

Implementation of the Adapted Bonner Criterion to Identify Cold Weather and Precipitation in the Peruvian-Bolivian Altiplano during Winter

Melissa de Jesús Medina Burga^{1,3} , Robinson Fabricio Peña Murillo² , Carlos Raúl Calderón Cahuana¹ , Jorge Enrique Santos Andahua¹ , Octavio Fashé Raymundo⁴ 

Organización: 1: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas - (PE), Perú; pcmammed@upc.edu.pe, pcmaccal@upc.edu.pe; pcmajosa@upc.edu.pe 2: Universidad Técnica de Ambato - (EC); robinson_2588@hotmail.com 3: Universidad Nacional Agraria La Molina - (PE); mmedina@lamolina.edu.pe 4: Universidad Nacional Mayor de San Marcos - (PE); ofasher@unmsm.edu.pe

Abstract–

The study focuses on identifying the circulation patterns (CP) in the winter season that are related to the occurrence of precipitation in the Peruvian-Bolivian Altiplano and part of the Bolivian Amazon. The atmospheric circulation patterns determined by Medina (2020) for the austral winter were used, the 7 CPs were found, and various statistical methods such as ascending hierarchical classification and SOM neural networks were used. These patterns were determined at an atmospheric level of 200 hPa, wind data from ERA - Interim, corresponding to 1976 - 2016, and the precipitation of 173 meteorological stations located in the region of 15° S - 25° S, 80° W - 60° W was related to each pattern. In addition, longwave radiation (OLR) data from NCAR / NOAA with a resolution of 2.5 were used. ° x 2.5° from 1979 to 2016. The precipitation behavior associated with the identified patterns describes well-defined temporal cycles. These behaviors are linked to meteorological events, such as segregated lows, for which the modified Bonner criterion was used and defined at the El Zongo glacier (16° 12' 0" S and 68° 6' 0" W). The results were compared with data from the SENAMHI and OLR stations, arguing that one of the mechanisms associated with the probability of precipitation is DANA at high levels and incursions of directed winds at low levels.

Keywords—Circulation patterns, segregated lows, Precipitation, Bonner criterion.

Implementación del Criterio de Bonner Adaptado para Identificar Friajes y Precipitaciones en el Altiplano Peruano-Boliviano durante el Invierno

Melissa de Jesús Medina Burga^{1,3} , Robinson Fabricio Peña Murillo² , Carlos Raúl Calderón Cahuana¹ , Jorge Enrique Santos Andahua¹ , Octavio Fashé Raymundo⁴ 

Organización: 1: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas - (PE), Perú; pcmammed@upc.edu.pe, pcmacal@upc.edu.pe; pcmajosa@upc.edu.pe 2: Universidad Técnica de Ambato - (EC), Ecuador; robinson_2588@hotmail.com 3: Universidad Nacional Agraria La Molina - (PE); mmedina@lamolina.edu.pe 4: Universidad Nacional Mayor de San Marcos - (PE); ofasher@unmsm.edu.pe

Resumen—

El estudio se enfoca en identificar los patrones de circulación (PC) en la temporada invernal que se relacionan con la ocurrencia de precipitaciones en el Altiplano peruano boliviano y parte de la Amazonía boliviana. Se utilizaron los patrones de circulación atmosférica determinados por Medina (2020) para el invierno austral, se encontraron los 7 CP, se utilizaron diversos métodos estadísticos como clasificación jerárquica ascendente y redes neuronales SOM. Estos patrones se determinaron a un nivel atmosférico de 200 hPa, datos de vientos de ERA - Interim, correspondientes a 1976 - 2016, y con cada patrón se relacionó la precipitación de 173 estaciones meteorológicas ubicadas en la región de 15° S – 25° S, 80° W – 60° W. Además, se utilizaron datos de radiación de onda larga (OLR) de NCAR/NOAA con una resolución de 2,5. ° x 2,5° de 1979 a 2016. El comportamiento de la precipitación asociado a los patrones identificados describe ciclos temporales bien definidos. Estos comportamientos están vinculados a eventos meteorológicos, como las bajas segregadas, para lo cual se utilizó el criterio de Bonner modificado y se definió en el glaciar El Zongo (16° 12' 0" S y 68° 6' 0" W). Los resultados se compararon con datos de las estaciones SENAMHI y OLR, sosteniendo que uno de los mecanismos asociados a la probabilidad de precipitación son las DANA en niveles altos y las incursiones de vientos dirigidos en niveles bajos.

Palabras clave—Patrones de circulación, bajas segregadas, Precipitación, criterio de Bonner.

I. INTRODUCCIÓN

La identificación de los friajes y las precipitaciones en el Altiplano peruano-boliviano durante la temporada invernal es fundamental para comprender los patrones climáticos de la región y mitigar sus consecuencias socioeconómicas. El Altiplano, con su altitud elevada y condiciones climáticas extremas, es un área donde los eventos de friajes pueden afectar gravemente la agricultura y la salud humana. Se ha comprobado que los patrones de circulación atmosférica a gran altitud, como los vientos a 200 hPa, son cruciales para influir en estos fenómenos meteorológicos. Aunque hay mucha literatura sobre la dinámica atmosférica en esta región, falta aplicar específicamente el criterio de Bonner para detectar estos fenómenos climáticos en el Altiplano durante el

invierno. Este estudio pretende llenar esa laguna adaptando el criterio de Bonner para identificar los eventos de friajes y precipitaciones en esta área.

El Altiplano se distingue por tener un clima semiárido, con precipitaciones anuales que varían entre unos 200 mm en el suroeste y 600 mm en el noreste ([1] y [2]). Durante el invierno, la región está dominada por vientos que soplan desde el oeste en niveles altos de la atmósfera, trayendo aire más seco del Pacífico, lo que resulta en precipitaciones muy escasas ([3], [4], [5] y [6]). El efecto de barrera natural de los Andes y la entrada de vientos de bajo nivel desde el sur provocan nevadas en los Andes subtropicales y precipitaciones en el sur de Chile, según [7]. Esta influencia es predominante debido al flujo de humedad zonal o transmontano, responsable de hasta el 60% de las precipitaciones registradas en las estaciones de la cordillera de los Andes, en el sector sur ([8] y [9]).

En niveles atmosféricos bajos, los vientos que se desplazan de sur a norte causan cambios significativos en la dinámica atmosférica y la liberación de calor a lo largo del continente ([10]). Estos vientos se han vinculado a varios sistemas de circulación atmosférica, como el Sistema del Monzón de Asia ([11]), y a diferentes áreas geográficas, como las Montañas Rocosas en Estados Unidos ([12] y [13]). Allí, la temperatura disminuye abruptamente debido al flujo de vientos más fuertes sobre el relieve de las Montañas Rocosas, alcanzando velocidades de hasta 22 m/s, con un predominio del viento meridional que, al intensificarse, genera una advección de aire frío.

