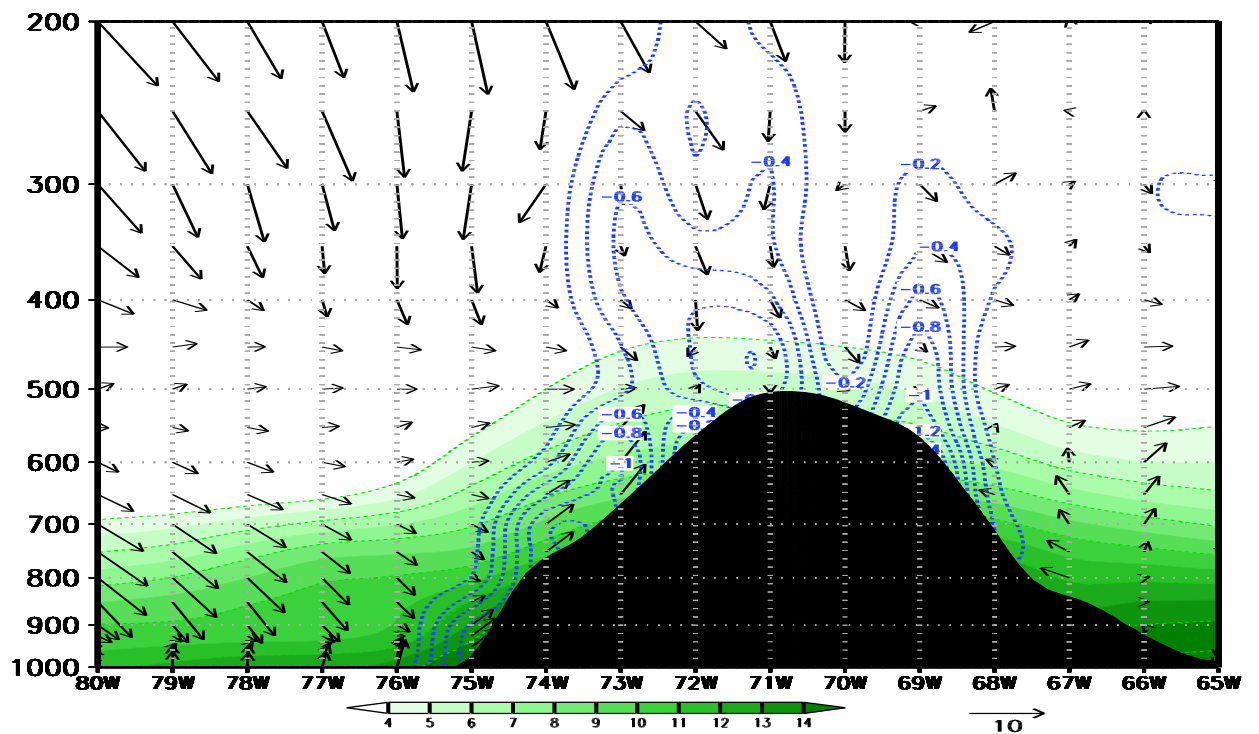


Figura 58: Corte latitudinal en  $-15.5^\circ$ , velocidad vertical (línea discontinua), humedad específica (sombreado) y viento resultante (flechas) del grupo 6

El jet de bajos niveles (LLJ) influye en la formación de lluvia en la sierra, ya que transporta la humedad de la Amazonía hacia la sierra, para ello se muestra 2 fechas de los 20 casos donde el LLJ estuvo presente. En la figura 59, se observa que el 25 de febrero del 2008 (“D”) el LLJ estaba en sus últimos días registrando velocidades hasta de 15 m/s, pero días previos al evento el 23 de febrero del 2008 (“D-2”) la velocidad del LLJ fue de hasta 21 m/s, favoreciendo el transporte de humedad de la Amazonía y en la inestabilidad para la formación de nubes de desarrollo vertical que generan la lluvia extrema en la sierra sur.

En la figura 60, el día 23 de febrero del 2008 (“D”) se observa el LLJ que alcanza velocidades de hasta 21 m/s, el LLJ estuvo presente desde días anteriores y sus velocidades variaron de los 12 a 18 m/s. El LLJ del norte, cuando se encuentra con la cordillera genera el transporte de humedad por ascenso de los vientos o por el paso a través de los valles hasta la sierra sur, también se corrobora lo que dijeron Velasco y Fritsch (1987) y Silva Dias (1987), señalando que existe una relación de la convergencia de vapor de agua del LLJ en niveles bajos con la formación de sistemas convectivos a mesoescala.

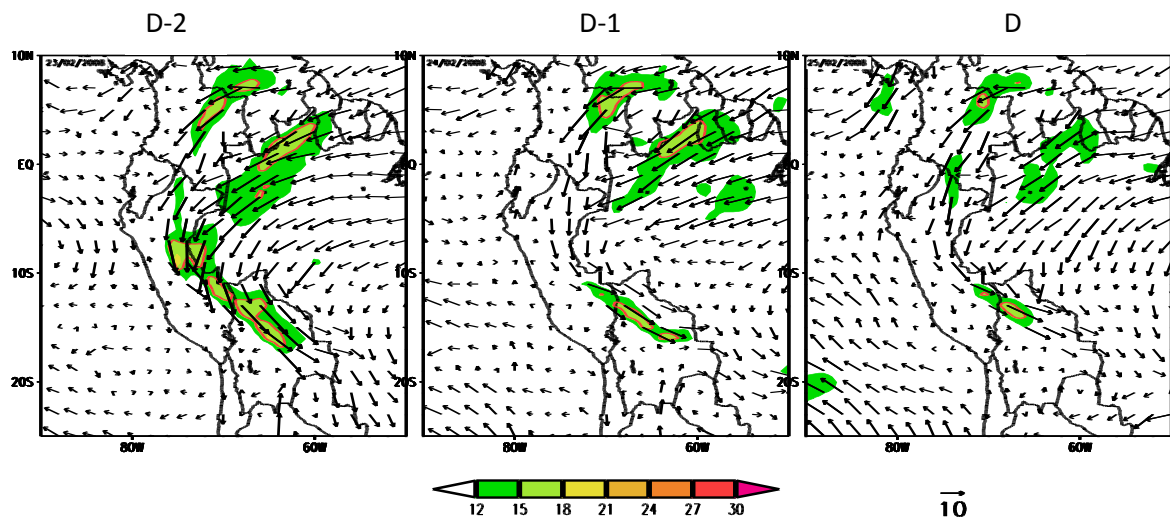


Figura 59: jet de bajos niveles del norte (LLJ)

