

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA NUBOSIDAD USANDO
EL PRODUCTO MÁSCARA DE NUBES MODIS SOBRE EL PERÚ”**

Presentada por:

KEVIN FRITZ YARINGAÑO GARCIA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima – Perú

2022

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

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA NUBOSIDAD USANDO
EL PRODUCTO MÁSCARA DE NUBES MODIS SOBRE EL PERÚ”**

Presentada por:

KEVIN FRITZ YARINGAÑO GARCIA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar
PRESIDENTE

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
MIEMBRO

Ing. Hector Ladislao Huisacaina Soto
MIEMBRO

Mg. Sc. Victoria Doris Calle Montes
ASESORA

M.Sc. José Jesús Pasapera Gonzales
Co ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres Irene y Rodolfo por el amor y el apoyo incondicional que me brindaron durante mi formación universitaria, que me inculcaron valores y me enseñaron a no rendirme jamás y persistir en mis objetivos.

A mi hermana Lizbeth por estar allí siempre, alentándome con su energía para seguir avanzando siempre y superar cualquier obstáculo.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Espacial del Perú – CONIDA, en especial a la Dirección de Geomática, por permitirme usar sus equipos para realizar la investigación, además de su apoyo y aporte con conocimiento.

Al Lic. José Pasapera Gonzales, por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación, además de su apoyo continuo y asesoría, sin las cuales no se hubiera podido realizar esta tesis.

Al comandante de la Fuerza Aérea del Perú, Ángel Tongo Pizarro por brindarme la información meteorológica importante para realizar esta investigación.

A la Prof. Victoria Calle Montes, por aceptar ser mi asesora y brindarme sus consejos y sabiduría para desarrollar esta investigación

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT	XIV
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Nubes.....	3
2.1.1. Formación de nubes.....	4
2.1.2. Núcleos de Condensación	4
2.1.3. Mecanismos de formación de nubes.....	5
2.2. Circulaciones Atmosféricas que intervienen en la nubosidad	7
2.2.1. Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)	8
2.2.2. Anticiclón del Pacífico Sudeste (APS)	9
2.2.3. Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS).....	10
2.2.4. Chorro de Bajos Niveles Sudamericano (SALLJ).....	10
2.2.5. Alta de Bolivia (AB).....	11
2.3. Sensor MODIS.....	13
2.3.1. Especificaciones Técnicas del sensor MODIS	13
2.3.2. Niveles de procesamiento de los Productos del sensor MODIS	16
2.3.3. Productos del sensor MODIS	16
2.3.4. Organización espacial.....	18
2.4. Formato de Almacenamiento HDF.....	19
2.4.1. Modelos de datos HDF	19
2.4.2. Conjunto de datos científicos (SDS).....	20
2.4.3. HDF-EOS	21
2.5. Máscara de Nubes MODIS.....	22
2.5.1. Descripción del Algoritmo	26
2.5.2. Interpretación de Bits.....	29

2.6. Parámetros estadísticos	30
2.6.1. Coeficiente de Correlación de Pearson (R).....	30
2.6.2. Bias (B)	31
2.6.3. Raíz Cuadrada Media del Error (RMSE).....	31
III. METODOLOGÍA.....	32
3.1. Materiales	32
3.1.1. Zona de estudio.....	32
3.1.2. Información Satelital.....	33
3.1.3. Información Meteorológica.....	33
3.1.4. Herramientas	33
3.2. Métodos.....	33
3.2.1. Metodología para determinar la cobertura nubosa promedio en porcentaje a nivel mensual usando el producto Máscara de Nubes MODIS.....	35
3.2.2. Metodología para determinar la influencia de los sistemas meteorológicos a nivel sinóptico mensual en el periodo 2002 – 2018 que favorecen la nubosidad en Perú.	37
3.2.3. Metodología para validar los resultados del producto Máscara de Nubes con datos reales de estaciones meteorológicas	38
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	41
4.1. Determinar la cobertura nubosa promedio en porcentaje de cielo despejado a nivel mensual usando el producto Máscara de Nubes del sensor MODIS	41
4.1.1. Análisis para la estación de verano.....	41
4.1.2. Análisis para la estación de otoño	44
4.1.3. Análisis para la estación de invierno	46
4.1.4. Análisis para la estación de primavera	49
4.2. Determinar la influencia de los sistemas meteorológicos sinópticos a nivel mensual que favorecen la nubosidad del Perú.	51
4.2.1. Análisis para la estación de verano.....	51

4.2.2. Análisis para la estación de otoño	64
4.2.3. Análisis para la estación de invierno	76
4.2.4. Análisis para la estación de primavera	88
4.3. Validar los resultados del producto Máscara de Nubes del sensor MODIS con datos reales de estaciones meteorológicas de superficie.	103
V. CONCLUSIONES	106
VI. RECOMENDACIONES	108
VII. BIBLIOGRAFÍA	109
VIII. ANEXO	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de las bandas espectrales del sensor MODIS	15
Tabla 2: Bandas del MODIS usadas para el algoritmo de la Máscara de Nubes.	23
Tabla 3: Especificaciones del SDS de la Máscara de nubes (Cloud_Mask) MODIS de 48 bits.	25
Tabla 4: Descripción de los primeros tres bits del primer byte del SDS Cloud_Mask.	36
Tabla 5: Cobertura nubosa clasificada en categorías y su equivalencia en términos de cielo nublado y cielo despejado.....	39
Tabla 6: Parámetros estadísticos entre los datos de cobertura nubosa promedio del producto satelital y las estaciones meteorológicas aeronáuticas.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico con algunos aspectos de la actividad humana.....	3
Figura 2. Tamaño relativo de los núcleos de condensación, gotas de nube y gotas de lluvia.	5
Figura 3. Esquema de posibles nubes de origen orográfico que se pueden formar.	5
Figura 4. El sol calienta la superficie de la Tierra y a su vez, eleva la temperatura del aire que está en contacto con dicha superficie, favoreciendo su ascenso por menor peso que el aire a su alrededor.	6
Figura 5. El aire frío es más denso que el aire caliente, cuando una masa de aire caliente choca contra una masa de aire frío, al aire frío queda debajo del aire caliente. Una vez que el aire caliente sube, se enfría y se forman nubes.	7
Figura 6. Formación de nubes por convergencia.....	7
Figura 7. La Zona de Convergencia intertropical (ZCIT) y su relación con los vientos alisios.....	9
Figura 8. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles bajos (LLJ es SALLJ). Se muestran otros sistemas como el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS) y frentes.	12
Figura 9. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles altos. Se muestran otros sistemas como Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), Vórtices Ciclónicos de Niveles Altos (VCAN) y los Jet Subtropical (JP) y Polar (JP).	12
Figura 10. Franjas de paso del Terra y Aqua están sombreados de color rojo claro y azul claro, respectivamente. Las flechas representan la dirección de la órbita satelital cruzando el ecuador (descendiendo para Terra, ascendiendo para Aqua).	13
Figura 11. Organización de los productos MODIS en tiles en proyección sinusoidal.....	18

Figura 12. Estructura de datos del HDF.....	20
Figura 13. El contenido de un SDS.....	21
Figura 14. Ejemplo de muestra al usuario del modelo SDS.....	21
Figura 15. Representación gráfica de tres umbrales utilizados en la detección de nubes. γ , β y α dependerán de las pruebas que se realicen y establecer los niveles de confianza.	29
Figura 16. Representación de un Byte	30
Figura 17. Mapa Político del Perú.	32
Figura 18. Plataforma Web LAADS DAAC de la NASA	34
Figura 19. Ubicación de Perú en la organización de productos del MODIS en tiles.	35
Figura 20. Cobertura nubosa promedio en términos de cielo despejado para todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de enero.	43
Figura 21. Cobertura nubosa en promedio en términos de cielo despejado para todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de abril.	45
Figura 22. Cobertura nubosa promedio en términos de cielo despejado para todo en todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de julio.	48
Figura 23. Cobertura nubosa promedio en términos de cielo despejado para todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de octubre.	50
Figura 24. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de enero en el periodo 2002-2018.	53
Figura 25. Mapas de reanalysis del NCEP-NCAR de la velocidad y dirección promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de enero en el periodo 2002-2018 (flecha roja es SALLJ).	54

Figura 26. Mapas de reanalysis de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducida a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de enero en el periodo 2002-2018.	55
Figura 27. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y la humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de febrero en el periodo 2002-2018.	57
Figura 28. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de febrero en el periodo 2002-2018 (flecha roja es SALLJ).	58
Figura 29. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de febrero en el periodo 2002-2018.	59
Figura 30. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de marzo en el periodo 2002-2018.	61
Figura 31. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de marzo en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).	62
Figura 32. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (sb) y Radiación de onda larga (c) para el mes de marzo en el periodo 2002-2018.	63
Figura 33. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en	

diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de abril en el periodo 2002-2018.....	65
Figura 34. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de abril en el periodo 2002-2018.....	66
Figura 35. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de abril en el periodo 2002-2018.	67
Figura 36. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de mayo en el periodo 2002-2018.....	69
Figura 37. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de mayo en el periodo 2002-2018.	70
Figura 38. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de mayo en el periodo 2002-2018.....	71
Figura 39. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de junio en el periodo 2002-2018.....	73
Figura 40. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de junio en el periodo 2002-2018.....	74

Figura 41. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de junio en el periodo 2002-2018.....	75
Figura 42. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de julio en el periodo 2002-2018.....	77
Figura 43. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de julio en el periodo 2002-2018.....	78
Figura 44. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de julio en el periodo 2002-2018.....	79
Figura 45. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de agosto en el periodo 2002-2018.	81
Figura 46. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de agosto en el periodo 2002-2018.....	82
Figura 47. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de agosto en el periodo 2002-2018.....	83
Figura 48. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en	

diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de setiembre en el periodo 2002 – 2018.....	85
Figura 49. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de setiembre en el periodo 2002 – 2018.	86
Figura 50. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de setiembre en el periodo 2002 – 2018.....	87
Figura 51. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de octubre en el periodo 2002 – 2018.....	90
Figura 52. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de octubre en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).....	91
Figura 53. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de octubre en el periodo 2002 – 2018.....	92
Figura 54. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de noviembre en el periodo 2002 – 2018.....	95
Figura 55. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de noviembre en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).....	96

Figura 56. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de noviembre en el periodo 2002 – 2018.....	97
Figura 57. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de diciembre en el periodo 2002 – 2018.....	100
Figura 58. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de diciembre en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).....	101
Figura 59. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de diciembre en el periodo 2002 – 2018.....	102
Figura 60. Correlaciones en dos estaciones aeronáuticas que mostraron mejores resultados estadísticos para el producto satelital.	105

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Información de las estaciones meteorológicas aeronáuticas utilizadas.	113
Anexo 2: Cobertura nubosa promedio para cada mes del año en los rangos horarios de 10 – 11 am y 1 – 2 pm para un periodo de años	114
Anexo 3: Correlaciones de las otras estaciones meteorológicas aeronáuticas con el producto satelital.....	122
Anexo 4: Código en lenguaje R para manipular la información del sensor MODIS	123