Durante el invierno, las nevadas se asocian a diversos mecanismos como friajes, bajas segregadas, o a veces ambos, afectando tanto la intensidad de las precipitaciones como su distribución espacial ([14]). Investigaciones sobre el comportamiento de las bajas segregadas en el hemisferio norte han demostrado la influencia de estos sistemas en las precipitaciones de esta estación; este fenómeno atmosférico ocurre en la tropósfera media y alta debido a la presencia del

jet streak o celda de aire frío que se mueve a alta velocidad con el jet stream o corriente de chorro ([15] y [16]).

En América Latina, otras investigaciones han señalado la conexión entre los patrones atmosféricos y los vientos del sur, que pueden reducir las temperaturas hasta en 10° C, como en [14], analizando el desarrollo de los sistemas atmosféricos y la variación de la temperatura en el flanco oriental de la cordillera cuando un frente frío avanza hacia el continente en dirección norte, a veces alcanzando la Amazonía peruana. A nivel interanual, se observa una disminución (aumento) de la precipitación en casi toda la cuenca amazónica durante eventos de El Niño (La Niña), generalmente debido al incremento de los vientos zonales en niveles altos de la atmósfera, así como en escalas decadales ([17] y [18]). También se han realizado estudios que examinan este mecanismo en el continente sudamericano ([19], [20] y [21]).

En el caso de Perú, el monitoreo y pronóstico de estos mecanismos sigue siendo un desafío en la investigación, especialmente debido a la falta de información meteorológica en el Altiplano peruano-boliviano. La presencia de estaciones meteorológicas con datos incompletos y la topografía abrupta de la región dificultan una caracterización adecuada. Por esta razón, los resultados de esta investigación serán valiosos para comprender la circulación atmosférica y el comportamiento físico que generan estos eventos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio y Base de Datos

El altiplano peruano-boliviano se caracteriza por ser una vasta planicie con elevaciones que varían entre los 1000 y 6000 metros sobre el nivel del mar, debido a la presencia imponente de la cordillera de los Andes. Esta formación no solo afecta el terreno, sino que también influye significativamente en las condiciones climáticas de la región. La topografía, junto con la existencia de glaciares tropicales, provoca un clima severo que impone restricciones a la vida, la flora y la fauna, obligándolas a adaptarse a condiciones extremas.

Adicional a ello, se utilizaron datos recogidos de 173 estaciones meteorológicas situadas a lo largo del altiplano peruano-boliviano, con altitudes que oscilan entre los 156 y los 4460 metros, abarcando el periodo de 1979 a 2016. Estas estaciones fueron facilitadas por el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) de Bolivia y Perú, y se emplearon hasta un 67% de ellas (ver Fig1). Así como, se incorporaron datos diarios de reanálisis obtenidos del ERA-Interim de la Unión Europea. Estos datos son el resultado de la combinación de informes aéreos, satelitales, de embarcaciones, boyas y pronósticos meteorológicos, presentados en una rejilla de 0.75°×0.75°. Se tomaron en cuenta las alturas geopotenciales y los componentes del viento a 200 hPa, 500 hPa y 850 hPa. Además, se utilizó información

diaria interpolada de la Radiación de Onda Larga Saliente (OLR) proveniente de la página web de NCAR/NOAA, representada en la Tabla I.

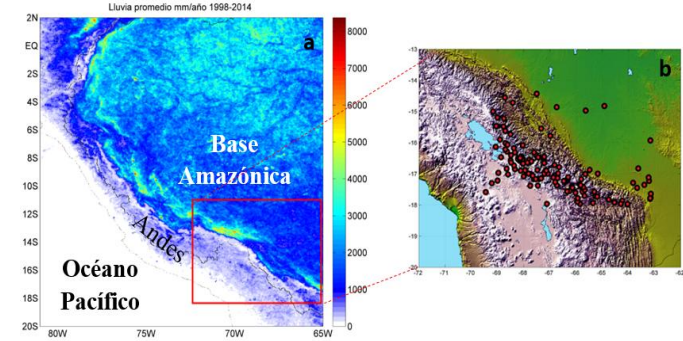


Fig. 1
(a) Precipitación media anual (mm/año, 1998-2014) estimada usando datos de TRMM PR 2A25. (b) Ubicación geográfica de las estaciones.

TABLA I

	Características de datos de reanálisis				
	Dato	Resolución espacial	Resolución temporal	Nivel (hpa)	Periodo
1	Viento componente zonal y meridional	0.75° x 0.75°	datos cada 6 horas (frecuencia diaria)	200, 500 y 850	1979 – 2016
2	Altura geopotencial	0.75° x 0.75°	datos cada 6 horas (frecuencia diaria)	200, 500 y 850	1979 – 2016
3	Radiación de onda larga	2.5° x 2.5°	Diaria	Radiación de onda larga	1979 – 2013

Fuente: Datos tomados de Medina (2020)

B. Identificar patrones de circulación atmosféricos en invierno

La metodología descrita se centra en el análisis de patrones de circulación atmosférica de invierno utilizando técnicas estadísticas avanzadas. El método de mapas autoagrupados (SOM), basado en las cartas de Kohonen ([22] y [23]), es una herramienta poderosa para la identificación de patrones no lineales en grandes conjuntos de datos. En este caso, se ha aplicado para identificar patrones de circulación atmosférica en la región específica de 15° S – 25° S y 80° W – 60° W, analizando el vector viento a 200 hPa.

El uso complementario de la Clasificación Jerárquica Ascendente (CAH) permite agrupar los patrones identificados por el SOM en categorías jerárquicas, facilitando una comprensión más estructurada de los mismos ([24] y [25]). En el estudio mencionado, se identificaron siete patrones distintos de circulación atmosférica para el invierno, lo que sugiere una diversidad de configuraciones atmosféricas que pueden influir en el clima de la región durante esta estación. ([5] y [6])

La clasificación de 3496 días en estos patrones proporciona una base sólida para entender las variaciones interanuales e interdecadales de la circulación atmosférica en la región estudiada. Este tipo de análisis es crucial para mejorar las predicciones climáticas y comprender mejor las dinámicas atmosféricas en respuesta a factores climáticos globales y regionales. (Fig 2)

C. Identificar el número de días de patrones de circulación en invierno asociado la ocurrencia de precipitaciones

Con los patrones de circulación ya determinados, se identifican aquellos que favorecen la precipitación basándose en el análisis de la anomalía estandarizada de la OLR. Estos valores se utilizan como indicadores potenciales de sistemas convectivos, ya que representan la presencia de nubes en la zona, lo cual es una señal de posibles lluvias. Posteriormente, se determinan los mecanismos físicos, como las incursiones de vientos del sur, empleando el criterio 1 de Bonner adaptado a la zona de estudio. Esto se explica en la Ec. (1), tomando como referencia la ubicación de la estación meteorológica situada al pie del glaciar de El Zongo, dado que las precipitaciones en esta estación contribuyen al proceso de recarga del glaciar. ([26]).

$$AnomaliaV = \frac{VientoV - Promedio(VientoV)}{VientoV} \quad (1)$$

$$Criterio: AnomaliaV \geq 6,0 \text{ m/s}$$

donde:

VientoV: componente meridional del viento en el área de estudio a 850 hPa

Promedio(VientoV): promedio de la componente meridional del viento a 850 hPa

AnomaliaV: anomalía de la componente meridional del viento a 850 hPa.