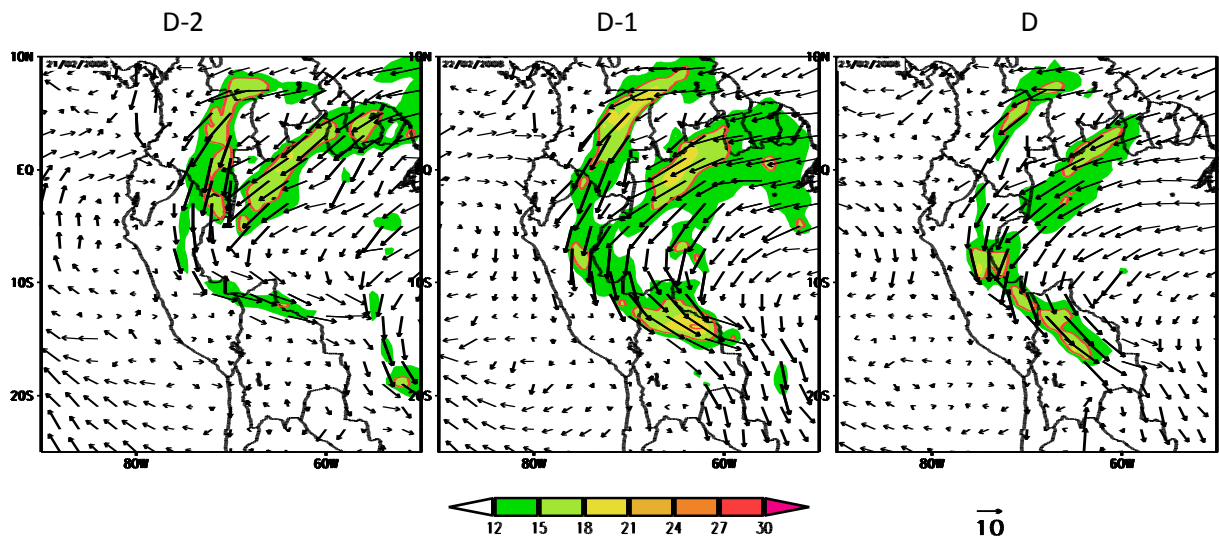


Figura 60: jet de bajos niveles del norte (LLJ)

#### 4.3 Establecer modelos conceptuales de patrones de circulación sinóptica en ocurrencia de eventos extremos de lluvias.

El patrón característico para eventos de lluvia extrema en la sierra sur será: la configuración de la AB con su núcleo ubicado al sur de Perú, entre Bolivia y Brasil, favoreciendo la divergencia en la sierra sur, el ingreso de una vaguada al oeste de Perú favoreciendo la inestabilidad en la sierra central y sur, todo en niveles altos.

En niveles medios y bajos, la presencia de humedad. Un sistema de alta presión en niveles medios ubicada al sur de Brasil y este de Bolivia, favoreciendo que los vientos en este nivel tengan una dirección este y contribuyen en el transporte de humedad de la amazonia a la sierra sur. La advección de humedad en niveles bajos se debe a la presencia del LLJ, que ayuda en el transporte de la humedad hacia la sierra sur. (Vea figura 61)

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Divergencia en niveles altos         | $> 5 * 10^{-5} s^{-1}$ |
| Relación de mezcla en niveles medios | $> 5 g/kg$             |
| Relación de mezcla en niveles bajos  | $> 13 g/kg$            |
| ROL                                  | $< 210 Wm^{-2}$        |

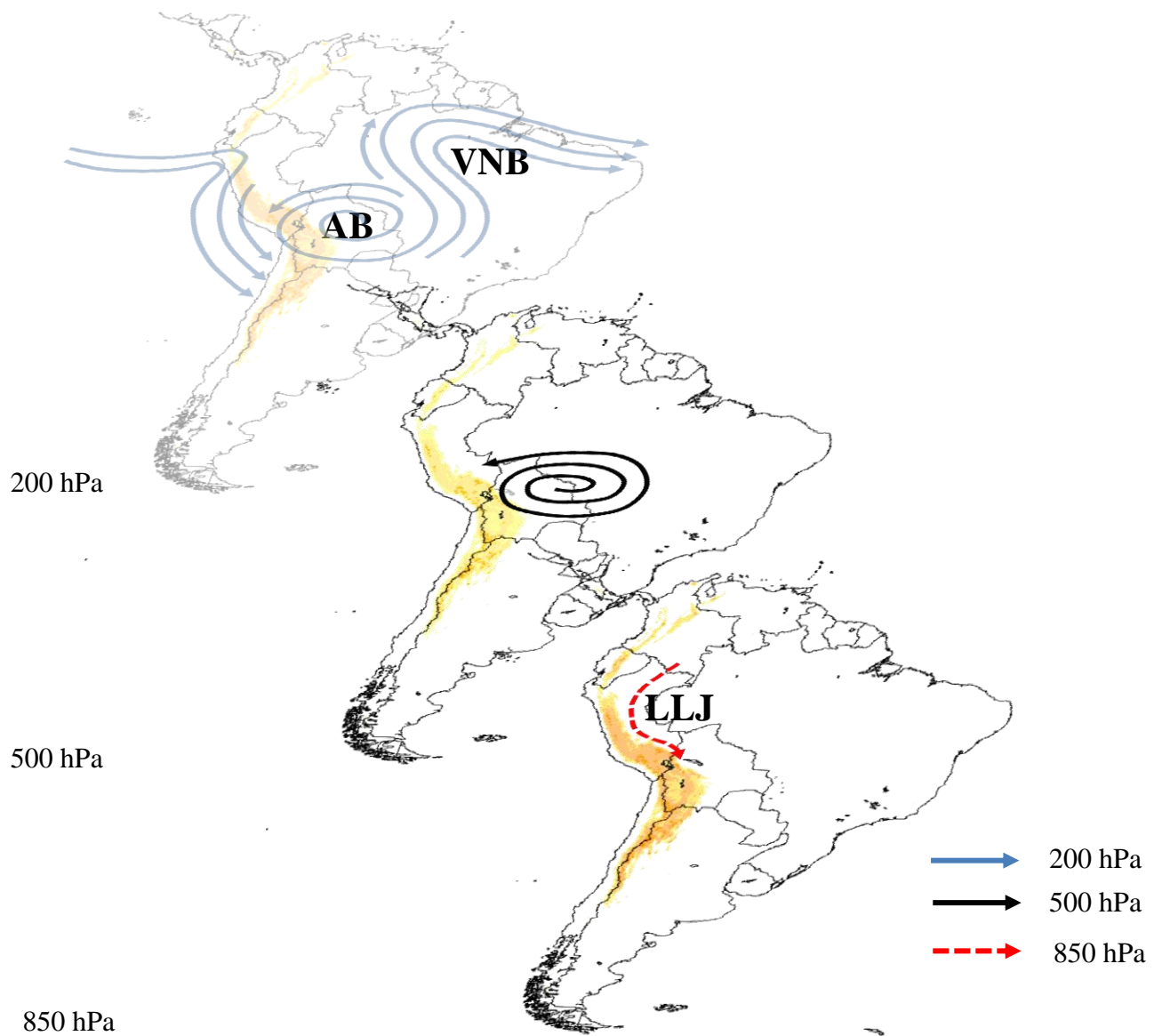


Figura 61: Modelo conceptual para lluvias extremas en la sierra sur. Niveles Altos en color azul, niveles medios en color negro y niveles bajos en color rojo.

FUENTE: Elaboración Propia

## V. CONCLUSIONES

### **Establecer umbrales de lluvia mediante la metodología de percentiles.**

- Las estaciones de latitudes más bajas presentaron valores altos de percentiles de 90, 95 y 99.
- Las estaciones que están ubicadas alrededor del lago Titicaca y en los valles de Arequipa que limita con Cusco, presentaron valores altos de normales, principalmente en los meses de enero y febrero.
- En niveles altos se obtuvo valores de divergencia mayores a  $5 * 10^{-5} s^{-1}$ .
- En niveles medios los valores de relación de mezcla son mayores a 5 g/kg.
- En niveles bajos los valores de relación de mezcla son mayores a 13 g/kg.
- El nuevo umbral de ROL para la sierra sur que se obtuvo fue de  $210 Wm^{-2}$  y los valores por debajo de ese umbral nos indica la presencia de convección profunda.