RESUMEN

La nubosidad o cobertura nubosa es el resultado del espacio que ocupa las nubes en el cielo, que viene a ser la mejor representación de los procesos físicos que interactúan en un lugar determinado. Además, es una limitación importante en las aplicaciones del sensoramiento remoto óptico en lugares donde abundan las nubes como lo es la zona tropical donde se ubica el Perú. Su ubicación geográfica hace que posea una variedad de climas, y la variable meteorológica como la cobertura nubosa hace que varíe durante todo el año. Esta investigación tuvo por objetivo principal determinar la cobertura nubosa promedio en el Perú para el periodo 2002 – 2018, usando el producto satelital Máscara de Nubes del sensor MODIS en base a cobertura nubosa en términos de cielo despejado. Para ello se utilizó los satélites Terra y Aqua que poseen este sensor durante del periodo 2002 – 2018 en dos rangos horarios (10 – 11 am y 1 – 2 pm, respectivamente); además, se analizó la relación que guardan los sistemas meteorológicos a nivel sinóptico que promueven la formación de cobertura nubosa en el continente, así como en el Perú. Finalmente, se compararon con las condiciones promedios de cobertura nubosa registradas por estaciones meteorológicas terrenas para cotejar la cobertura nubosa hallada por las imágenes satelitales y las expresadas a través de los reportes meteorológicos METAR. Los resultados muestran que sí representa la cobertura nubosa en cada mes del año, los meses del verano se observa que en la región Sierra y Selva la probabilidad de tener cielo despejado es muy baja, y en la región Costa es alta la probabilidad; en los meses de invierno sucede lo contrario, en la región Sierra y Selva la probabilidad de tener cielo despejado aumenta y en la región Costa disminuye la probabilidad. El aumento de cobertura nubosa dependerá de la concentración de humedad que hay en la cuenca amazónica que es el lugar principal de formación de nubes en el continente sudamericano y afecta al Perú, ya que la temperatura promedio del aire es alta y constante todo el año. La validación resultó buena para la mayor parte del territorio de Perú con una correlación superior al 0.8; sin embargo, subestima los valores y presenta errores no tan grandes. Por lo que el promedio obtenido del producto Mascara de Nubes del sensor MODIS, sirve para representar adecuadamente el comportamiento de la variable cobertura nubosa en el Perú y apoyaría en la planificación de actividades de sensoramiento remoto, predicción del tiempo atmosférico, gestión de desastres, energías renovables, entre otros.

Palabras clave: Nubes, Cobertura nubosa, Máscara de Nubes, MODIS, Los Andes.

ABSTRACT

The cloudiness or cloud cover is the result of the space that clouds occupy in the sky, which is the best representation of the physical processes that interact in a given place, it is also an important limitation in the applications of optical remote sensing in places where clouds abound such as the tropical zone where Peru is located. The geography of Peru means that it has a variety of climates and meteorological variables such as cloud cover vary in each month of the year. The main objective of this research was to determine the average cloud coverage in Peru over a period of years using the satellite product Cloud Mask of the MODIS sensor based on cloud coverage in terms of clear skies. For this purpose, the Terra and Aqua satellites that have this sensor were used during the period 2002 - 2018 in two-time ranges; Furthermore, it was determined that meteorological systems at the synoptic level promote the formation of cloud cover in the continent, as well as in Peru; and it was compared with meteorological stations that record cloud cover to see if they correctly represent the variable. The results show that it does represent the cloud cover in each month of the year. During the summer months, it is observed that in the Sierra and Selva region the probability of having a clear sky is very low, and in the Coast region the probability is high; In the winter months the opposite happens: in the Sierra and Selva region the probability of having a clear sky increases and in the Coast region the probability decreases. The increase in cloud cover will depend on the humidity concentration in the Amazon basin, which is the main place of cloud formation in the South American continent and affects Peru, since the average air temperature is high and constant throughout the year. The validation was good for most of the territory of Peru with a correlation higher than 0.8; however, it underestimates the values and presents not so large errors. Therefore, the average obtained from Mr. MODIS's Cloud Mask product serves to represent the climate of the cloud cover variable in Peru and would support remote sensing, weather forecasting, disaster management, renewable energy, among others,

Keywords: Clouds, cloud cover, Cloud Mask, MODIS, Los Andes

I. INTRODUCCIÓN

La nube es el resultado de la interacción entre la atmósfera y la superficie terrestre, que está influenciado por muchos factores, como geográficos, meteorológicos entre otros. La cobertura nubosa o nubosidad viene a ser la distribución de estas nubes en el cielo y que es muy cambiante ya que obedece a las continuas transformaciones de estos factores tanto espacial como temporal. Conocer cuál es el estado del cielo en un momento dado tiene un especial interés que no ha sido tomado en cuenta. La nubosidad juega un papel importante para las predicciones meteorológicas y climáticas, ya que es el indicador fundamental en la producción de la precipitación, además reviste de gran importancia en el flujo de la radiación, por la utilización de ésta como recurso energético y su influencia en el clima, economía, salud humana, gestión de desastres, entre otras cosas.

Esta investigación analiza la climatología de la cobertura nubosa en el territorio del Perú. Esto se calculó a partir de imágenes de satélite que captan casi toda el área que posee el país con el objetivo de conocer cómo es su comportamiento espacial y temporal. Para realizar esto, se usó el producto llamado Mascará de Nubes del sensor MODIS que se encuentra a bordo de los satélites Terra y Aqua, que registra la cobertura nubosa en términos de cielo despejado. Se obtuvo un promedio del 2002 al 2018 en dos rangos horarios para cada mes, lo que permitió saber cómo es el estado de la nubosidad en todo el territorio peruano, ya que la geografía que posee también influye bastante en los mecanismos que puedan fomentar su desarrollo.

La formación de nubes en el Perú está influenciada por sistemas meteorológicos que intervienen mucho en el clima de Sudamérica. La comprensión de estos sistemas se realizó mediante la información de reanalysis de los productos del National Centers for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR), con el fin de analizar las condiciones termodinámicas y sinópticas en diferentes niveles de la atmósfera que puedan influenciar en la formación de nubes tanto en Sudamérica como en el Perú.

Para verificar si los resultados que registra el producto satelital son correctos, se comparó con estaciones meteorológicas aeronáuticas que registren la cobertura nubosa usando parámetros estadísticos de validación para comprobar si representa realmente la cobertura nubosa en cada de mes del año.

La frecuencia de una cubierta nubosa tiene un mayor efecto en aplicaciones que requieran datos en una serie de tiempo o realizar una comparación entre el pasado, presente y posible futuro porque oculta la información o el dato; y puede resultar en un problema, incluso para una sola imagen satelital que se pueda usar. En satélites ópticos de órbita polar, encontrar o identificar una imagen libre de nubes es difícil, por lo que conocer si en un lugar determinado estará despejado o libre de nubes sería fundamental para realizar diferentes aplicaciones que se requieran como gestión de riesgos por desastres naturales, fuentes de energía solar, los mismos satélites ópticos, entre otras cosas.

El objetivo general de esta investigación es determinar la cobertura nubosa a nivel mensual en el periodo 2002 – 2018 usando el producto satelital Máscara de Nubes MODIS sobre el territorio peruano.

Los objetivos específicos que se plantearon son:

- 1) Determinar la cobertura nubosa promedio en porcentaje de cielo despejado a nivel mensual usando el producto Máscara de Nubes del sensor MODIS.
- 2) Determinar la influencia de los sistemas meteorológicos a nivel sinóptico que favorecen la nubosidad en el Perú, y
- 3) Validar los resultados del producto Máscara de Nubes del sensor MODIS con datos de nubosidad de las estaciones meteorológicas de superficie.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Nubes

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), una nube es un hidrometeoro consistente en una suspensión en la atmósfera de partículas minúsculas de agua o cristales de hielo (o ambas a la vez) en suspensión en el aire. Este conjunto también contiene partículas de mayores dimensiones y de impurezas como, por ejemplo: gases industriales, humo o polvo. Estas partículas, que también son considerados como gotas, están afectados por un movimiento de caída muy lento debido a su baja densidad y la resistencia del aire, por lo que la mínima corriente ascendente es suficiente para mantenerlos en equilibrio, incluso levantarlos. Por esta razón es que las nubes parecen flotar en la atmósfera (Olcina, 2013).

La génesis de una nube empieza cuando el agua de los mares, océanos, lagos, ríos, etc. se evapora y de la vegetación, transpira y se incorpora a la atmósfera. El agua pasa al aire en forma de vapor de agua que es uno de los componentes del aire que, aun estando en pequeñas proporciones y limitado en las capas bajas de la atmósfera (tropósfera), juega un papel muy importante dentro de ella y mantiene la vida en la tierra. Esto quiere decir que las nubes son un eslabón del ciclo natural del agua en la tierra, que es generado y movido por el ingente calor del sol, el motor el tiempo atmosférico (Figura 1) (León y Quirantes, 2004).

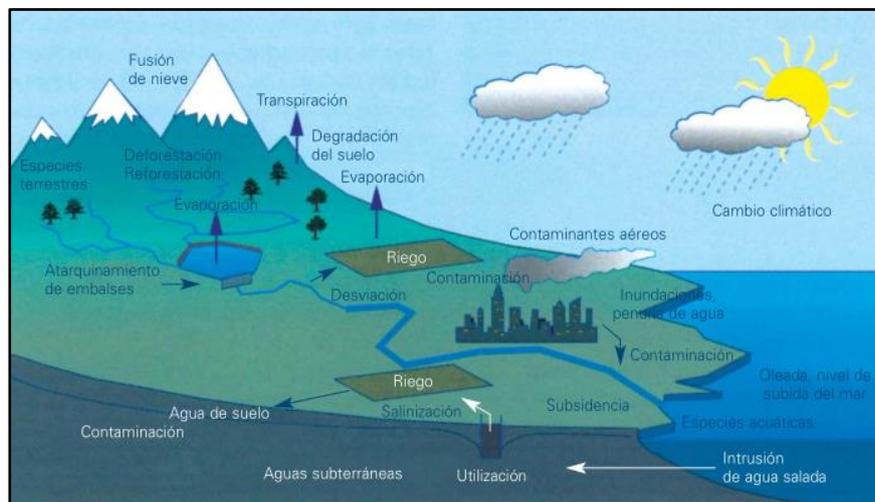


Figura 1. Ciclo hidrológico con algunos aspectos de la actividad humana.
FUENTE: Organización Meteorológica Mundial (OMM).