Área de estudio: 15° S – 25° S y 80° W – 60° W.

Ubicación de la estación: -16 ° 12' 0" S y -68° 6' 0" W

Para este propósito, se llevó a cabo un análisis en varios niveles de presión que van desde los 850 hPa hasta los 200 hPa. Una vez identificadas las anomalías, se compararon los datos de precipitación observados en el lugar con los mecanismos que se habían identificado.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Reconocer los patrones de circulación atmosférica durante el invierno que están relacionados con fenómenos meteorológicos en la región del Altiplano.

Los días se organizaron en 7 CPs, cada uno representado por una neurona en el mapa bidimensional SOM (7 × 7), las

cuales están conectadas directamente a dos componentes de las variables: la posición en el vector de referencia y el espacio bidimensional.

Posteriormente, se emplea el método de dendograma para clasificar según la cantidad de patrones, utilizando un criterio basado en la variabilidad del número total de grupos. Así, se agrupan comportamientos similares, lo que resulta en una reducción del número de grupos al centrarse en aquellos más característicos. Para la obtención de las cartas de circulación atmosférica, se promedió cada patrón clasificado con base en los días asociados a cada patrón a un nivel de 200 hPa. La Fig. 3 muestra la anomalía estandarizada de vientos a 200 hPa y OLR, donde predominan vientos del noreste, y los sistemas convectivos se localizan en el centro y sureste de la cuenca amazónica, el Altiplano peruano-boliviano, Argentina, y en el norte y este de Brasil. Estos patrones se han reorganizado según la formación y desplazamiento de sistemas nubosos o convectivos, siguiendo lo establecido por Medina en [5] y [6].

En cuanto a la circulación de vientos, el CP1 es favorable para transportar humedad hacia el Altiplano y la base amazónica, y esta conducta se mantiene en CP2 y CP3. En cambio, CP4 y CP5 se vinculan con días despejados, donde el núcleo convectivo es menos fuerte mientras se desplaza hacia la cuenca de La Plata. A lo largo de los días, las condiciones de cielos despejados se imponen en el continente debido a la llegada de vientos secos intensos, lo que reduce la presencia de sistemas húmedos en el Altiplano, como reflejan los CP6 y CP7. Con el paso del tiempo, las anomalías de OLR se vuelven más positivas, incrementando la intensidad de los vientos en toda la región. Durante la formación de las DANAs, se producen episodios de precipitaciones ([27] y [28]). Estos sistemas muestran un aumento en la gradiente de presión zonal, lo que intensifica el flujo de vientos del norte que llevan humedad desde la cuenca amazónica, como se menciona en [20]. Estos vientos se refuerzan hacia el norte, mientras que en Argentina, Bolivia y Brasil se dirigen al sureste debido a la llegada de vientos fríos al continente. Así, la interrupción de los vientos del oeste provoca modificaciones abruptas en el clima promedio de la región estudiada (calor hacia los polos y frío en las áreas subtropicales). Esto implica que la presencia de ondas atmosféricas facilita el intercambio y transporte de calor entre los polos y el ecuador ([29] y [30]). Por lo tanto, utilizaremos los CP1, CP2 y CP3, que son los patrones que presentan sistemas convectivos sobre el Altiplano. Primero, verificamos cuántos días cumplen con el criterio modificado de Bonner para la zona seleccionada que se ajustan a estos patrones.

B. Determinar la cantidad de días en que se presentan los patrones de circulación durante el invierno, los cuales están relacionados con eventos meteorológicos en el área del Altiplano que abarca Perú y Bolivia.

Para lograrlo, se empleó el criterio modificado de Bonner citado en la Ec. (1). Según este criterio y las fechas

establecidas, los días que cumplían con esta condición fueron clasificados. Inicialmente, agrupamos los días que presentaban

anomalías iguales o superiores a 1.