### **Establecer mecanismos físicos de la ocurrencia de lluvia extremas.**

- En niveles bajos se presentaron vientos desde el océano pacífico con dirección noroeste y cerca de la cordillera los vientos tienen dirección suroeste que ascienden hasta niveles medios donde convergen con los vientos provenientes del norte y de la zona oriental de la cordillera con dirección noreste.
- Humedad específica varía entre los 4 g/kg (niveles medios) a 8 g/kg (niveles bajos).
- Del lado occidental de la cordillera el fuerte ascenso de la velocidad vertical que varía entre los -1.4 a -0.2 Pa/s. Todo ello contribuye para la formación de nubes de extensión vertical que favorece la formación de lluvias extremas.

**Establecer modelos conceptuales de patrones de circulación sinóptica en la ocurrencia de eventos extremos de lluvia.**

- En niveles altos, la Alta de Bolivia favoreció la divergencia y la presencia de una vaguada al oeste de Perú generó inestabilidad en la sierra central y sur.
- En niveles medios, la circulación de giro anti-horaria al sureste de Brasil favorece que los vientos sean del este y noreste en la zona sur, además de apoyar en el transporte de la humedad.
- La convergencia que se formó en la sierra sur, también está relacionada por la presencia del LLJ como otro factor de transporte de humedad desde la selva norte hasta la sierra sur.
- La humedad presente desde niveles medios hasta bajos.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda trabajar con rangos de año más extensos, ya que la configuración de los sistemas suelen variar cada año y con un rango tan corto no se puede observar bien una consistencia y variabilidad.
- Para las agrupaciones de los casos se recomienda que se aplique un método más objetivo, se pueden utilizar métodos estadísticos como los conglomerados y aplicar métodos de agrupación como k-means.
- Se recomienda estudiar más casos donde participe más LLJ y el sistema anti-horario de niveles medios, ya que en este trabajo solo estuvieron presente en una cantidad mínima en los grupos y son sistemas muy importantes para la formación de lluvias extremas.
- Se recomienda realizar el estudio con otras análisis o re-análisis como el ETA o ERA-interim.



## VII. BIBLIOGRAFÍA

- ABRAMOWITZ, M. Y STEGUN, I. A. (1972): Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. New York: Dover.
- American Meteorological Society. Meteorology Glossary (en línea) 2015. Consultado 22 jul 2018. Disponible en <http://glossary.ametsoc.org/>
- Albert M.G. Klein Tank, Francis W. Zwiers y Xuebin Zhang. Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. World Meteorological Organization, 2009.
- Alessandro, A P. 1998. Contribuciones al estudio de la climatología sinóptica en la Argentina. Tesis Dr. Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Buenos Aires. 217.
- Alfaro, L. (2014): “Estimación de Umbrales de Precipitaciones Extremas para la emisión de Avisos Meteorológicos”. Nota Técnica 001-SENAMHI-DGM.
- Barry R.G. and Perry A.H, (1973): "Synoptic Climatology: Methods and Applications". Methuen, 555 p.
- CPT/IGP/Ministerio del Ambiente. “¿Qué son modelos numéricos?”. Lima, Perú.
- Coronel A., Bischoff Sf Scarabotti D. y Lara M.A (2001): "Tendencias de las masas de aire y su relación con las temperaturas en superficie". Inédito.
- Coronel A., Escobar G y Bischoff S (2001): "Circulación regional asociada a masas de aire cálidas en el centro de Argentina". Inédito.
- Crowe, P.R. (1971): "Concepts in Climatology". Longman, 589 p.

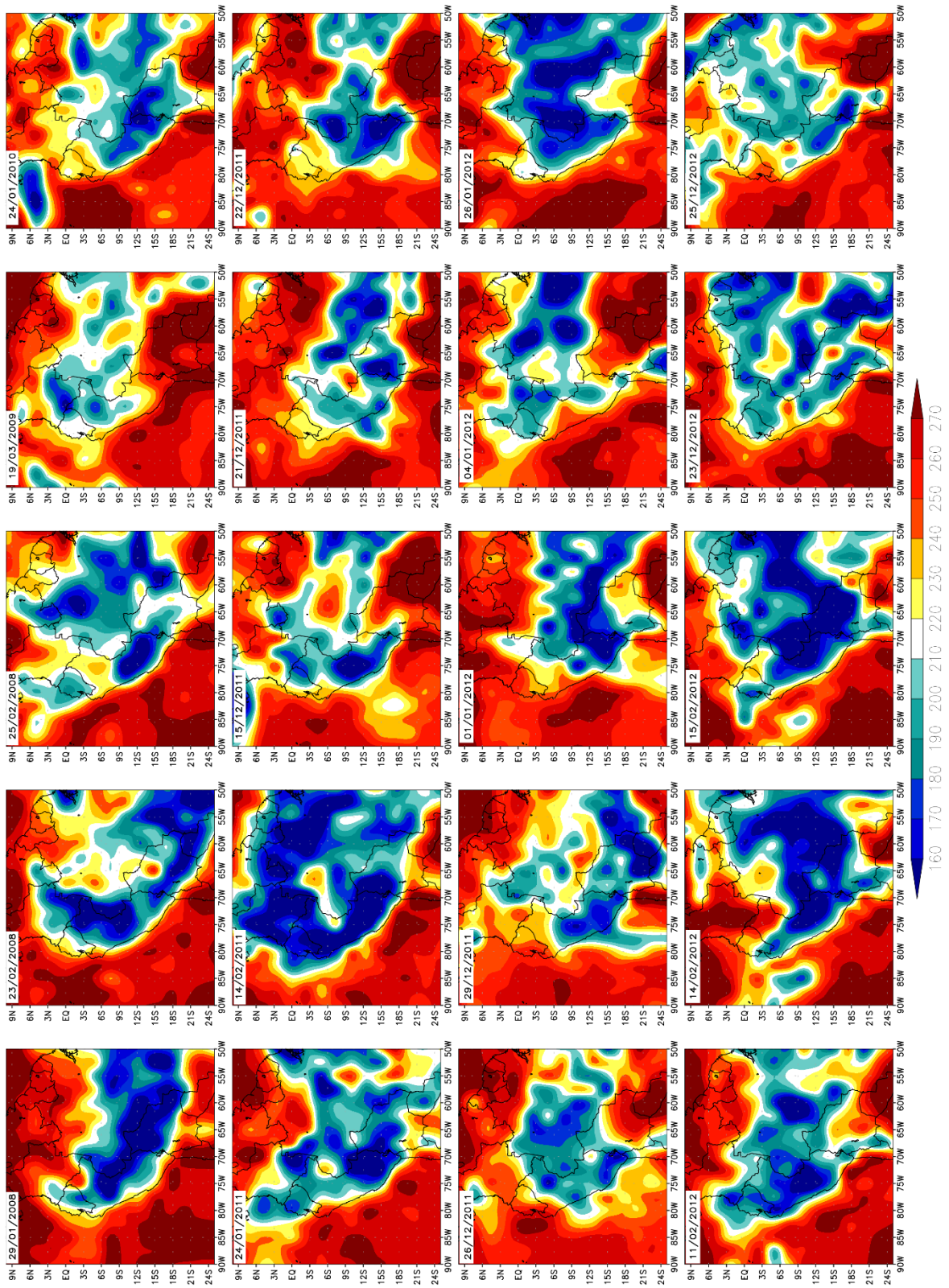
- Davis R.E. and Walker D.R., (1992): "An upper-air Synoptic Climatology of the Western United States". *Journal of Climate*, Vol.5, 1449-1467
- ELSHAMY, M. E.; SEIERSTAD, I. A., y SORTEBERG, A. (2009): "Impacts of climate change on Blue Nile flows using bias-corrected GCM scenarios". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 551–565.
- Fernández, A. y Díaz, Y.A., (2003): "Catálogo de los procesos sinópticos en el archipiélago cubano", Cienfuegos, Centro Meteorológico Provincial, Imprenta GeoCuba, 170 p.
- Fernández, A., Díaz, Y. (2005): "Catálogo de Procesos Sinópticos del Archipiélago Cubano en el Período 1979-1993". Instituto de Meteorología de Cuba. Cienfuegos, Cuba. 168p.
- Fernández, A., Martín-Vide, J., Díaz, Y.A. y Mestre, A., (2003): "Aplicación de los procesos sinópticos objetivos a la Península Ibérica en otoño". *Investigaciones Geográficas*. Alicante. Universidad de Alicante. 31, 37-65p.
- García, L.F., Cárdenas, P., Perdomo, E. (2003). "Avance de la Convergencia Intertropical de los Alisios (ITCZ) sobre Venezuela". Gerencia de Gestión Ambiental de CVG-EDELCA. Caracas-Venezuela. 42p.
- Garreaud, R., Rutllant, J., (1997): "Precipitación estival en los Andes de Chile central: aspectos climatológicos". Universidad de Chile. 21p.
- Gilford, M., Vojtesak, M., Myles, G., Bonan, R., Martens, D. 1992. SOUTH AMERICA. South of the Amazon River A Climatological Study, 6-31.
- Gutiérrez Q.; et al 2005. Climatología sinóptica de los patrones circulatorios de la estación lluviosa venezolana en el período 1978-1999. Tesis Ing. Hidrometeorólogo. Universidad Central de Venezuela. 421 p.