2.1.1. Formación de nubes

La formación de una nube es compleja y requiere unas condiciones específicas de humedad, temperatura y presión del aire en el que diferentes factores y mecanismos están involucrados. Estas condiciones cambian en relación con la masa de aire húmedo y su enfriamiento sucesivo hasta el punto de rocío. Un cuerpo de agua o la humedad del suelo se evapora como resultado de la radiación solar o un volumen de calor, se forma aire húmedo y comienza a ascender lentamente desde que recibe calor debido a que el aire húmedo es más ligero que el aire que lo rodea. A medida que se eleva, dos factores actúan en la masa de aire: la disminución en la presión hace que el aire se expanda y la disminución de la temperatura, debido a la mayor altitud, se enfría hasta que alcanza el punto de rocío. La masa de aire está saturada con vapor de agua y se condensa en pequeñas gotas de agua en su estado líquido. Una nube es la expresión visible de este proceso. El proceso de condensación es favorecido si las partículas e impurezas que están presentes pueden actuar como núcleos de condensación en el que puedan depositarse las gotas. Si estos están ausentes, la masa de aire puede saturarse en exceso con vapor de agua (Olcina, 2013).

2.1.2. Núcleos de Condensación

Los núcleos de condensación, así como también los de sublimación y congelación, son partículas muy pequeñas de sustancias higroscópicas (capaces de absorber la humedad) que, gracias a su composición química, que están conformados por todo tipo de impurezas como partículas de sal, polvo, humo, polen etc., favorecen los procesos atmosféricos de condensación, sublimación y congelación. El resultado será una nube que consta de billones de pequeñas gotitas de agua. De esta manera, las fuerzas que se oponen a los cambios de fase se ven modificadas o eliminadas parcialmente para permitir la formación de las nubes, hacer crecer las gotitas o cristales suspendidos, hasta ganar el peso suficiente para caer por la gravedad hacia el suelo. La diferencia de tamaño entre una gota de nube y una de lluvia se muestra en la Figura 2 (León y Quirantes, 2004).

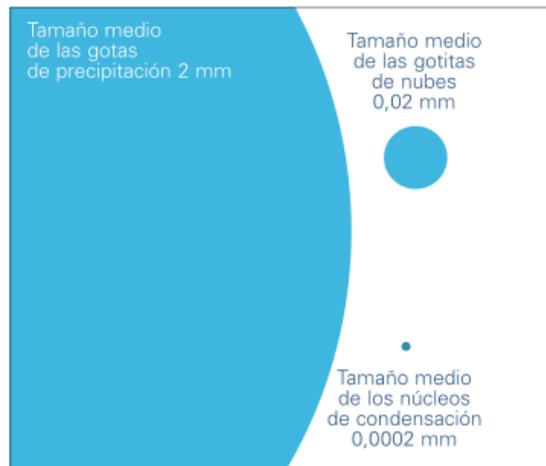


Figura 2. Tamaño relativo de los núcleos de condensación, gotas de nube y gotas de lluvia.
FUENTE: León y Quirantes (2008).

2.1.3. Mecanismos de formación de nubes

Una nube este compuesto por pequeñas gotas de agua y minúsculos cristales de hielo suspendidos en el aire. Para que estas pequeñas gotas de agua o cristales de hielo puedan formar nubes en la atmósfera, tienen que ocurrir varios procesos capaces de elevar a capas o burbujas de aire en la baja atmósfera. Los mecanismos de ascenso que fuerzan a elevar masas de aire son de diversos tipos. Las formas más principales y fundamentales como puedan formarse las nubes son las siguientes, a saber:

a. Orografía

Ocurre cuando el aire es forzado a elevarse debido a la presencia física de tierra elevadas (montañas). A medida que la masa de aire se eleva, se enfría como resultado de la expansión adiabática en el rango aproximado de 10°C por 1000 m. hasta la saturación. Cuando una barrera natural obliga al aire a ascender y enfriarse frecuentemente, el resultado es la formación de nubosidad de carácter orográfico en la zona donde incide el flujo aéreo, a barlovento como a sotavento o en la cresta de la cadena montañosa (Pidwirny, 2006).

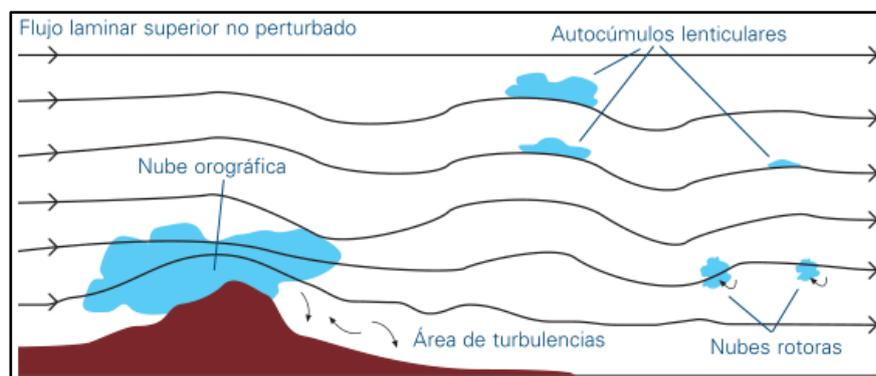


Figura 3. Esquema de posibles nubes de origen orográfico que se pueden formar.
FUENTE: León y Quirantes (2004)

b. Convección

Es un fenómeno que está asociado al calentamiento solar diferencial que se genera en la superficie de la tierra. Si se produce suficiente calentamiento, la masa de aire se convierte más cálido y más liviano que el aire en su alrededor; y al igual que un globo de aire caliente, comienza a elevarse, expandirse y enfriarse. Cuando se produce el enfriamiento suficiente, se produce la saturación formando nubes. Este proceso está activo en el interior de continentes y cerca del ecuador formando nubes cumulus y/o cumulonimbus (Pidwirny, 2006).

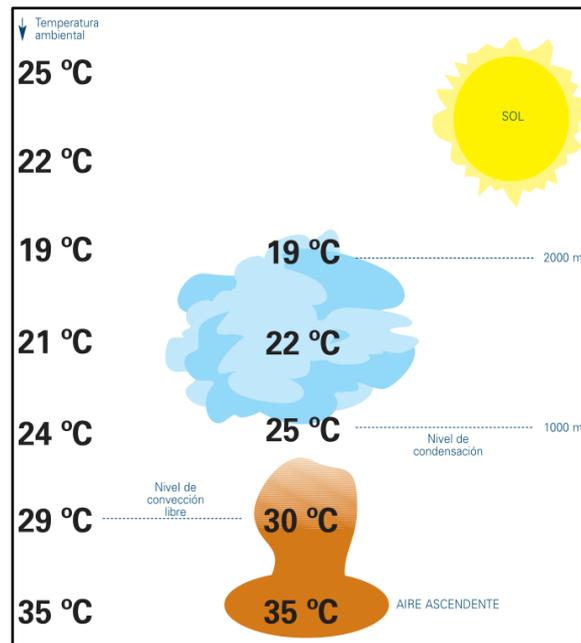


Figura 4. El sol calienta la superficie de la Tierra y a su vez, eleva la temperatura del aire que está en contacto con dicha superficie, favoreciendo su ascenso por menor peso que el aire a su alrededor.

FUENTE: León y Quirantes (2004).

c. Frentes

Este sucede cuando dos masas de aire se unen. En muchos casos, las dos masas de aire tienen diferentes características de temperaturas y humedad. Generalmente, uno es cálido y húmedo mientras que el otro es frío y seco. El borde de la masa de aire frío actúa como una muralla inclinada o frente causando que el aire húmedo y cálido se eleve. Por supuesto, el ascenso provoca que la masa de aire cálida se enfríe debido a la expansión que resulta en saturación. Este mecanismo de formación de nubes es común en latitudes medias donde se forman los ciclones a lo largo del frente polar y cerca del ecuador donde los vientos alisios se encuentran en la zona de convergencia intertropical.

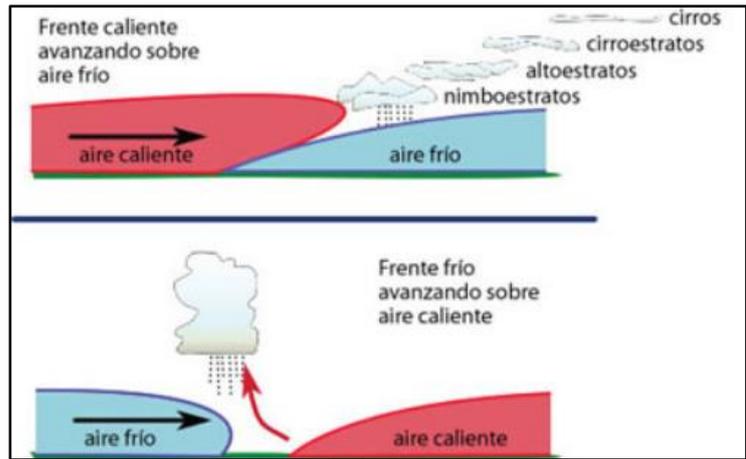


Figura 5. El aire frío es más denso que el aire caliente, cuando una masa de aire caliente choca contra una masa de aire frío, al aire frío queda debajo del aire caliente. Una vez que el aire caliente sube, se enfría y se forman nubes.

FUENTE: CMMAP.

d. Convergencia

En este proceso, el aire es obligado a converger o unirse, tal como el centro de un sistema de baja presión donde el viento se mueve de alta a baja presión. Cuando este aire llegue al centro, solo podrá ir hacia arriba y no en otra dirección (no puede regresar a la superficie).

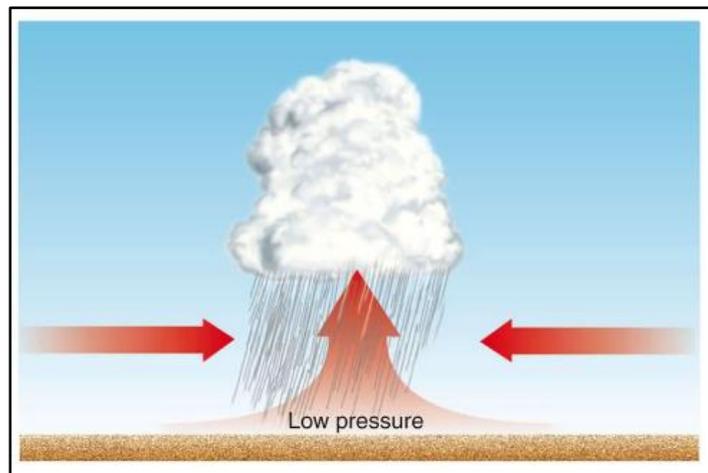


Figura 6. Formación de nubes por convergencia.

FUENTE: Thomson (2007).