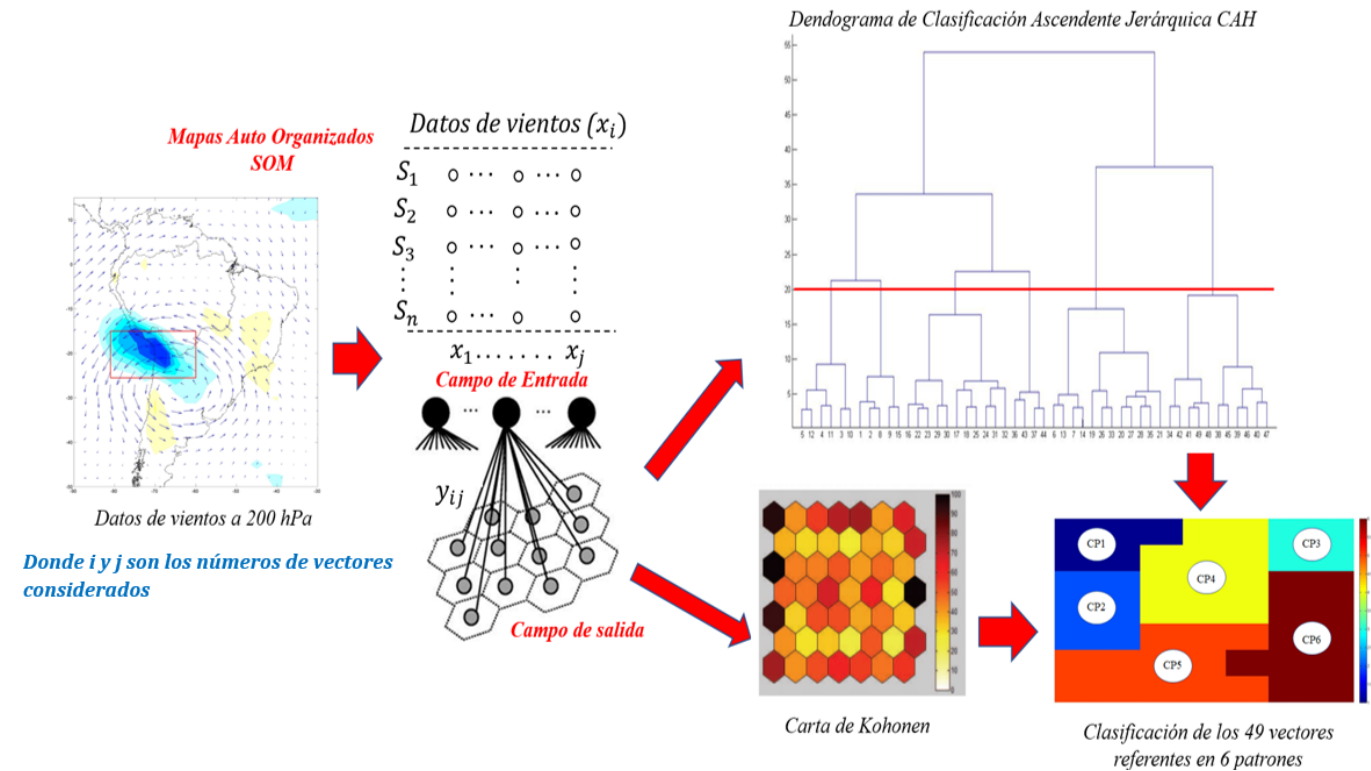


Fig. 2 Descripción del procesamiento de datos basado en Mapas Auto Organizados y clasificación Ascendente Jerárquica.

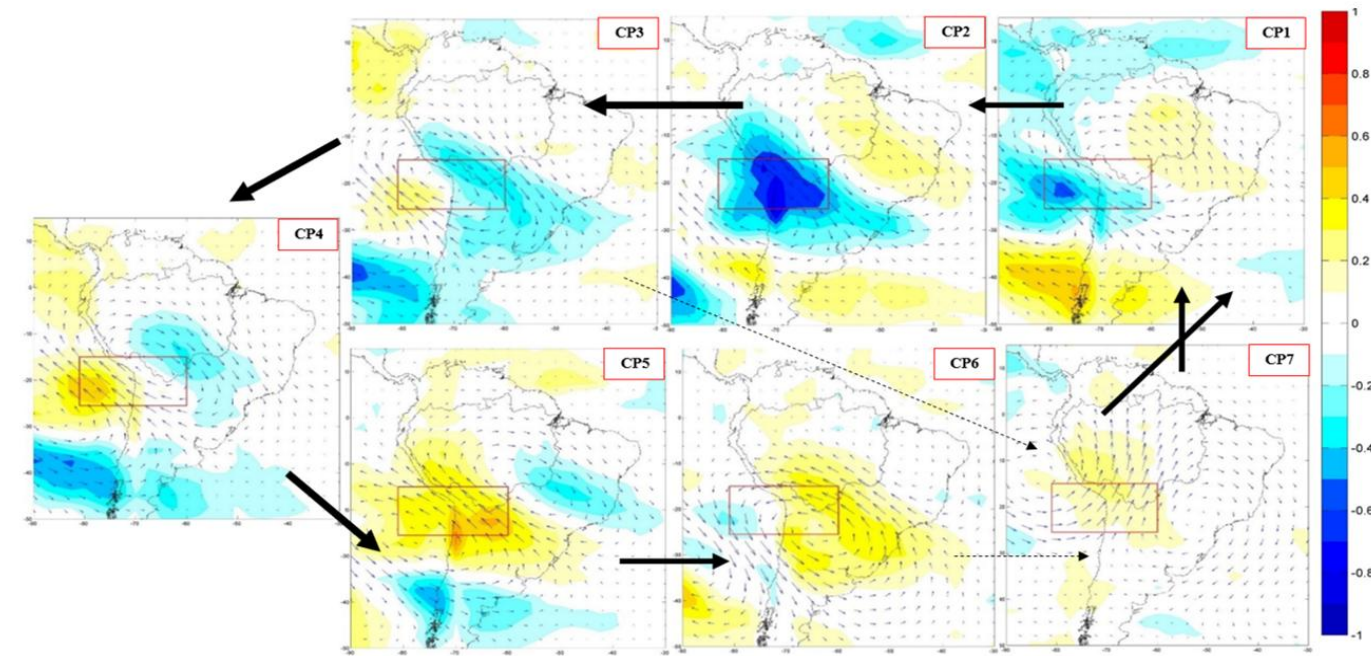


Fig. 3

Patrones de circulación para invierno a 200 hPa, representando anomalías estandarizadas de vientos como vectores y OLR, en colores sólidos.

De los 3496 días analizados, se identificaron 1094 días que presentaban esta característica, lo que representa un 31,3% del total. Los resultados presentados en la Tabla II y Tabla III detallan los intervalos utilizados para los cálculos y el porcentaje de días identificados que corresponden a cada patrón.

TABLA II

Porcentaje de días que cumplen con el criterio de Bonner adaptado en el glaciar de El Zongo.			
	anomalía vientos v	número de días (1094)	porcentaje respecto al total de días determinados
1	6,00 m/s ≤ anomalías V < 7,00 m/s	143	13,1 %
2	7,00 m/s ≤ anomalías V < 8,00 m/s	127	11,6 %
3	8,00 m/s ≤ anomalías V < 9,00 m/s	125	11,4 %
4	9,00 m/s ≤ anomalías V < 10,00 m/s	120	10,9 %
5	10,00 m/s ≤ anomalías V < 11,00 m/s	114	10,4 %
6	11,00 m/s ≤ anomalías V < 12,00 m/s	98	9,00 %
7	12,00 m/s ≤ anomalías V < 13,00 m/s	86	7,9 %
8	13,00 m/s ≤ anomalías V < 14,00 m/s	73	6,7 %
9	14,00 m/s ≤ anomalías V < 15,00 m/s	52	4,8 %
10	anomalías V ≥ 15,00 m/s	156	14,3 %

TABLA III

Número de días correspondientes a cada intervalo seleccionado basado en el criterio y correspondiente a cada patrón definido en Medina (2020).			
	anomalía vientos v	CP	# de días
1	6,00 m/s ≤ anomalías V < 7,00 m/s	CP1	36
		CP2	18
		CP3	15
		CP4	16
		CP5	25
		CP6	15
		CP7	18
2	7,00 m/s ≤ anomalías V < 8,00 m/s	CP1	26
		CP2	20
		CP3	12
		CP4	18
		CP5	20
		CP6	18
		CP7	13
3	8,00 m/s ≤ anomalías V < 9,00 m/s	CP1	30
		CP2	21
		CP3	11
		CP4	18
		CP5	9
		CP6	22
		CP7	14
4	9,00 m/s ≤ anomalías V < 10,00 m/s	CP1	28

5	10,00 m/s ≤ anomalías V < 11,00 m/s	CP2	20
		CP3	12
		CP4	11
		CP5	19
		CP6	22
		CP7	8
6	11,00 m/s ≤ anomalías V < 12,00 m/s	CP1	35
		CP2	16
		CP3	9
		CP4	14
		CP5	13
		CP6	17
		CP7	10
7	12,00 m/s ≤ anomalías V < 13,00 m/s	CP1	22
		CP2	17
		CP3	12
		CP4	15
		CP5	10
		CP6	16
		CP7	6
8	13,00 m/s ≤ anomalías V < 14,00 m/s	CP1	22
		CP2	12
		CP3	11
		CP4	8
		CP5	17
		CP6	9
		CP7	7
9	14,00 m/s ≤ anomalías V < 15,00 m/s	CP1	20
		CP2	7
		CP3	6
		CP4	6
		CP5	10
		CP6	12
		CP7	12
10	anomalías V ≥ 15,00 m/s	CP1	24
		CP2	6
		CP3	6
		CP4	6
		CP5	4
		CP6	3
		CP7	3
		CP1	42
		CP2	17
		CP3	20
		CP4	10
		CP5	31
		CP6	14
		CP7	22

C. Identificar cómo los mecanismos determinados afectan los patrones de circulación relacionados con la aparición de precipitaciones.