- Harman, J.R., Winkler, J.A. 1991. Synoptic climatology: themes, applications and prospects. *Phys, Geogr.*, 12: 220-30.
- Hoffmann, J.A., (1971): "Frentes, masas de aire y precipitaciones en el norte argentino". *Meteorologica* Vol. 11.
- HOGG, R. VI. y CRAIG. A. T. (1978): *Introduction to Mathematical Statistics*, 4th edition. Macmillan, New York.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. INDECI
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis*. Disponible en [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/annex1sglossary-e-o.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/annex1sglossary-e-o.html)
- Jansá, A. (1990). *Notas sobre análisis meteorológico mesoescalar en niveles bajos*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Linus Magnusson, Thomas Haiden and David Richardson. *Verification of extreme weather events: Discrete Predictands*. Forecast Department ECMWF September 2014.
- Milagros, M de los et al. 2005. *Métodos de estimación de percentiles*. CONGREGMET IX, 9th Argentine Congress of Meteorology. p. 3, 9
- Organización Meteorológica Mundial (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*.
- Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5):527–530.
- PIANI C.; HAERTER, J. O., y COPPOLA, E. (2010): "Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe". *Theor. Appl. Climatol.*, 99:187–192.
- Philip W. Suckling and John E. Hay, 1978: On the Use of Synoptic Weather Map Typing to Define Solar Radiation Regimes. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1521–1531.

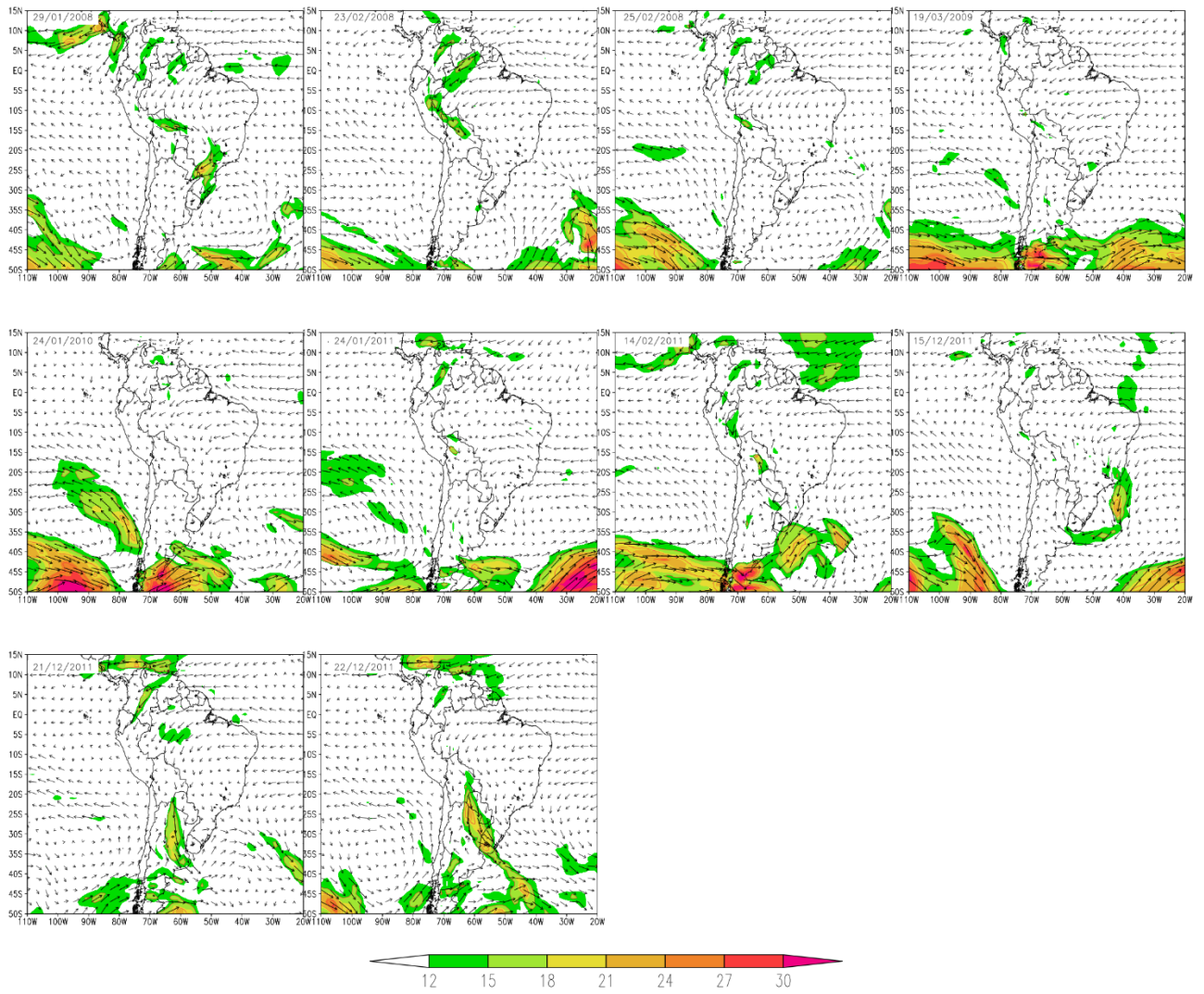
- Quispe, N. Cubas, F. y Avalos, G. (2006): Circulación atmosférica de verano e invierno sobre Sudamérica, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI, Perú.
- Real Academia Española (RAE).
- Remón, X. (2005). “Estudio de la relación entre la situación meteorológica a escala sinóptica y la contaminación a escala regional: Aplicación al ozono troposférico en Catalunya”. Proyecto final de carrera Ingeniero Industrial. Escala Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Satyamurty, P. 1998. Meteorology of the Southern Hemisphere. American Meteorological Society. 119 – 139
- Soriano, C., Fernández, A. y Martín-Vide, J. “Sobre el uso de los procesos sinópticos objetivos y los modelos meteorológicos a alta resolución para el estudio de los patrones circulatorios atmosféricos a escala regional”. Grupo de Climatología. Universidad de Barcelona. España. 15p.
- Yarnal, B. (1993). “**Synoptic Climatology in Enviromental Analysis**”. Belhaven Press. Florida, USA. 195p.
- Wallace and Hobbs. 2<sup>nd</sup> editon. 2006. Academic Press. Atmosphere Science. 483 p.
- WMO. Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation, Second Edition, Operational Hydrology Reports No. 1, WMO – No. 332. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra 1986.