2.2. Circulaciones Atmosféricas que intervienen en la nubosidad

Por la ubicación geográfica, el Perú debería tener un clima tropical – cálido, húmedo y lluvioso; sin embargo, intervienen diversos factores que determinan la presencia de una gran variedad de climas en el territorio peruano y lo modifican. Entre estos factores esta la ubicación del país en la zona intertropical o latitud baja, cerca al Ecuador donde los rayos

solares llegan de forma más directa y elevan la temperatura; las modificaciones altitudinales de la cordillera de los andes, que por su gran altitud actúa como una muralla que impide el paso de los vientos provenientes del Atlántico y cruzan la Amazonia, y que se convierten en nubes y lluvias; las corrientes marinas que recorren la costa del país, la Corriente del Niño que trae aguas cálidas y eleva la temperatura en la costa norte; asimismo, la Corriente Peruana o de Humboldt que trae aguas frías del sur y descende la temperatura en el resto de la costa e influyen en la formación de la nubosidad.

Todos estos factores hacen que el Perú posea una gran variedad en todo aspecto, ya sea por estos factores que intervienen en el clima o por los fenómenos atmosféricos que afectan la variabilidad climática y circulación atmosférica en América del Sur, como los sistemas de alta presión que se encuentran en los océanos adyacentes al continente, la convergencia de vientos alisios sobre el Ecuador, el fenómeno El Niño – Oscilación Sur que tiene influencia directa sobre la parte tropical y subtropical del continente (Garreaud, 2007).

Se verá a detalle aquellos patrones de circulación atmosférica que actúan sobre Sudamérica e influyen en la nubosidad sobre Perú.

2.2.1. Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)

La Zona de Convergencia Intertropical es una región de bajas presiones que rodea generalmente la Tierra cerca del ecuador donde los vientos alisios del noreste del hemisferio norte y los del sureste del hemisferio sur se encuentran (Skybrary, 2018). A medida que los vientos convergen, el aire húmedo es forzado a ascender, produciendo nubes cúmulos y fuertes precipitaciones, por lo que se caracteriza en ser un área de gran actividad convectiva que produce fuertes tormentas sobre grandes áreas. El ZCIT se desarrolla con mayor claridad en los océanos tropicales (Pacífico oriental y Atlántico). Es la característica climática más prominente en los trópicos y desempeña papeles principales en el clima tropical interactuando con las circulaciones a escala planetaria de la atmósfera y océano (Yan, s. f.).

Su posición está generalmente dentro del ecuador y 5° norte y sur del ecuador. Varía estacionalmente y se queda retardada o atrás de la posición relativa del sol sobre la superficie de la Tierra alrededor de uno a dos meses, y se correlaciona mejor con las áreas de mayor calentamiento en el ecuador. En enero, se encuentra alrededor de los 15°S sobre América del Sur y África. En julio, se encuentra alrededor de los 25°N sobre África y sobre los 30°N sobre Asia (Yan, s. f.).

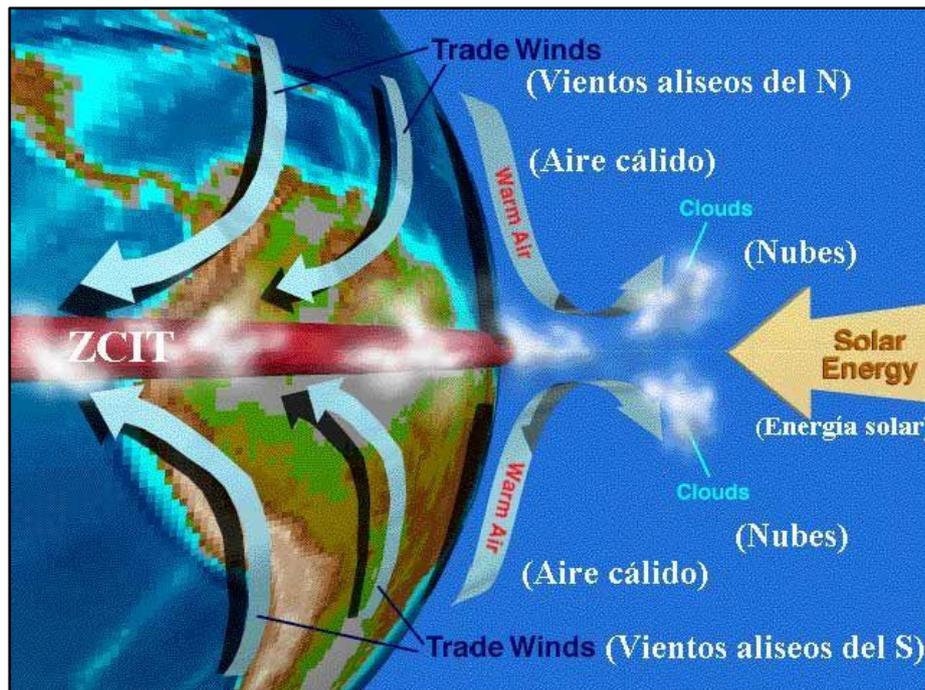


Figura 7. La Zona de Convergencia intertropical (ZCIT) y su relación con los vientos alisios.
FUENTE: Meteored (2002).

2.2.2. Anticiclón del Pacífico Sudeste (APS)

Es un sistema de alta presión que se ubica en la zona central del Pacífico en el hemisferio sur. Crea una circulación de masa de aire que, desplazándose en sentido contrario a las agujas de reloj, forma un circuito de vientos en todo el Pacífico sur. Estos vientos llegan a las costas peruanas impulsando masas de aire con alta humedad atmosférica porque proceden de aguas tropicales. Cuando se enfrían por la corriente peruana (aguas frías), originan neblinas que se acumulan en forma de nubes en la costa centro – sur (Plácido, 2017).

A nivel estacional, frente a costas peruanas, el APS provoca vientos favorables a la surgencia que son más intensos en el invierno que en el verano. Estos vientos paralelos a la costa advectan agua hacia el norte y ocasionan el transporte de Ekman costa afuera, y se genera un consecuente afloramiento de estratos más profundos. Cuando el APS se fortalece, se incrementa la magnitud de los vientos provenientes del sur y, por tanto, hay un mayor transporte de aguas del polo y más eventos de surgencia. Al debilitarse el APS, los vientos provenientes del sur decrecen en magnitud y la incidencia del transporte de Ekman es menor (Ancapichún, 2015).

Frente a las costas del norte de Chile, entre los 20° y 30°S, se ubica el anticiclón del pacifico, masa de aire seca que durante el verano austral se desplaza hacia el sur hasta los 45°S y

retrocede en el invierno alrededor de 35°S. la presencia del anticiclón es la causa del buen tiempo y la ausencia de precipitaciones durante el verano de Chile (Plácido, 2017).

2.2.3. Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS)

El ZCAS es esencialmente un cinturón extenso o una banda de nubes persistente (cuasi estacionaria) convectivamente activa, acompañada por abundante precipitación que acompaña generalmente en la estación del verano austral y orientado del noroeste al sureste sobre la región tropical de Sudamérica hacia el sureste de Brasil y también con frecuencia sobre el Océano Atlántico Sur. Desde el punto de vista de la meteorología sinóptica, es similar a un frente estacionario o semi-estacionario (que es un frente frío que se estancó), exhibiendo vientos convergentes, pero sin el contraste de densidad (o temperatura) entre masas de aire frío o cálido que caracteriza a un frente clásico (Villela, 2017).

Los máximos totales de precipitación entre diciembre y febrero sobre la mayor parte de la región tropical de América del Sur ocurren con el establecimiento del ZCAS, que representa al Monzón Sudamericano bien configurado. Aunque el ZCAS sea observada en todos los veranos, hay variabilidad en su organización espacial, intensidad de las lluvias y circulación, que influyen en la ocurrencia de eventos extremos como anegamientos y deslizamientos de tierra. La ausencia de ZCAS puede representar, al contrario, largos periodos de sequías o de mala distribución de lluvias (Mendonça, 2017).

2.2.4. Chorro de Bajos Niveles Sudamericano (SALLJ)

El Chorro de Bajos Niveles Sudamericano es un sistema de vientos que tiene la velocidad máxima en torno a los 2000 m y ocurren al lado este de la cordillera de los Andes, que bloquea la circulación de los bajos niveles provocando la canalización del aire y transporte de humedad desde la cuenca amazónica hacia la cuenca del Paraná – Plata (Argentina), afectando el tiempo y clima de la región este de los Andes. Las variaciones en el transporte de humedad pueden generar condiciones de tiempo severos asociados a grandes nubes convectivas en la región de salida del Chorro causando tormentas e inundaciones (Mendonça, 2017).

El SALLJ está presente a lo largo del año, en verano el suministro de humedad es originado por el paso de los vientos alisios sobre la región de evapotranspiración del bosque amazónico, mientras que en invierno proviene del océano Atlántico gracias a la Alta presión del Atlántico Sur (Mendonça, 2017).

Uno de los criterios para la identificación del SALLJ fue propuesto por Bonner (1968). Consiste en identificar vientos a 850 hPa de velocidad mayor o igual a 12 m/s; una cizalladura vertical mayor o igual a 6 m/s entre los 850 y 700 hPa; y un componente meridional del viento mayor al componente zonal. (Paccini, 2016).

2.2.5. Alta de Bolivia (AB)

La Alta de Bolivia es un anticiclón de niveles altos (~200 mb o hPa) que se desarrolla durante el verano sobre el Altiplano Boliviano, una región de meseta de los Andes Centrales. La posición e intensidad de este sistema de presión alta se ha relacionado a la variación estacional en la lluvia amazónica, episodios húmedos y secos sobre el Altiplano, la generación de vórtices ciclónicos en 200 hPa, y variaciones interanuales a nivel del Lago Titicaca.

En general, se sabe que los patrones de onda estacionaria (como la Alta de Bolivia) son una respuesta al forzamiento orográfico o termal o alguna combinación de ambos. La proximidad de la AB a las montañas de los Andes sugiere que esta característica puede ser una respuesta dinámica directa de los Andes. Por otro lado, la meseta elevada del Altiplano es una gran fuente de calor, mediante calor sensible (calentamiento del aire por la superficie de la tierra) y calor latente (calentamiento por condensación liberado por precipitación); así que, la AB puede ser una respuesta termal del Altiplano. Otra posibilidad es que la AB es una respuesta térmica al calentamiento por condensación que ocurre en regiones adyacentes, tales como la cuenca del Amazonas (Lenters & Cook, s. f.).

Al nivel de 200 hPa el centro de la AB se ubica aproximadamente en 13°S y 68°W; asimismo, la circulación anticiclónica alrededor de la AB es intensa, presentando valores de vorticidad relativa (rotación) mayores a $3.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, especialmente en los lados sur y este, por tal razón los vientos son más intensos en la periferia del sistema que en su centro con valores de 15 m/s y 5-10 m/s respectivamente. Por último, Gilford et al. (1992) señalan que la AB es la única fuente de vientos del este para la región sur del Amazonas y norte de Bolivia; lo cual promueve la advección de humedad y la convección orográfica sobre los Andes peruanos (Barreto, 2016).