Se examinó la influencia de los mecanismos identificados en las variables meteorológicas implicadas y en la precipitación local (glaciar El Zongo), considerando el análisis de la estructura vertical atmosférica mediante los diversos niveles de alturas geopotenciales. Según la clasificación realizada, se observó que la mayoría de los días de invierno se encuentran en el CP1.

La Fig 4 muestra la altura geopotencial a 850 hPa, donde el patrón CP1 representa una confluencia de vientos en la zona de interés.

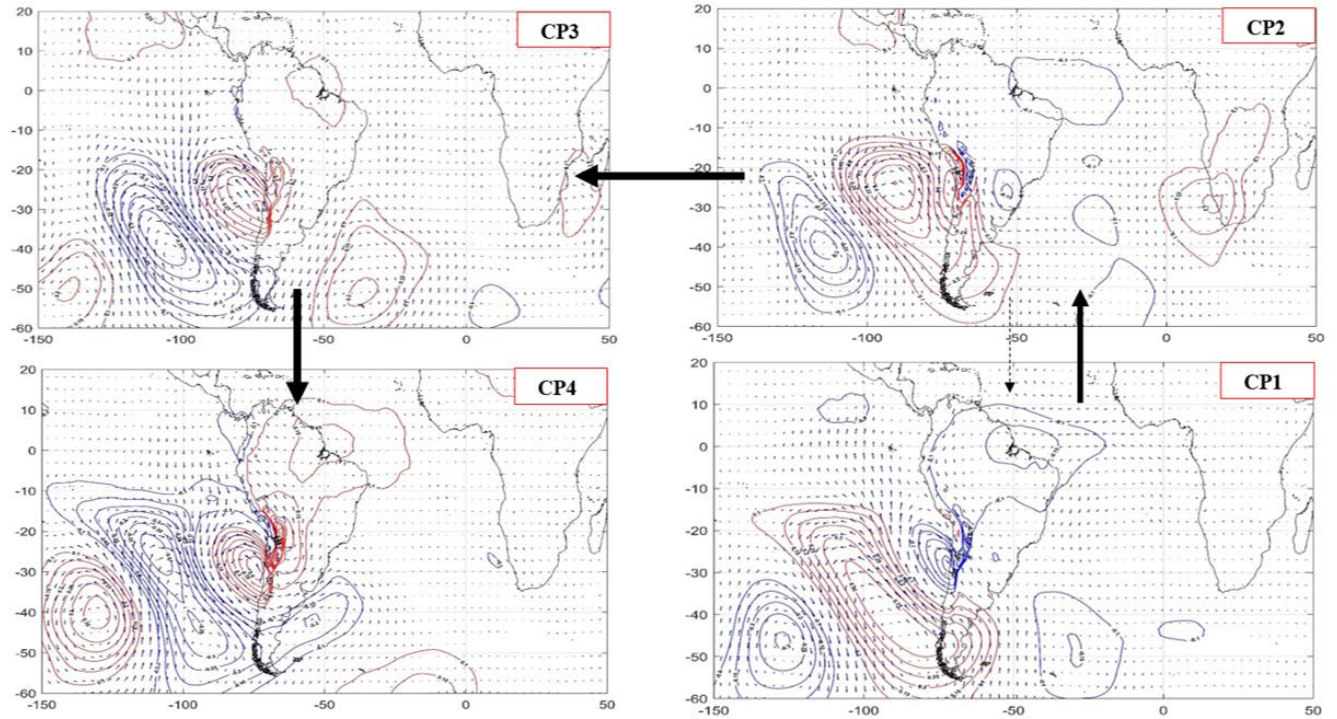


Fig. 4

Patrones de circulación para invierno a 850 hPa, representando anomalías estandarizadas de altura geopotencial, como líneas de contorno con valores positivos (negativos) en rojo (azul); y vientos, como vector.