## **VIII. ANEXOS**

# Anexo 1: Radiación de Onda Larga de los 20 casos de estudio

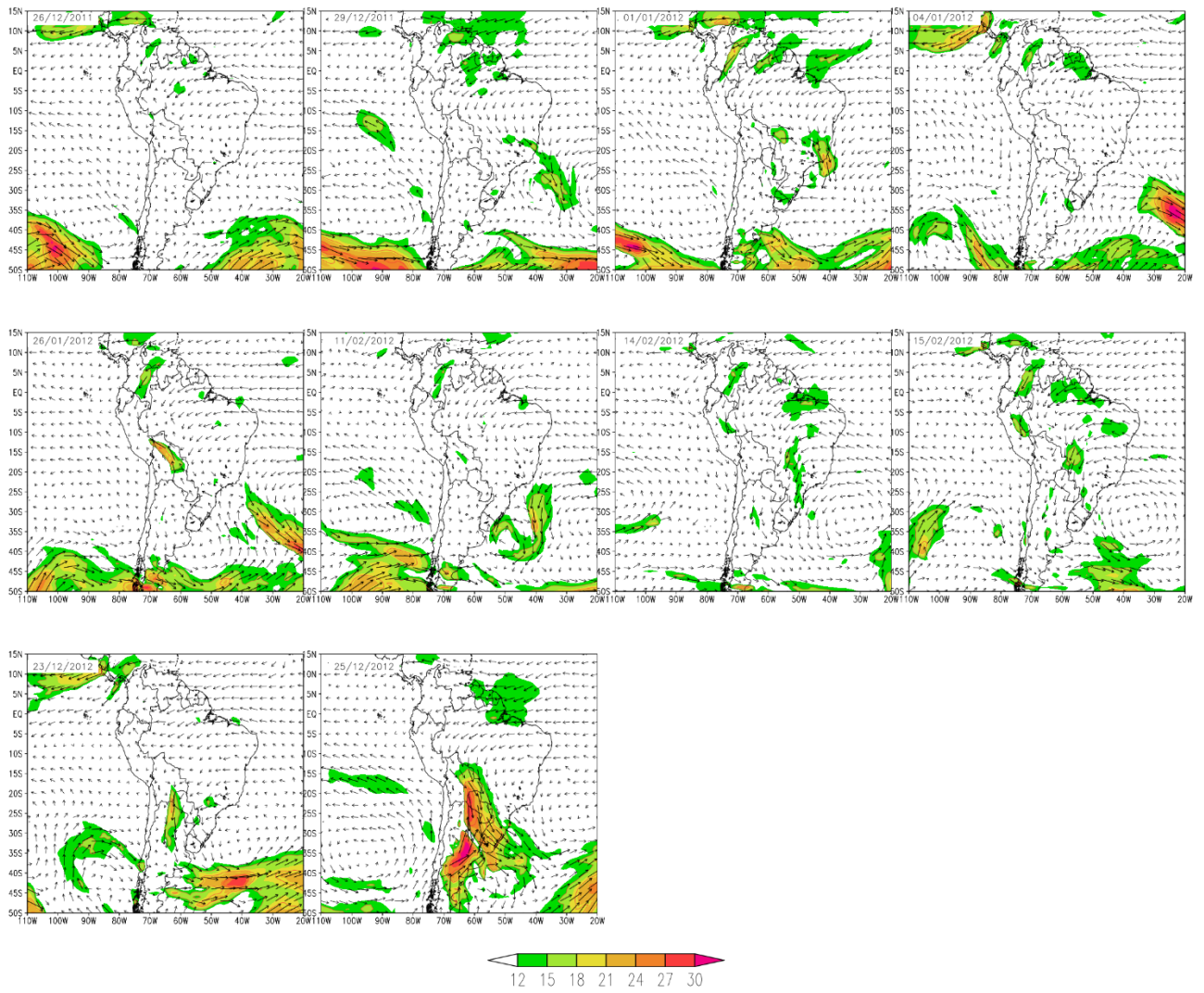


## Anexo 2: Jet de bajos niveles los 10 primeros casos