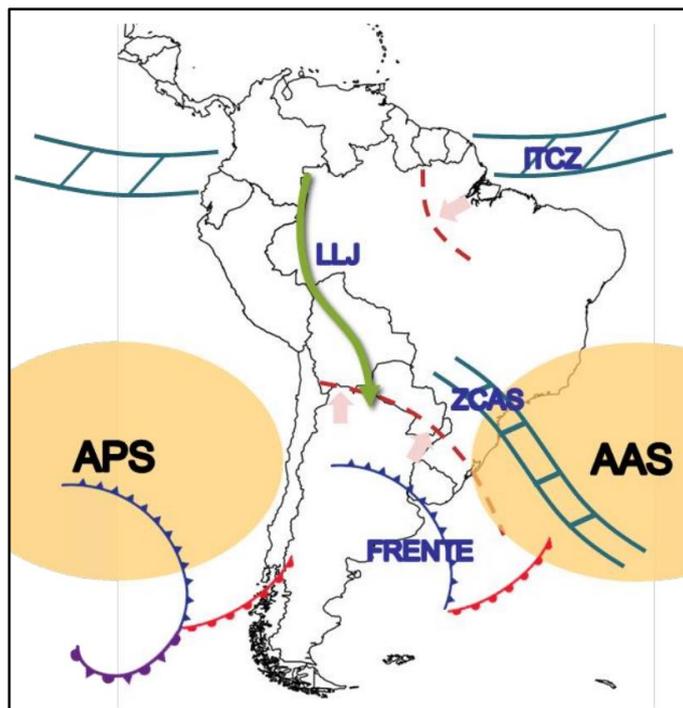


Figura 8. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles bajos (LLJ es SALLJ). Se muestran otros sistemas como el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS) y frentes.
FUENTE: Quispe (2017).

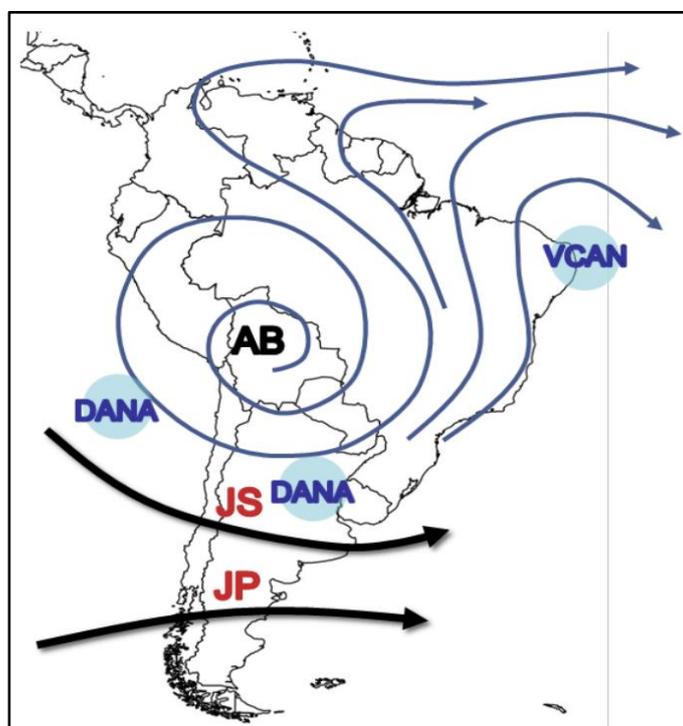


Figura 9. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles altos. Se muestran otros sistemas como Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), Vórtices Ciclónicos de Niveles Altos (VCAN) y los Jet Subtropical (JP) y Polar (JP).
FUENTE: Quispe (2017).

2.3. Sensor MODIS

El MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor óptico de imágenes de carga útil que viaja a bordo alrededor de los satélites Terra o EOS-AM y Aqua o EOS-PM, ambos lanzados al espacio en diciembre de 1999 y mayo de 2002, respectivamente. La órbita de ambos satélites es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de 98.2° y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente. La órbita de Terra alrededor de la tierra está programada para viajar de norte a sur cruzando el ecuador por la mañana, mientras Aqua está programada para viajar de sur a norte cruzando al ecuador por la tarde (Mas, 2011).

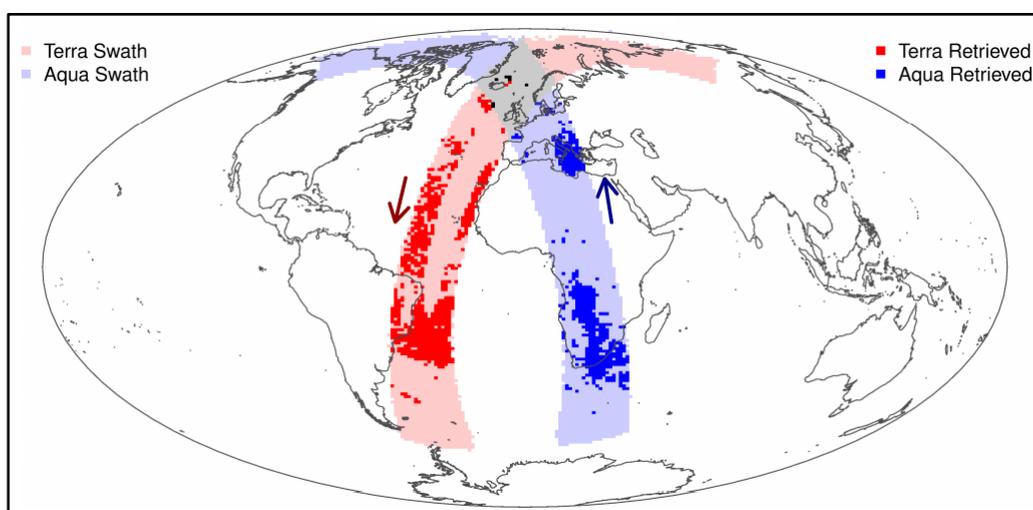


Figura 10. Franjas de paso del Terra y Aqua sombreados de color rojo claro y azul claro, respectivamente. Las flechas representan la dirección de la órbita satelital cruzando el ecuador (descendiendo para Terra, ascendiendo para Aqua).

FUENTE: Levy (2018).

Terra y Aqua cubren la superficie de la tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales. Estos datos mejorarán a comprender sobre la dinámica global y los procesos que ocurren en la superficie de la Tierra, en los océanos y en la atmosfera baja. MODIS está cumpliendo un papel vital en el desarrollo de modelos validados, globales e interactivos del sistema Tierra capaces de predecir el cambio global con la suficiente precisión para ayudar a los responsables políticos a tomar decisiones acertadas concernientes a la protección de nuestro ambiente (NASA, 2008).

2.3.1. Especificaciones Técnicas del sensor MODIS

- Órbita: 705 km, pasando en el ecuador a 10:30 a.m. nodo descendente para Terra y a la 1:30 p.m. nodo ascendente para Aqua; helio-síncrona, casi polar, circular.

- Rango de escaneo: 20.3 rpm, ortogonal a la órbita.
- Dimensión de la franja: 2330 km (ortogonal) por 10 km (a lo largo de la órbita en el nadir).
- Telescopio: 17.78 cm diámetro fuera del eje, afocal (colimado), con planos de desvíos intermediarios.
- Tamaño: 1.0 x 1.6 x 1.0 m
- Peso: 228.7 kg
- Poder: 162.5 W (promedio orbital)
- Rango de datos: 10.6 Mbps (pico durante el día); 6.1 Mbps (promedio orbital).
- Codificación: 12 bits
- Resolución espacial: 250 m (bandas 1-2), 500 m (bandas 3-7), 1000 m (bandas 8-36)
- Vida útil: 6 años

Las primeras 19 bandas están dentro del espectro electromagnético entre 0.405 – 2.155 nm. Las bandas del 1 al 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas del 8 al 16, para observaciones oceánicas y las bandas 17 al 19, para mediciones atmosféricas. Las bandas 20 al 36 cubren la porción del infrarrojo térmico del espectro de 3.660 – 14.385 μm . Las dos primeras bandas tienen una resolución espacial de 250 m al nadir, las cinco bandas siguientes están a 500 m y las 29 bandas restantes a 1 km. Por ende, MODIS posee una alta calidad geométrica que permite el monitoreo preciso de las alteraciones de la superficie terrestre (NASA, 2008). Algunos datos técnicos y aplicaciones se muestran en la tabla 1, así como una descripción técnica muy detallada de los materiales o componentes está disponible en el portal de la NASA <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>

Tabla 1: Características de las bandas espectrales del sensor MODIS

Uso primario	Banda	Ancho de banda ¹	Radiancia espectral ²	SNR ³ requerido
Límites de Tierra/Nubes/ Aerosoles	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Propiedades de Tierra/Nubes/ Aerosoles	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1	110
Color del Océano/ Fitoplancton/Biogeoquímica	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Vapor de agua atmosférico	17	890 - 920	10	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15	250
Uso primario	Banda	Ancho de banda ¹	Radiancia espectral ²	NE[Δ]T(K) ⁴ requerido
Temperatura de la Superficie/Nubes	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	00.5
	21	3.929 - 3.989	0.45(300K)	2
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
Temperatura Atmosférica	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
Vapor de agua de nubes cirrus	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
Propiedades de las nubes	29	8.40 - 8.70	9.58(300K)	0.05
Ozono	30	9.58 - 9.88	3.69(250K)	0.25
Temperatura de la Superficie/Nubes	31	10.78 - 11.28	9.55(300K)	0.05
	32	11.77 - 12.27	8.94(300K)	0.05
Altitud del tope de las nubes	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

¹ bandas del 1 al 19 están en nm; Bandas del 20 al 36 están en μm . ² valores de radiancia espectral están en $\text{W}/\text{m}^2\text{-}\mu\text{m}\text{-sr}$. ³ SNR = ratio de señal-ruido. ⁴ NE(Δ)T = diferencia de temperatura equivalente al ruido.
FUENTE: NASA, (2008).

2.3.2. Niveles de procesamiento de los Productos del sensor MODIS

Los productos MODIS se procesan en diferentes etapas (NASA, 2006):

- Nivel 0: Datos del instrumento sin procesar en resolución original, tiempo ordenado, con paquetes duplicados eliminados.
- Nivel 1A: Datos reconstruidos de radiancia del instrumento, a resolución original con datos de calibración adjuntos. Los datos de geolocalización se almacenan en un archivo separado.
- Nivel 1B: Datos del Nivel 1A convertidos en radiaciones calibradas.
- Nivel 2: Parámetros geofísicos derivados a la misma resolución y ubicación que los datos del Nivel 1. En otras palabras, los datos están en la geometría de la franja del instrumento. Para MODIS, cada escena consiste en 5 minutos de visualización por el instrumento (aproximadamente 203 escaneos)
- Nivel 2G: Los productos tierra del MODIS son procesados en un paso intermediario para almacenar información concerniente a las observaciones del Nivel 2 que caen dentro de cada celda de la cuadrícula de Nivel 3 (incluye los parámetros geofísicos y la geometría de detección para observación del Nivel 2). Las observaciones almacenadas en los productos del Nivel 2G son examinados por los procesos del nivel 3 para extraer las observaciones más relevantes para cada celda de la cuadrícula.
- Nivel 3: Parámetros geofísicos que han sido remuestreados espacial o temporalmente en una cuadrícula ubicada en la Tierra usando una proyección común.
- Nivel 4: Modelo de salida y/o resultados de datos de nivel inferior que no son derivados directamente por el instrumento.