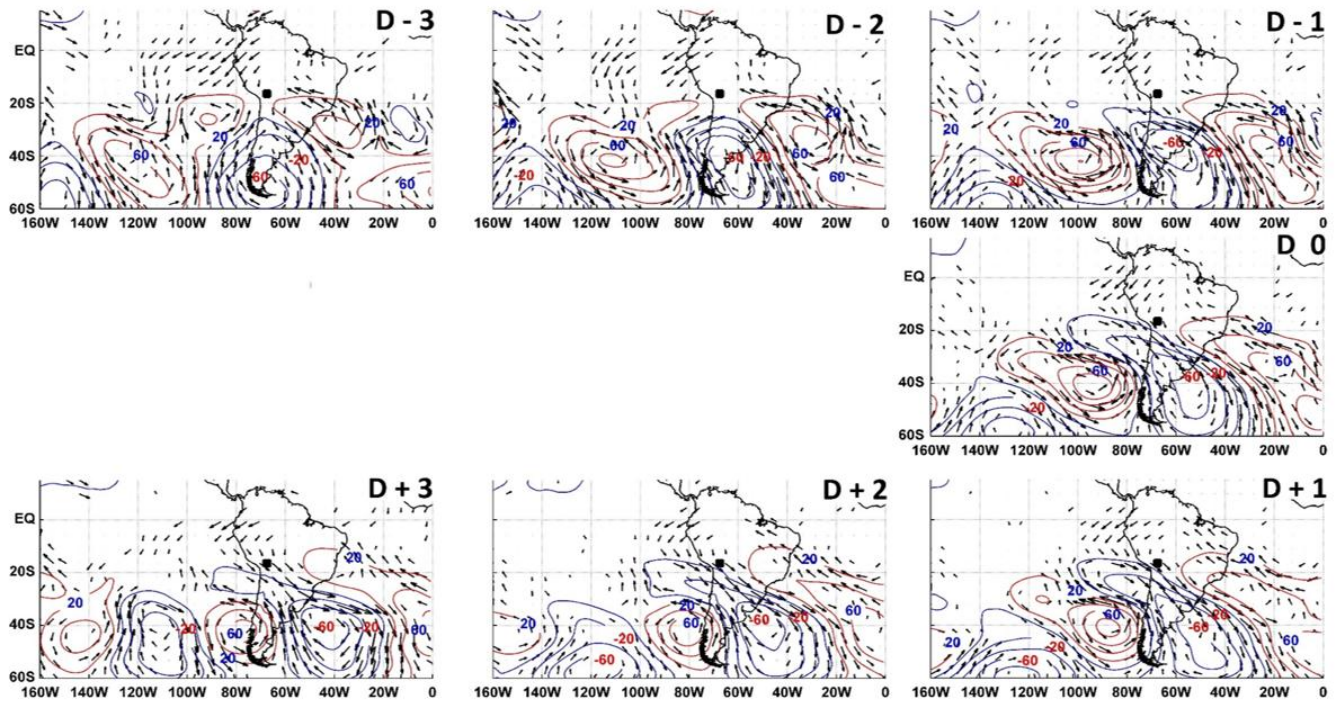


Fig. 5

Carta de composición de circulación para invierno a 200 hPa, representando anomalías estandarizadas de altura geopotencial, como líneas de contorno con valores positivos (negativos) en rojo (azul), con intervalos de 40 hPa; y vientos, como vector. El recuadro en color negro es la ubicación del glaciar El Zongo.

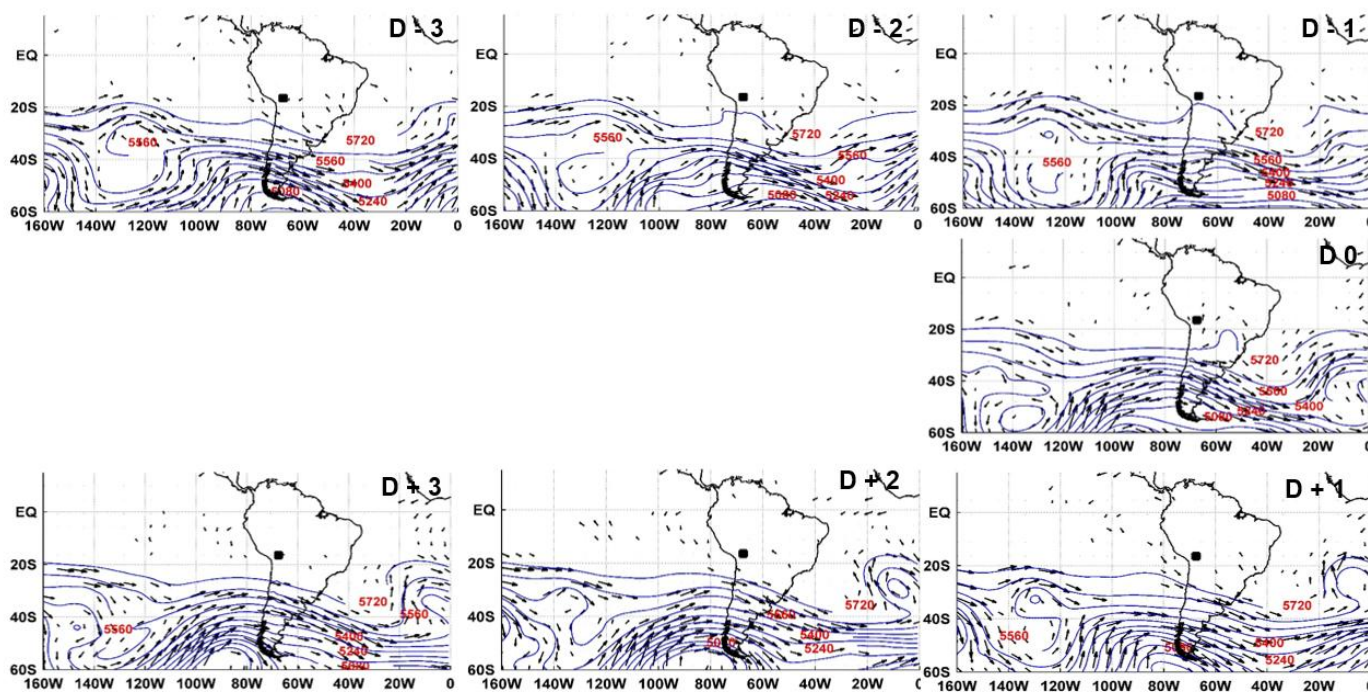


Fig. 6

Carta de composición de circulación para invierno a 500 hPa, representando valores medios de altura geopotencial, como líneas de contorno e intervalos de 160 hPa; y vientos, como vector. El recuadro en color negro es la ubicación del glaciar El Zongo

Este patrón también muestra la entrada de vientos meridionales positivos hacia el Altiplano y la base de la cuenca del Amazonas, asociado con un sistema de alta presión al oeste de la cordillera de los Andes, y baja presión al este, formando el sistema de bloqueo de los Andes (CP2). A medida que pasan los días (CP3 y CP4), el sistema de alta presión y los vientos se extienden en la cuenca Amazónica. Estos patrones se relacionan con sistemas convectivos en el Altiplano (Fig 3). El patrón CP5 muestra un comportamiento opuesto al de CP2, siendo el inicio de un patrón seco, al igual que CP6 y CP7. Los tres patrones exhiben una anomalía predominante de vientos meridionales negativos.

La información de la Tabla II refleja el número de días que cumplen con el criterio de Bonner adaptado al glaciar El Zongo. En la Fig 5, se representaron los días de la Tabla III, siendo el primer día el inicio del cumplimiento del criterio (D0), seguido del día D+1 como el día posterior al evento y así sucesivamente hasta el día D+3. El día D-1 es el día anterior a D0, y de igual modo, se representan los días anteriores hasta D-3. Esta figura muestra un mapa compuesto de anomalías de vientos y de alturas geopotenciales estandarizadas, ambas a un nivel atmosférico de 200 hPa, donde el día D0 se intensifica la onda en el continente, afectando al glaciar El Zongo.

La circulación asociada muestra valores medios de vientos y alturas geopotenciales a 500 hPa (Fig 6), donde se observa la propagación de una onda atmosférica hacia el continente, transportando energía y desempeñando un papel

clave en la formación de núcleos convectivos. El día D0 es un promedio de todos los días que cumplen con el criterio de Bonner adaptado a la región de estudio, y lo mismo aplica para los días anteriores y posteriores al evento. Los días D-1 hasta D+1 son considerados días centrales, asociados con lluvias cortas pero intensas en invierno (ver Fig 7).