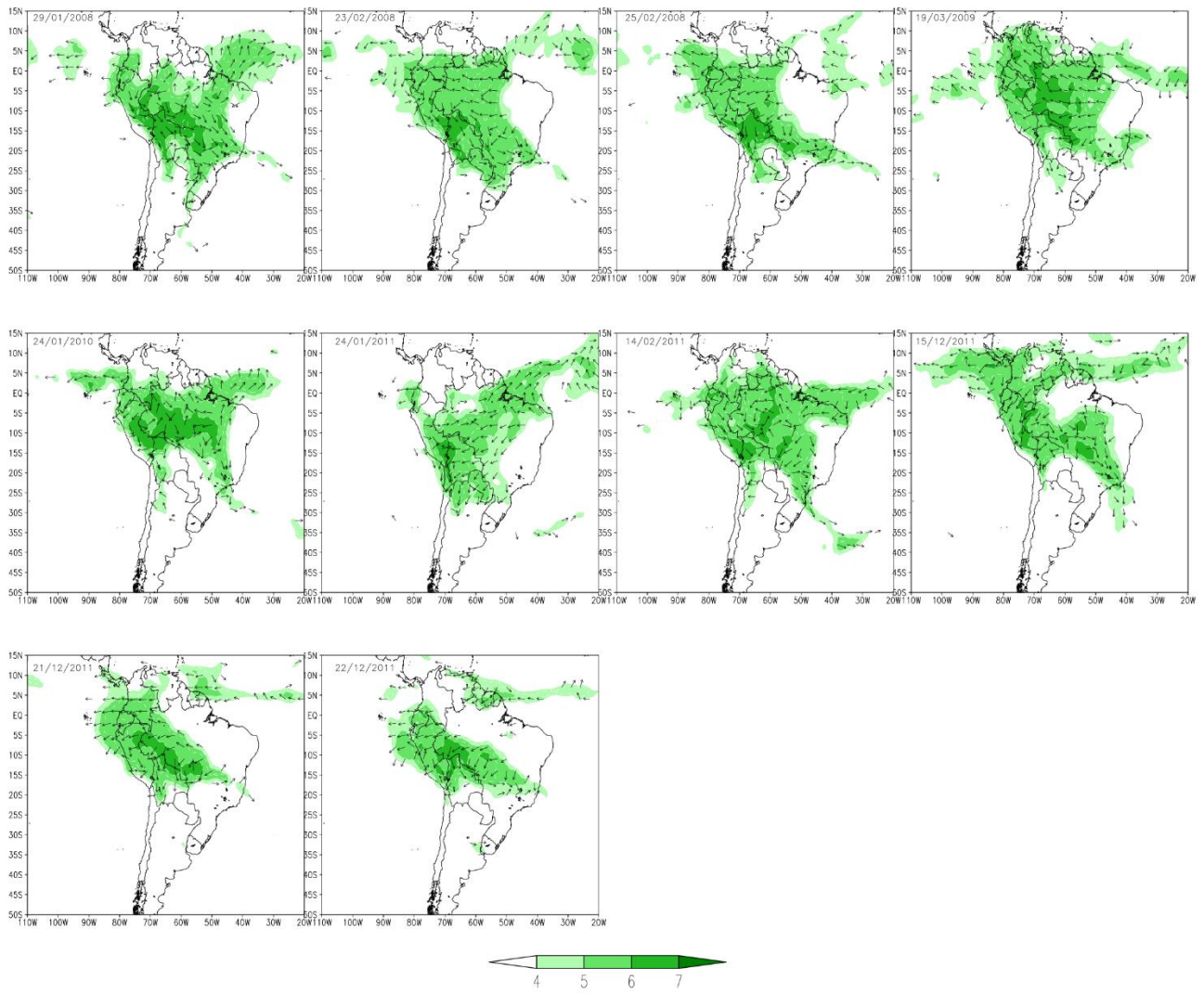


### Anexo 3: Jet de bajos niveles los 10 últimos casos

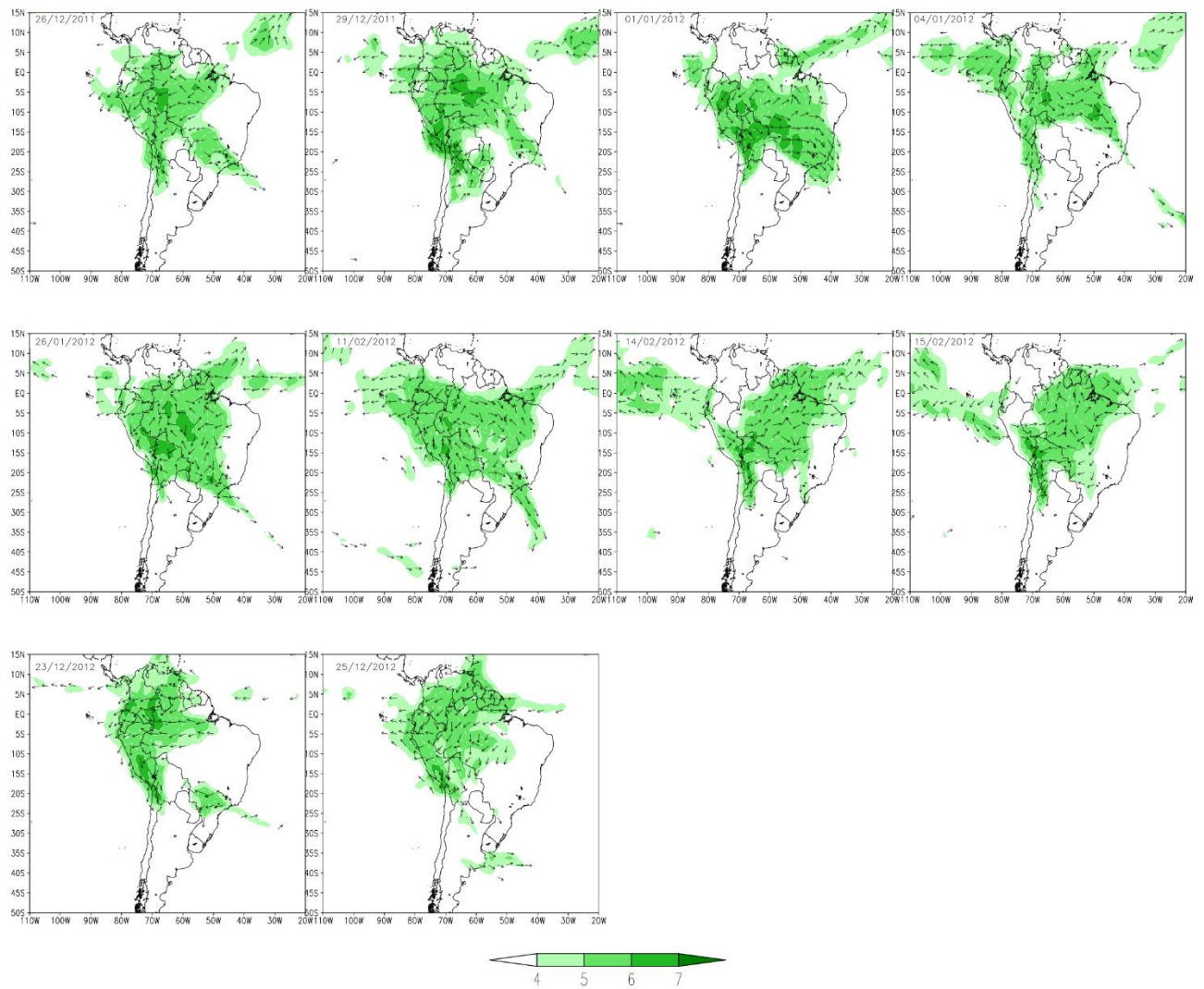




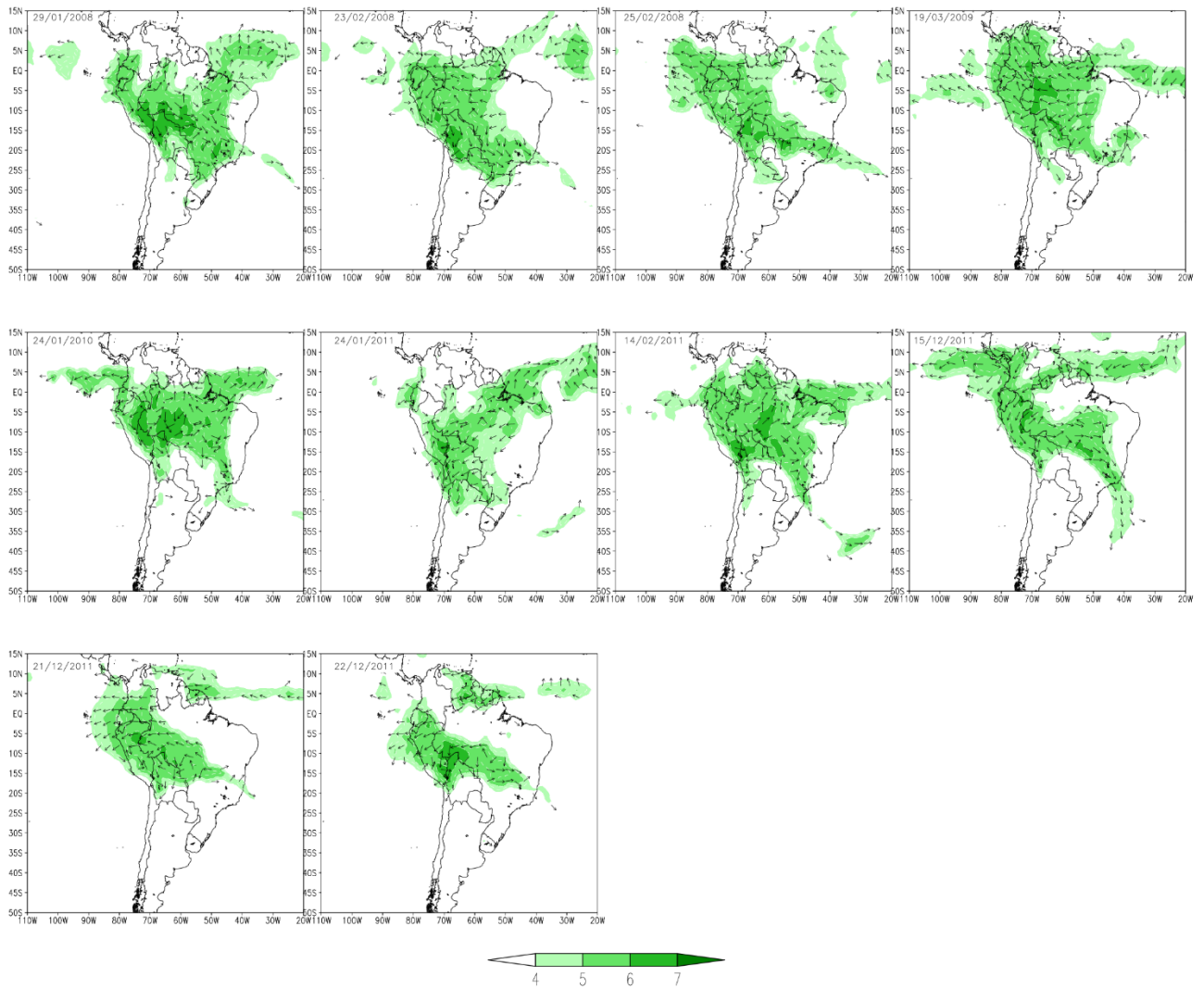