2.3.3. Productos del sensor MODIS

Los productos de datos de nivel superior pueden ser agrupados en base a sus áreas de aplicación. Estos productos están siendo usados por científicos de una variedad de disciplinas, con enfoques al estudio de los océanos, la atmósfera, la criósfera y las cubiertas terrestres; también, estos productos están generalmente distribuidos en diferentes resoluciones espaciales (250/500/1000 m) y combinaciones temporales compuestas (diarios/8 días/16 días/mensual/anual) para ambos satélites. Debido a la gran cantidad de productos MODIS, a menudo en diferentes versiones, resoluciones espaciales y temporales, puede tornarse muy confuso. El presente estudio se enfocó en los productos dedicados al

estudio de la atmósfera, y en particular, a un producto de esta rama que se verá con más detalle en el punto 2.5.

Cada uno de esos productos tiene un prefijo para diferenciar de ambas plataformas espaciales. Por ejemplo, “MOD” son productos del satélite Terra mientras “MYD” son productos del satélite Aqua y el prefijo “MCD” son productos generados de una combinación de ambos satélites.

Los nombres de los archivos MODIS siguen una convención de nomenclatura que varía para cada producto, pero mantiene la convención y que da información útil con respecto al producto en específico. Por ejemplo:

Plataforma Terra: MOD06_L2.AYYYYDDD.VVV.YYYYDDDDHHMMSS.hdf

Plataforma Aqua: MYD06_L2.AYYYYDDD.VVV.YYYYDDDDHHMMSS.hdf

MOD06_L2 = Nombre del tipo de datos de Ciencia de la Tierra.

A = Fecha de datos (adquisición).

YYYYDDD = Año y fecha juliano del dato.

HHMM = Hora y minuto de inicio del dato.

VVV = Versión de colección.

YYYYDDDDHHMMSS = fecha de producción (y hora).

hdf = sufijo denotando el archivo HDF (formato del archivo).

Se debe tener en cuenta que las horas están en UTC y no en hora local. El prefijo MOD06_L2 es solo un ejemplo (MYD04_L2, MOD08_G3, MYD35_L2, etc. podría ser sustituido).

Existen nueve productos atmósfera de MODIS en las dos plataformas satelitales: Terra y Aqua. Seis de estos productos pertenecen al nivel 2 o L2 y los otros tres pertenecen al nivel 3 o L3 producidos a escalas temporales diarias, cada ocho días y mensual. Cada producto se le asigna un nombre del tipo de dato de una ciencia de la Tierra que se usa como prefijo en el nombre de archivo del formato HDF. Los productos atmósfera MODIS son:

a. Nivel 2

- Producto Aerosol (MOD04_L2 y MYD04_L2)
- Producto Vapor de agua (MOD05_L2 y MYD05_L2)
- Producto Propiedades de la nube (MOD06_L2 y MYD06_L2)

- Producto Perfil atmosférico (MOD07_L2 y MYD07_L2)
- Producto Máscara de nubes (MOD35_L2 y MYD35_L2)
- Producto Atmósfera conjunta (MODATML2 y MYDATML2)

b. Nivel 3

- Producto Conjunto global diario (MOD08_D3 y MYD08_D3)
- Producto Conjunto global de ocho días (MOD08_E3 y MYD08_E3)
- Producto Conjunto global mensual (MOD08_M3 y MYD08_M3)

2.3.4. Organización espacial

Cada archivo almacena datos para un área de $10^\circ \times 10^\circ$, usando el sistema de referencia de coordenadas sinusoidales. Dependiendo del nivel de procesamiento, los productos MODIS presentan diferentes formas de organización espacial. Esta organización espacial está distribuida en retículas o cuadros llamados *tile*. Los *tiles* son identificados usando un número de columna “h” (vertical) y línea “v” (horizontal). El sistema de coordenadas *tile* empieza en (0,0) (número vertical tile, número horizontal tile) en la esquina superior izquierda y continua a la derecha (horizontal) y hacia abajo (vertical). En la Figura 11 se presenta la retícula de mosaicos MODIS, donde 188 cuadros indicados en blanco no contienen información y los 134 cuadros azules indican 100% de agua (Mas, 2011).

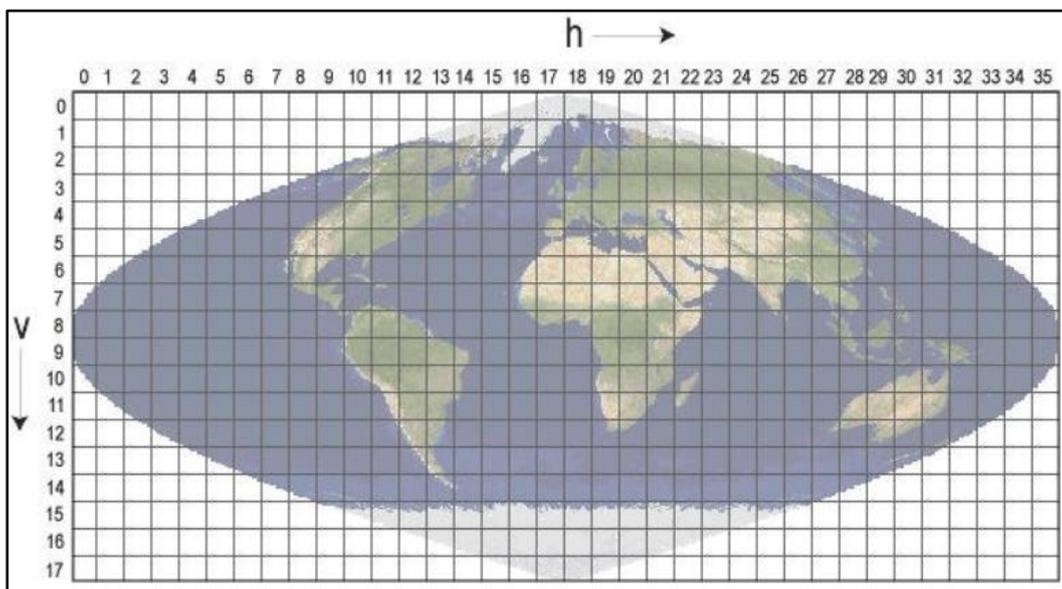


Figura 11. Organización de los productos MODIS en tiles en proyección sinusoidal.
FUENTE: NASA.

2.4. Formato de Almacenamiento HDF

Hierarchical Data Format (en inglés) o HDF es un formato basado en objetos desarrollado por el Centro Nacional para Aplicaciones de Supercomputación (NCSA, siglas en inglés) de la Universidad de Illinois. Está diseñado para facilitar el acceso a datos científicos como almacenamiento y manipulación en ambientes heterogéneos computacionales como sistemas operativos y máquinas. Actualmente hay dos versiones de HDF, versión 5 (HDF5) y la versión 4 (HDF4). El HDF admite una variedad de tipos de datos como matrices de datos científicos, tablas y anotaciones de texto, así como varios tipos de imágenes ráster y sus paletas de colores asociados. Algunas de las características del HDF son:

- Hace posible para los programas obtener la información sobre los datos del archivo de datos de sí mismo, más que de otra fuente.
- Estandariza el formato y las descripciones de muchos tipos de conjuntos de datos comúnmente usados.
- Es un formato de archivo de plataforma independiente. Puede ser usado en diferentes computadoras, independientemente del sistema operativo que la máquina este usando.
- Nuevos modelos de datos se pueden agregar al HDF, ya sea por el equipo de desarrollo o usuarios de HDF.

Los archivos HDF son también autodescriptivos. Para cada objeto de dato en el archivo HDF, hay etiquetas predefinidas que identifican dicha información como el tipo de dato, la cantidad de dato, su dimensión y su ubicación en el archivo. La capacidad de autodescripción de los archivos HDF tiene implicancias importantes para el procesamiento de datos científicos. Esto hace posible entender por completo la estructura y contenido de un archivo solo de la información almacenada en el mismo archivo. La autodescripción también significa que varios tipos de datos pueden ser incluidos en un archivo HDF. Por ejemplo, es posible acomodar datos simbólicos, numéricos y gráficos en un archivo HDF (Mas, 2011).

2.4.1. Modelos de datos HDF

Los modelos de datos o estructura de datos HDF están diseñados para diferentes tipos de datos. Existen seis modelos de datos (ver Figura 12): (1) el modelo conjunto de datos científicos (SDS, siglas en inglés) usado para almacenar datos multidimensionales; (2) modelo imagen ráster usado para almacenar datos de imagen; (3) modelo datos de paleta usado para almacenar tablas de búsqueda de color para asociar con datos de imagen de

paleta; (4) modelo Vdata usado para almacenar tabulares o “datos de vértice” similar a los datos vectoriales; (5) modelo de datos de anotación usado para proveer información de metadato sobre objetos de datos, grupos y archivos; y (6) el modelo Vgroup usado para asociar objetos de datos relacionados y modelos de datos. El modelo SDS es el más relevante para el sensoramiento remoto de observación de la tierra porque los datos de sensoramiento remoto de observación terrestre son datos de matriz predominantemente multidimensional (Qu, 2006). Así, solo el modelo SDS será introducido.

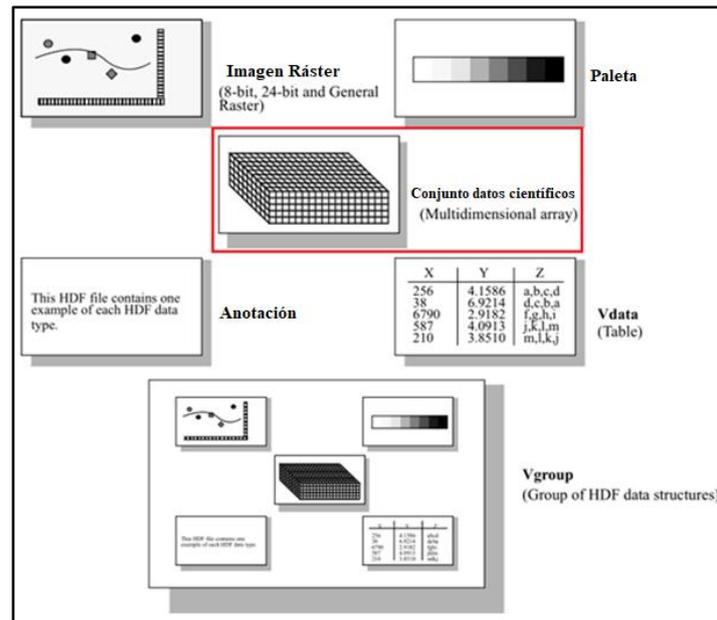


Figura 12. Estructura de datos del HDF.
FUENTE: The HDF Group (2017).