La Fig 8 muestra un mapa de circulación con valores estandarizados de vientos, OLR y anomalías de alturas geopotenciales a 850 hPa, utilizando el OLR como indicativo de un sistema convectivo (color azul), mientras que los días despejados (color rojo) se identifican como días sin precipitaciones en el glaciar. Durante el invierno, los días D0 están relacionados con la formación de DANAs. En la alta troposfera, la circulación atmosférica está vinculada con la intensificación de la Corriente en Chorro y su interacción con latitudes tropicales, facilitando la entrada de aire cálido a latitudes subtropicales. Este intercambio térmico intensifica las ondas atmosféricas en los niveles altos de la atmósfera, aumentando la amplitud de la dorsal y profundizando la vaguada, lo que desencadena la DANA. Sin embargo, en niveles bajos a 850 hPa, hay una confluencia de vientos de la cuenca Amazónica (dirección noreste) y del Océano Pacífico (dirección noroeste), incentivando el transporte de humedad hacia el continente, especialmente en el llano amazónico y el Altiplano. Según la Fig 8, esto favorece la ocurrencia de precipitaciones, siendo coherente al comparar la precipitación in situ y el OLR.

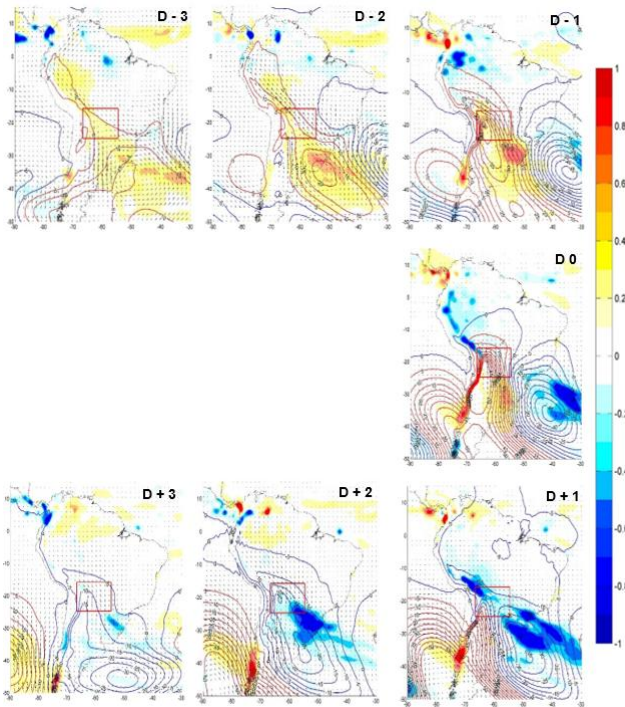


Fig. 7.

Carta de composición de circulación para invierno a 850 hPa. Representando anomalías estandarizadas de OLR, en colores sólidos, con valores positivos (negativos) en color rojo (azul); anomalías de altura geopotencial como líneas de contorno a intervalos de 5 hPa, las anomalías positivas (negativas) están en rojo (azul); y anomalías estandarizadas de vientos como vectores.

La contribución de lluvia, expresada en porcentajes, es significativa al 90 % durante los días vinculados con eventos lluviosos D0, D+1 y D+2. En la imagen D-3, se observa un déficit de precipitaciones en los Andes y la Amazonia, debido a sistemas de alta presión en el continente, que se debilitan progresivamente (imágenes D-2 y D-1). Este debilitamiento es más notable en la Amazonía en estaciones a menor altura. Los días D0 y D+1 indican la ocurrencia de eventos de lluvia en estaciones de los Andes y Amazonía, mostrando un comportamiento de sistema acoplado, relacionado con sistemas de baja y alta presión (ondas atmosféricas) en niveles altos, además de la confluencia de vientos del noroeste en niveles bajos. En niveles altos, una onda atmosférica se propaga a mayor velocidad con el paso de los días. Las imágenes D+2 y D+3 muestran la disminución de precipitaciones, especialmente en estaciones ubicadas al oeste de la cordillera de los Andes.

IV. CONCLUSIONES Y CONTRIBUCIONES

Se ha observado que los patrones climáticos CP1, CP2 y CP3 facilitan el transporte de humedad hacia el Altiplano. Por otro lado, CP4 y CP5 están relacionados con días claros y un núcleo convectivo menos intenso. Los patrones CP6 y CP7 indican la llegada de vientos secos fuertes que disminuyen la

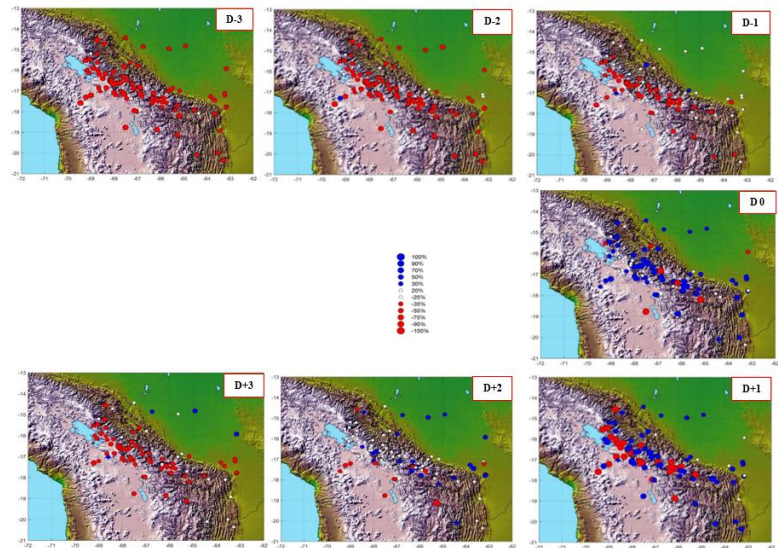


Fig. 8.

Porcentaje de anomalías de precipitación en las estaciones meteorológicas para invierno. En color azul (rojo) probabilidad de ocurrencia positiva (negativa)

presencia de sistemas húmedos. Las anomalías de OLR se vuelven más positivas, lo que incrementa la fuerza de los vientos. Durante la formación de las DANAs, se intensifica el flujo de vientos provenientes del norte, transportando humedad desde la cuenca amazónica y alterando el clima promedio de la región. Los patrones CP1, CP2 y CP3 son esenciales para comprender los sistemas convectivos en el Altiplano, y se verifica cuántos días cumplen con el criterio de Bonner modificado para estos patrones.

Durante el invierno, el patrón CP1 es predominante y se caracteriza por la confluencia de vientos en la región, junto con la entrada de vientos meridionales positivos hacia el Altiplano y la cuenca del Amazonas, en este patrón se encuentran el mayor número de días con anomalías de vientos más intensos, de acuerdo con la Tabla III. Este fenómeno está asociado con un sistema de alta presión al oeste de los Andes y baja presión al este, formando un sistema de bloqueo (CP2) y medida que el tiempo avanza (CP3 y CP4), el sistema de alta presión se extiende hacia la cuenca Amazónica, relacionado con sistemas convectivos en el Altiplano. Mientras que, los patrones CP5, CP6, y CP7 presentan un comportamiento opuesto al CP2, iniciando un periodo seco con anomalías de vientos meridionales negativos.