## Anexo 4: Relación de mezcla a las 06z de los 10 primeros casos



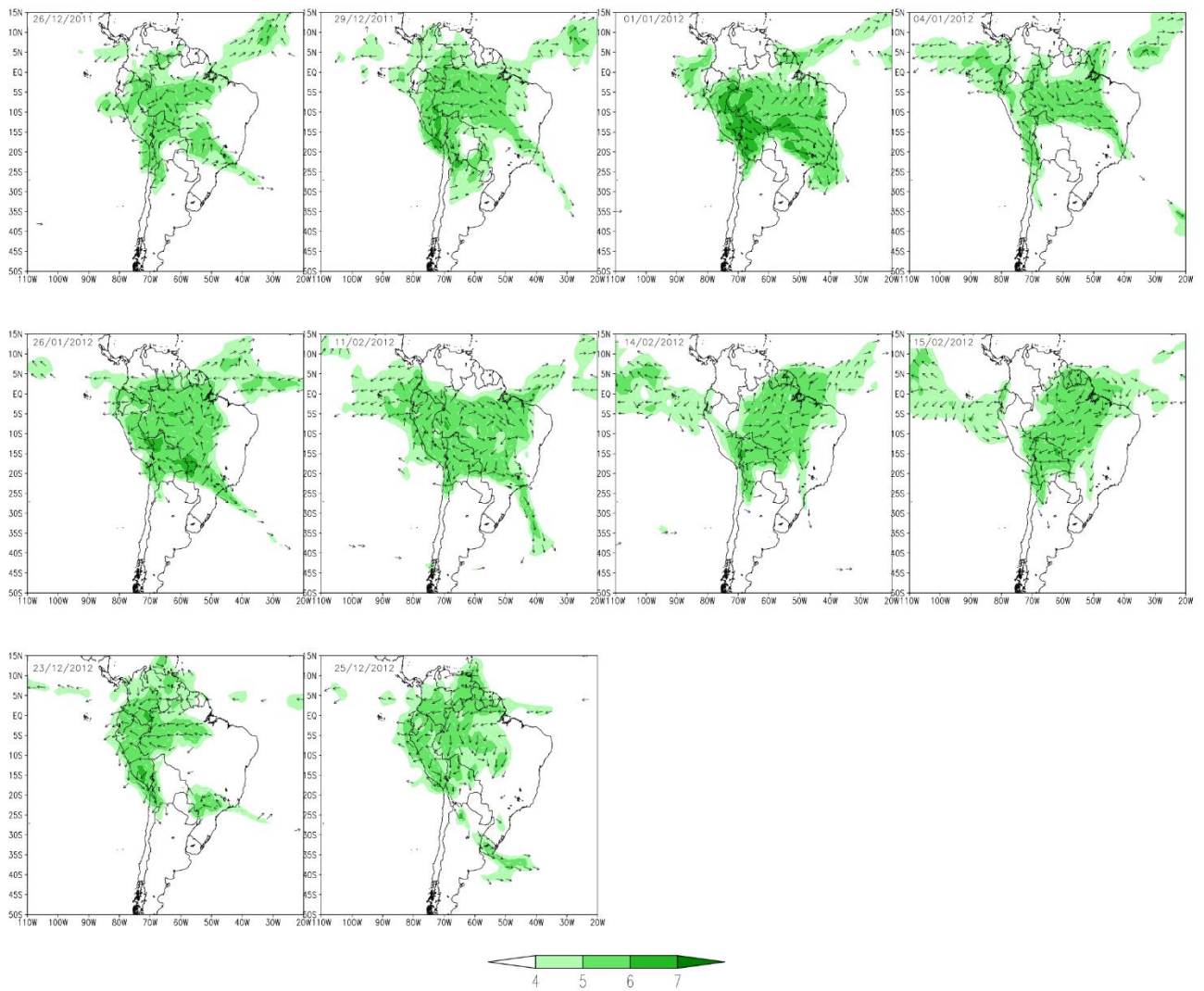
## Anexo 5: Relación de mezcla a las 06z de los 10 últimos casos