2.4.2. Conjunto de datos científicos (SDS)

El SDS (Scientific Data Set, en inglés) es un grupo de estructura de datos usado para almacenar y describir matrices (o formaciones) multidimensionales de datos científicos. La información que incluye estas matrices son número de dimensiones, el tamaño de cada dimensión, y el tipo de dato de la formación. Este modelo de dato está diseñado para incluir cuatro componentes (ver Figura 13): (1) un objeto de matriz de datos multidimensional que contiene los datos de la grilla, (2) un objeto de dimensión especificando el número de dimensiones del dato y el tamaño de cada dimensión, (3) el objeto de tipo de datos que especifica el tipo de dato, y (4) el nombre que identifica al SDS; además de otros componentes adicionales. También incluye componentes opcionales como atributos predefinidos, atributos definidos por usuario y escala de dimensión. (Qu, 2006).

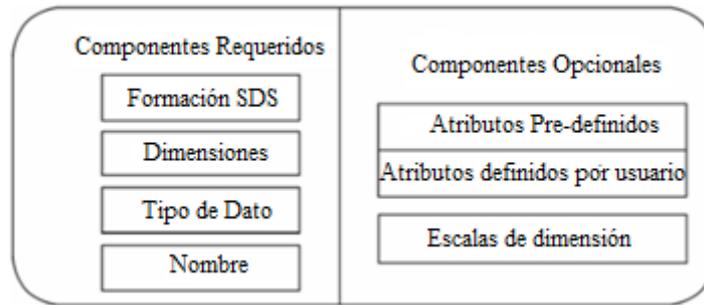


Figura 13. El contenido de un SDS.
FUENTE: Qu (2006)

Los componentes del atributo se utilizan para proveer información del metadata sobre un SDS, como una descripción de la naturaleza del dato, unidad de los valores del dato, y su coeficiente de calibración. La escala de dimensión se utiliza para asignar valores a la dimensión de la matriz de datos SDS y es útil cuando una dimensión representa valores de coordenadas espaciados irregularmente, tales como una dimensión de “profundidad” que representa intervalos irregulares de profundidad (Qu, 2006). La Figura 14 muestra como es la distribución general de un archivo con formato HDF.

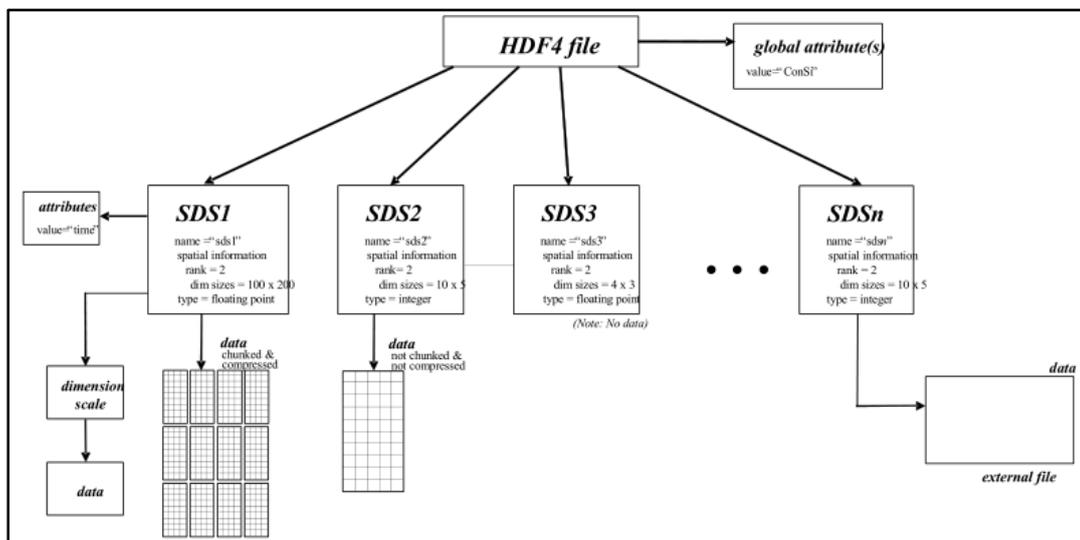


Figura 14. Ejemplo de muestra al usuario del modelo SDS.
FUENTE: The HDF Group (2017).

2.4.3. HDF-EOS

El programa Sistema de Observación de la Tierra (EOS, siglas en inglés) de la NASA (siglas en inglés) extendió el formato nativo HDF a HDF-EOS (Hierarchical Data Format – Earth Observing System). La principal diferencia entre HDF y HDF-EOS es que el HDF-EOS define estructuras específicas de almacenamiento de información de geolocalización en un

archivo HDF. Existen formas estandarizadas en HDF-EOS para almacenar y recuperar información de geolocalización y por lo tanto cualquier software desarrollado basado en la estructura HDF-EOS puede fácilmente leer y escribir tal información. Existen tres modelos de datos: punto, franja y grilla se definen en el HDF-EOS. Entre los tres modelos, el modelo punto está diseñado para puntos de datos discretos y el modelo franja y grilla son para datos de tipo formación (matriz) multidimensional (Qu, 2006).

2.5. Máscara de Nubes MODIS

La máscara de nubes MODIS es un producto de ciencia de datos que se produce regularmente como un producto estándar del Sistema de observación de la Tierra (EOS). Esto significa que el producto se genera teóricamente para cada pixel de cada imagen MODIS recopilada y está disponible para todos los usuarios. Se producen productos para los dos sensores del MODIS, Terra y Aqua, a resoluciones espaciales de 1 km y 250 m. Su objetivo es identificar escenas donde los productos terrestres, oceánicos y atmosféricos deben recuperarse en función de la cantidad de obstrucción de la superficie debido a nubes o aerosoles (Strabala, 2008).

El algoritmo de la Máscara de Nubes evalúa la probabilidad de que un pixel será oscurecido por nubes. El algoritmo aplica una serie de pruebas de umbral espectral a los valores de reflectancia de diferentes combinaciones de las bandas del MODIS. Las pruebas están diseñadas para determinar la presencia de diferentes tipos de nubes y para evaluar la profundidad óptica de la atmósfera. Los límites de confianza se aplican a los resultados de las pruebas para evaluar la probabilidad de que un pixel este despejado. En la tabla 2 se observa las bandas que se usaron para obtener la máscara de nubes MODIS (Armitage, 2012).

Tabla 2: Bandas del MODIS usadas para el algoritmo de la Máscara de Nubes.

Banda	Longitud de Onda (μm)	S(si)/N(no)	Comentarios
1 (250 m)	0.659	S	Detección de nubes a 250 m y 1 km
2 (250 m)	0.865	S	Detección de nubes a 250 m y 1 km
3 (500 m)	0.47	S	Humo, Detección de polvo
4 (500 m)	0.555	S	Detección de nieve/hielo
5 (500 m)	1.24	S	Humo, Detección de polvo
6 (500 m)	1.64	S	Detección de nieve/hielo Terra
7 (500 m)	2.13	S	Detección de nieve/hielo Aqua
8	0.415	S	Detección de nubes del desierto
9	0.443	S	Prueba de restauración de luz solar a cielo despejado
10	0.49	N	
11	0.531	N	
12	0.565	N	
13	0.653	N	
14	0.681	N	
15	0.75	N	
16	0.865	N	
17	0.905	S	Prueba de restauración de luz solar a cielo despejado
18	0.936	S	Prueba de restauración de luz solar a cielo despejado
19	0.94	N	
26	1.375	S	Cirrus, detección de nubes altas
20	3.75	S	Tierra, Prueba de restauración de luz solar a cielo despejado, nieve/hielo, detección de polvo
21/22	3.959	S	Detección de humo (21) /detección de nube (22)
23	4.05	N	
24	4.465	N	
25	4.515	N	
27	6.715	S	Nubes altas, detección de inversión
28	7.325	S	Nubes, detección de inversión
29	8.55	S	Nubes, polvo, detección de nieve
30	9.73	N	
31	11.03	S	Nubes, polvo, detección de nieve, tierra, Prueba de restauración de luz solar a cielo despejado, detección de inversión y cirrus
32	12.02	S	Nubes, detección de polvo
33	13.335	S	Detección de inversión
34	13.635	N	
35	13.935	S	Detección de nubes altas
36	14.232	N	

FUENTE: Ackerman, 2010.

El producto máscara de nubes esta creado en formato HDF y consiste de nueve objetos SDS. Siete de estos SDS son subconjuntos del producto de geolocalización MODIS, que incluyen latitud y longitud geodésico, ángulo azimut, entre otros. Estos han sido incluidos con propósitos de visualización. El SDS Cloud_mask contiene en realidad el producto Máscara de Nubes en una formación de 6 bytes o 48 bits (1 byte = 8 bits). Junto con información sobre la obstrucción en superficie, otros factores afectan la recuperación de la superficie y las nubes también se proporciona como información auxiliar, tales como sombras no terrestres y brillo solar. El SDS Quality_Assurance también se incluye y que proporciona información en la calidad del producto, probar la información de implementación, así como un registro de que conjunto de datos auxiliares fueron usados en la generación del producto para cada campo de visión individual (Strabala, 2008).

A continuación, se muestra la lista de SDS que contienen el producto Máscara de Nubes MODIS:

- Latitude

 - Descripción: Latitud geodésica

 - Dimensión: Celdas a lo largo de la franja de 5 km = 406, celdas a través de la franja de 5 km = 270

- Longitude

 - Descripción: Longitud geodésica

 - Dimensión: Celdas a lo largo de la franja de 5 km = 406, celdas a través de la franja de 5 km = 270

- Scan_Start_Time

 - Descripción: Hora atómica internacional al inicio del escaneo replicado en la franja

 - Dimensión: Celdas a lo largo de la franja de 5 km = 406, celdas a través de la franja de 5 km = 270

- Solar_Zenith

 - Descripción: Ángulo solar zenit, celda del sol

 - Dimensión: Celdas a lo largo de la franja de 5 km = 406, celdas a través de la franja de 5 km = 270

- Solar_Azimuth

 - Descripción: Ángulo solar azimut, celda del sol

Dimensión: Celdas a lo largo de la franja de 5 km = 406, celdas a través de la franja de 5 km = 270

- Sensor_Zenith

Descripción: Ángulo sensor zenit, celda del sensor

Dimensión: Celdas a lo largo de la franja de 5 km = 406, celdas a través de la franja de 5 km = 270

- Sensor_Azimuth

Descripción: Ángulo sensor azimut, celda del sensor

Dimensión: Celdas a lo largo de la franja de 5 km = 406, celdas a través de la franja de 5 km = 270

- Cloud_Mask

Descripción: Máscara de nubes y resultados de pruebas espectrales

Dimensión: 6 bytes, Celdas a lo largo de la franja de 1 km = 2030, celdas a través de la franja de 1 km = 1354

- Quality_Assurance

Descripción: Garantía de calidad para la máscara de nubes

Dimensión: 10 bytes, Celdas a lo largo de la franja de 1 km = 2030, celda a través de la franja de 1 km = 1354

Una descripción de bit a bit del SDS de Máscara de nubes (Cloud_Mask) del MODIS se muestra en la tabla 3.