El día D0, identificado mediante el criterio de Bonner, muestra una intensificación de la onda atmosférica a 200 hPa, afectando al glaciar. A 500 hPa, se observa la propagación de una onda que transporta energía y juega un papel crucial en la formación de núcleos convectivos.

Los días centrales (D-1 a D+1) son cruciales, ya que están asociados con lluvias cortas pero intensas en invierno.

Este estudio destaca la complejidad de los patrones atmosféricos y su impacto en las condiciones meteorológicas y de precipitación en el glaciar El Zongo, subrayando la importancia de las interacciones entre sistemas de presión y la dinámica del viento, analizando el comportamiento de las precipitaciones en la región.

REFERENCIAS

- [1] P. Aceituno, "On the functioning of the southern oscillation in the South American sector: surface", *climate. Monthly Water Review*, 1988, (116): 505–524.
- [2] P. Aceituno and A. Montecinos, "Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano". In *International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 1993, (4, 29 March – 2, Hobart, Australia). *Proceedings. Boston, MA, American Meteorological Society*, 1993, p. 330-331.
- [3] T. Ambrizzi, and B. J. Hoskins. "Stationary rossby-wave propagation in a baroclinic atmosphere". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997.123(540), 919–928.
- [4] J. Marengo and R. Wagner. "Climatology of the low-level jet eats of the Andes as derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: characteristics and temporal variability". *Journal of Climate*. 2004. 17:2261-2278.
- [5] M. Medina. "Determinación de patrones de vientos horizontales en la tropósfera y su relación con la precipitación en el altiplano peruano boliviano". *Tesis de Maestría Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima- Perú*, 2020.
- [6] M. Medina. "Identificación de eventos meteorológicos asociados a la ocurrencia de precipitación en patrones de vientos horizontales en la tropósfera para el Altiplano peruano boliviano en invierno" *Tesis de licenciatura Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima- Perú*, 2020.
- [7] R. Garreaud, and P. Aceituno. "Interannual rainfall variability over the South American altiplano". *Journal of Climate*, 2001., 14:2779–2789.
- [8] J.C. Espinoza, J. Ronchail and M. Lengaigne. "Revisiting wintertime cold air intrusions at the east of the Andes: propagating features from subtropical Argentina to Peruvian Amazon and relationship with large-scale circulation patterns". *Climate Dynamics*, 2012. 41(7-8):1983–2002
- [9] H. Segura, J.C. Espinoza, C. Junquas, T. Lebel, M. Vuille and T. Condom, T. "Extreme austral winter precipitation events over the South-American Altiplano: regional atmospheric features". *Climate Dynamics*, 2022, 59(9–10), 3069–3086.
- [10] M. Alvarez, C. Vera and N. Kiladis. "Intraseasonal variability in South America during the cold season". *Climate Dynamics* .2013. (42):3253–3269.
- [11] E. Lu and J. Chan, J. "A unified monsoon index for South China." *Journal of Climate*. 1999.12:2375-2385.
- [12] G. Bell and L. Bosart. "A case study diagnosis of the formation of an upper- level cutoff cyclonic circulation over the eastern United States." *Monthly Weather Review*. 1993. (121):1635-1655.
- [13] B. Colle and C. Mass. "The structure and evolution of cold surges East of the Rocky Mountains". *Monthly Weather Review* .1995. 123:2577–2610.
- [14] P. Satyamurty, CA. Nobre and P. Silva Díaz. "Tropics South America" *Meteorology and hydrology of the Southern hemisphere. Boston, USA. Meteorology Monograph*,1998. 49:119-139.
- [15] B. Hoskins, and T. Ambrizzi. "Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow". *Journal of the Atmospheric Sciences*,1993. 50(12):1661-1671.
- [16] B. Hoskins, M. McIntyre and W. Robertson. "On the use and significance of isentropic potential vorticity maps". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,1985. 111(470):877-946.
- [17] H. Segura, C. Junquas, J.C. Espinoza, M. Vuille, Y. Jauregui, A. Rabatel, T. Condom and T. Lebel. "New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales". *Climate Dynamics*, 2019. 53(1), 405–426.
- [18] M. Vuille, R. Bradley and F. Keimig. "Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing". *Journal of Geophysical Research*,2000. 105:12447-12460.
- [19] S. Bishoff and W. Vargas, "The 500 and 1000 hPa weather type circulations and their relationship with some extreme climatic conditions over Southern South America". *International Journal of Climatology*, 2003. 23(5):541-556.
- [20] L. Ferreira, E. Venticinque, and S. Almeida, S. "O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas". *Dossiê Amazônia brasileira I, Estudos Avançados*, 2005. 19(53):157–166.
- [21] JE.Sicart, JC. Espinoza, L. Queno, and M. Medina. "Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation". *International Journal of Climatology*. 2016. 36:3116-3128
- [22] T. Kohonen, T. "Self-organizing and associative memory". *4th ed. Berlin, Springer-Verlag*. 1984. (p. 326-348).
- [23] T. Kohonen. "Self-organizing maps". 3rd ed. Berlin, Springer-Verlag, Springer Series. 2001 (p. 30-40).
- [24] L. Mingo López "Nuevos métodos para el reconocimiento y clasificación de patrones con redes de neuronas". *Tesis Doctoral – Universidad Politécnica de Madrid*. 2020. <https://doi.org/10.20868/upm.thesis.313>
- [25] F. Segovia Pérez, "Redes de neuronas recurrentes para el reconocimiento de patrones temporales". *Tesis Doctoral – Universidad Politécnica de Madrid*, 1992. <https://doi.org/10.20868/upm.thesis.1070>
- [26] JE. Sicart, P. Wagnon and P. Ribstein. "Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia)". *Journal of Geophysics Research Atmospheres – AGU Journals*, 2005. 110(12), 1–17.
- [27] R. Garreaud, and J. Rutllant, "Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993". *Atmosfera*, . 1996. 9(4):251-271.
- [28] A. Godoy, C. Campetella and N. Possia, "Un caso de baja segregada en niveles altos en el sur de Sudamérica: descripción del ciclo de vida y su relación con la precipitación". *Revista Brasileira de Meteorología*, 2011. 26(3): 491-502.
- [29] M. Vuille .and C. Ammann. "Regional snowfall patterns in the high, arid Andes". *Climatic Change*,1997, 36(3):413–423.
- [30] N. Boers, B. Bookhagen, N. Marwan, and J. Kurths, "Complex networks identify spatial patterns of extreme rainfall events of the South American monsoon system". *Geophysical Research Letter*, 2013. 40(16):4386-4392.