## Anexo 6: Relación de mezcla a las 12z de los 10 primeros casos

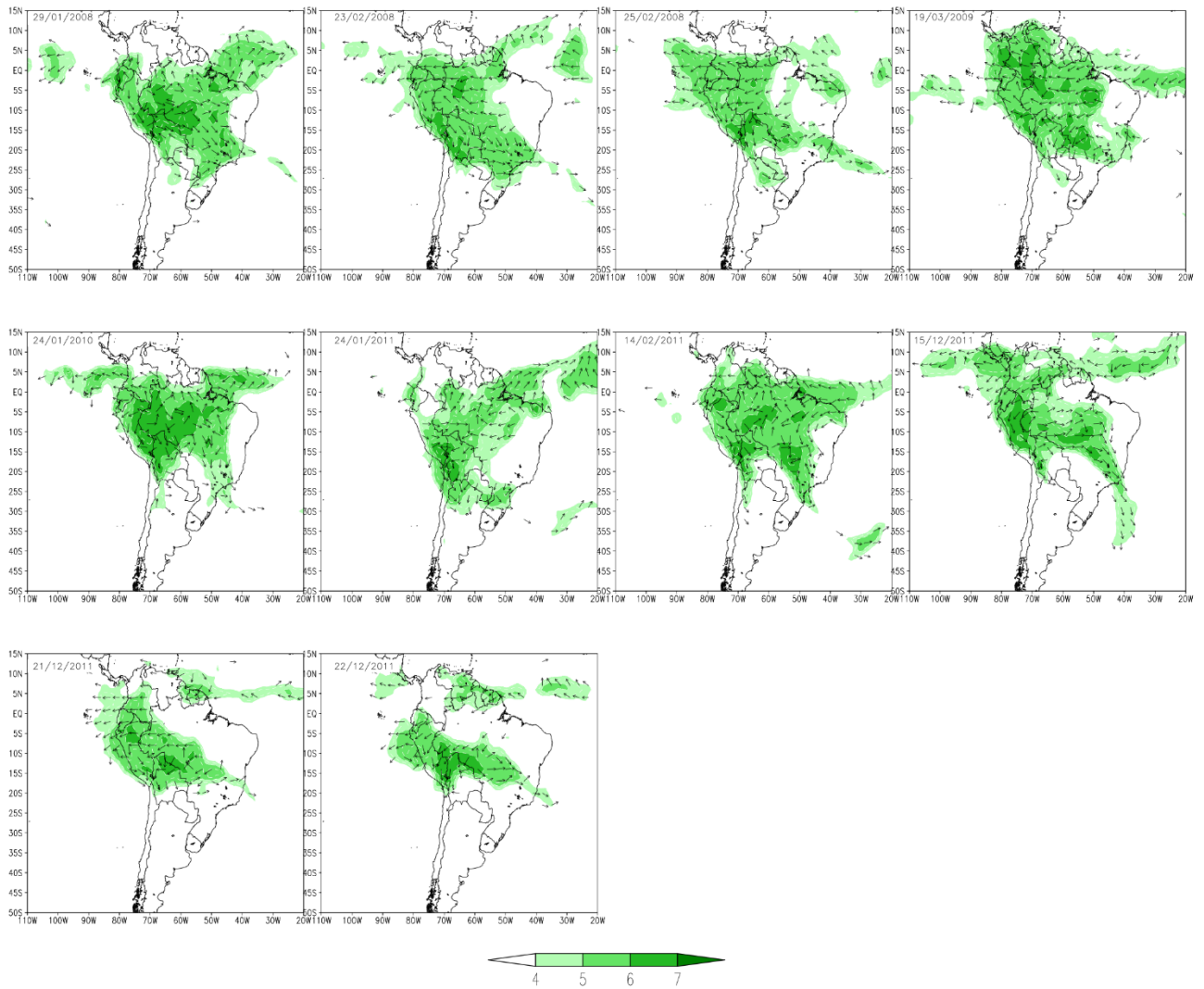


## Anexo 7: Relación de mezcla a las 12z de los 10 últimos casos

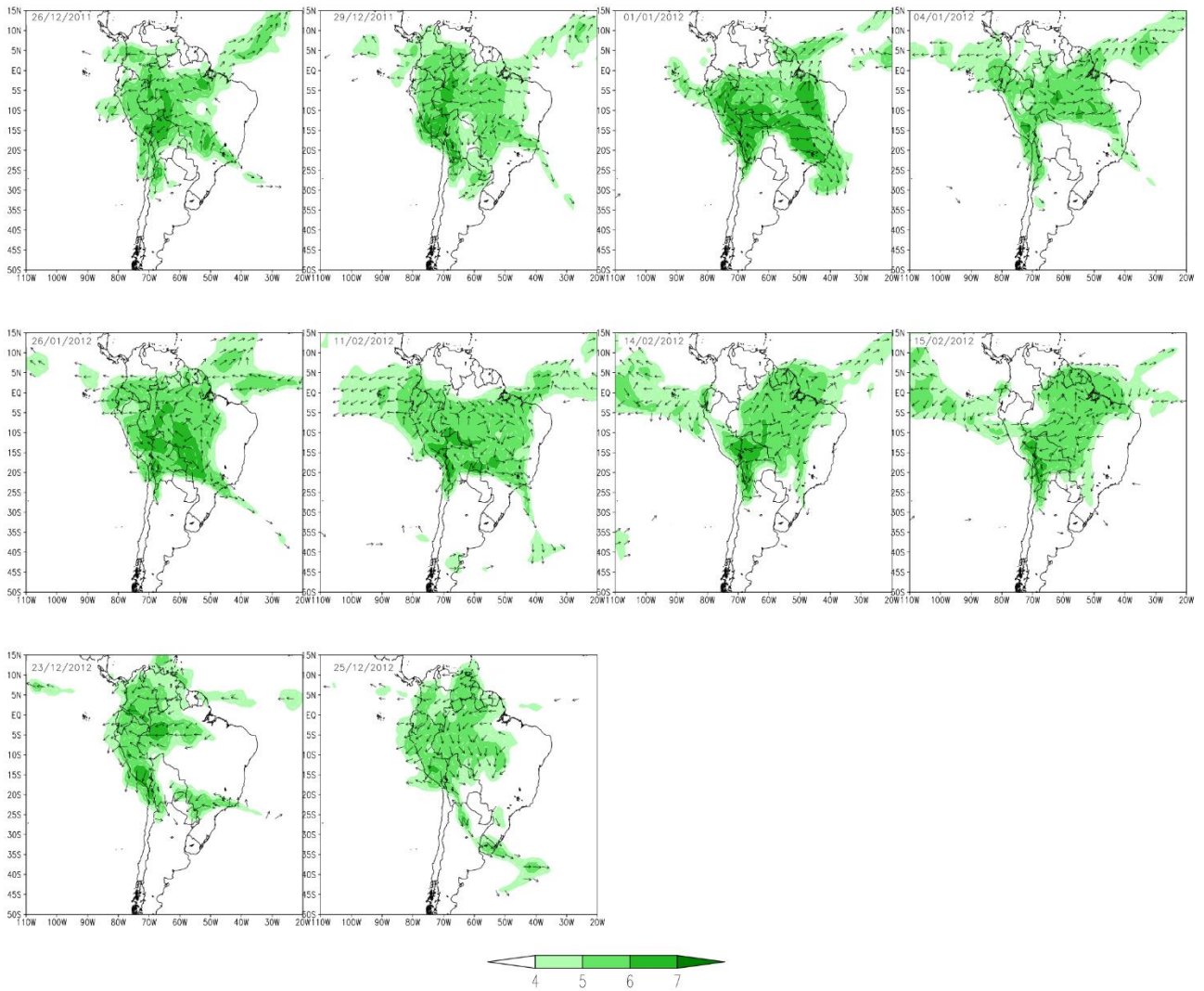




## Anexo 8: Relación de mezcla a las 18z de los 10 primeros casos



## Anexo 9: Relación de mezcla a las 18z de los 10 últimos casos



# Anexo 10: Agua Precipitable