Tabla 3: Especificaciones del SDS de la Máscara de nubes (Cloud_Mask) MODIS de 48 bits.

CAMPO BITS	DESCRIPCIÓN	RESULTADOS
0	Marca de máscara de nubes	0 = no determinado 1 = determinado
1 - 2	Marca de Sin obstáculos (UFOV, siglas en ingles)	00 = nublado 01 = probablemente nublado 10 = probablemente despejado 11 = despejado
Marcas de Ruta de Procesamiento		
3	Día/ Noche	0 = Noche / 1 = Día
4	Brillo solar	0 = Si / 1 = No
5	Fondo de Nieve/Hielo	0 = Si / 1 = No
6 - 7	Tierra/Agua	00 = Agua 10 = Costa 01 = Desierto 11 = Tierra

Continuación ...

Información Adicional		
8	No obstruido por nubes (aerosol pesado)	0 = Si / 1 = No
9	Cirrus detectado (solar)	0 = Si / 1 = No
10	Sombra encontrada	0 = Si / 1 = No
11	Cirrus detectado (infrarrojo)	0 = Si / 1 = No
12	adyacencia en la nube (nublado, prob. Nublado, más 1 pixel adyacente)	0 = Si / 1 = No
MARCA DE NUBE 1 km		
13	Prueba de umbral IR – nube simple	0 = Si / 1 = No
14	Prueba de umbral CO2 – nubes altas	0 = Si / 1 = No
15	Prueba 6.7 μm – nubes altas	0 = Si / 1 = No
16	Prueba 1.38 μm – nubes altas	0 = Si / 1 = No
17	Prueba 3.7-12 μm – nubes altas	0 = Si / 1 = No
18	Diferencia temperaturas IR – nubes	0 = Si / 1 = No
19	Prueba 3.9-11 μm – nubes	0 = Si / 1 = No
20	Prueba de reflectancia visible – nubes	0 = Si / 1 = No
21	Prueba de relación visible	0 = Si / 1 = No
22	Prueba de cielo despejado - NDVI en áreas costeras	0 = Si / 1 = No
23	Prueba 7.3-11 μm – nubes	0 = Si / 1 = No
Información Adicional		
24	Consistencia temporal – nubes	0 = Si / 1 = No
25	Consistencia espacial – nubes	0 = Si / 1 = No
26	Pruebas de restauración en cielo despejado	0 = Si / 1 = No
27	Pruebas de variabilidad en océano - noche	0 = Si / 1 = No
28	Polvo suspendido	0 = Si / 1 = No
29 - 31	Repuesto	
PRUEBAS VISIBLE – MARCA DE NUBE 250 m		
32	Elemento (1,1)	0 = Si / 1 = No
33	Elemento (1,2)	0 = Si / 1 = No
34	Elemento (1,3)	0 = Si / 1 = No
35	Elemento (1,4)	0 = Si / 1 = No
36	Elemento (2,1)	0 = Si / 1 = No
37	Elemento (2,2)	0 = Si / 1 = No
38	Elemento (2,3)	0 = Si / 1 = No
39	Elemento (2,4)	0 = Si / 1 = No
40	Elemento (3,1)	0 = Si / 1 = No
41	Elemento (3,2)	0 = Si / 1 = No
42	Elemento (3,3)	0 = Si / 1 = No
43	Elemento (3,4)	0 = Si / 1 = No
44	Elemento (4,1)	0 = Si / 1 = No
45	Elemento (4,2)	0 = Si / 1 = No
46	Elemento (4,3)	0 = Si / 1 = No
47	Elemento (4,4)	0 = Si / 1 = No

FUENTE: Ackerman, 2002

2.5.1. Descripción del Algoritmo

Para una mejor comprensión, la nomenclatura será la siguiente, denotaremos la reflectancia solar medido del satélite como R y la temperatura de brillo o radiancia infrarroja como BT . Los sufijos se refieren a la longitud de onda en la cual se hicieron la medición.

El algoritmo de la máscara de nubes MODIS identifica varios dominios de conceptos de acuerdo al tipo de superficie e iluminación solar, incluyendo tierra, agua, nieve/hielo, desierto y costa tanto para día y noche. Una vez que un pixel está asignado un dominio en particular (definir una ruta de algoritmo), una serie de pruebas de umbral intenta detectar la presencia de nubes o aerosol ópticamente grueso en el campo de visión (FOW, field of view en inglés) del instrumento. Estas pruebas devuelven o muestran un nivel de confianza indicando que el pixel está despejado (o claro) en un valor desde 1 (alta confianza de estar despejado) a 0 (muy baja confianza de estar despejado o alta confianza de estar nublado u otra obstrucción). Ackerman et al. (2010) provee detalles de cálculos de confianza para pruebas individuales espectrales. Existen varios tipos de pruebas, donde la detección de varias condiciones de nubes depende en los diferentes conjuntos de pruebas. Aquellos capaces de detectar similares condiciones de nubes son agrupados; sin embargo, pocas pruebas trabajan independientemente (Frey, 2008).

En muchos esquemas del enmascaramiento de las nubes, no todas las pruebas son independientes de las otras. Por ejemplo, en horas del día sobre océano, en regiones sin brillo solar. Si nubes estratocúmulos están presentes, la prueba de reflectancia visible, la prueba de relación de reflectancia y la diferencia de temperaturas de brillo entre 11 y 3.7 μm ($BT_{11} - BT_{3.7}$) lo detectarían. Estas mismas pruebas probablemente ignorarían la presencia de nubes cirrus, pero serian detectadas por la prueba ($BT_{11} - BT_{12}$). Cirrus muy delgados serian mejor detectadas por pruebas de 1.38 y 13.9 μm , pero estas dos pruebas tendrían dificultad en detectar nubes bajas (Ackerman, 2010). Debido a esta superposición en los diferentes tipos de pruebas de detección de nubes, cada prueba espectral se ubica en uno de los cinco grupos:

Grupo I – Prueba de umbral IR simple (detectar nubes altas y espesas)

$$BT_{11}, BT_{13.9}, BT_{6.7}, \text{Temperatura de Superficie}$$

Grupo II – Diferencia de temperatura de Brillo (detectar nubes delgadas)

$$BT_{8.6} - BT_{11}, BT_{11} - BT_{12}, BT_{7.3} - BT_{11}, BT_{11} - BT_{3.9}, BT_{8.6} - BT_{7.3}$$

Grupo III – Pruebas de reflectancia Solar (detectar nubes bajas)

$$R_{0.65} \text{ o } R_{0.86}, R_{0.86}/R_{0.65}$$

Grupo IV – Cirrus delgados NIR

$$R_{1.38}$$

Grupo V – Cirrus delgados IR

$$BT_{3.9} - BT_{12}$$

Como describe Ackerman et al. (2010), una confianza mínima se determina para cada grupo,

$$G_{i=1,5} = \min[F_i]$$

Donde F_i es el nivel de confianza de una prueba espectral individual. Luego, La máscara de nubes final (Q) se determina del producto de los resultados de cada grupo (G) en la siguiente ecuación (1);

$$Q = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N G_i} \dots \dots \dots (1)$$

Este enfoque sigue siendo conservativo para la estimación de cielo despejado. Si cualquier prueba tiene mucha confianza en que la escena sea nublado ($F_i = 0$), la máscara de nubes final es $Q = 0$.

Los cuatro niveles de confianza dentro de la máscara de nubes son: (1) completamente despejado o claro ($Q > 0.99$); (2) probablemente despejado ($Q > 0.95$), (3) probablemente nublado/incierto ($Q > 0.66$); y (4) nublado ($Q \leq 0.66$). Estos resultados constituyen los bits 1 y 2 de la máscara de nubes. Tener en cuenta que la confianza se da en la existencia de un pixel despejado o pixel claro y no la confianza en la presencia de un pixel nublado. Como tal, el resultado *nublado* puede ser etiquetado como *no claro* (alta confianza en una obstrucción en el campo de visión) (Frey, 2008).

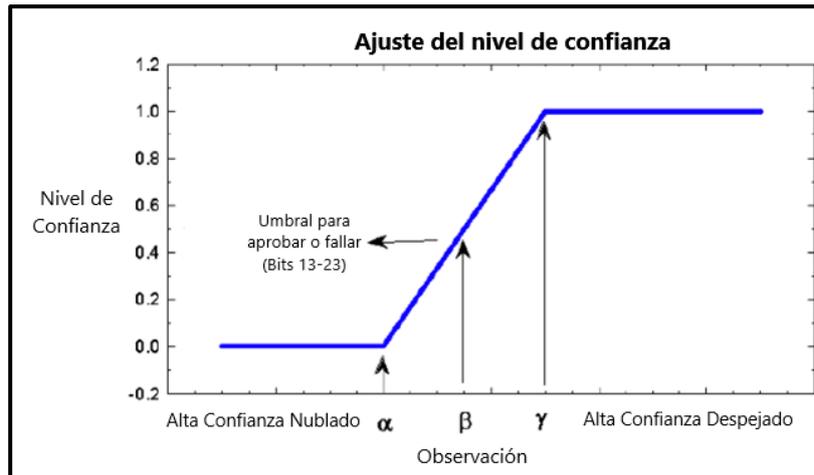


Figura 15. Representación gráfica de tres umbrales utilizados en la detección de nubes. γ , β y α dependerán de las pruebas que se realicen y establecer los niveles de confianza.
FUENTE: Ackerman (2010).

Para realizar una mejor comprensión y de forma resumida del producto máscara de nubes MODIS, los 48 bit que contiene incluyen información de resultados de pruebas individuales en nubes, rutas de procesamiento e información auxiliar (ejemplo, etiqueta de tierra/mar). Los primeros ocho bits proveen un resumen adecuado para muchas aplicaciones de procesamiento. Además, los primeros dos bits (bit 1 y 2) del producto resumen los resultados de todas las pruebas individuales clasificando la contaminación de la nube en cada pixel de datos como completamente despejado, probablemente despejado, probablemente nublado/incierto o nublado.

2.5.2. Interpretación de Bits

Un bit (binary digit = dígito binario) es la unidad fundamental o más pequeña de datos que se puede almacenar en un ordenador de un sistema binario; puede ser 0 o 1. Un bit representa el estado de un dispositivo que puede tomar uno de dos estados. Por ejemplo, un interruptor electrónico puede estar apagado o encendido. La convención es representar un estado como 1 y el otro estado como 0. Por lo que, un interruptor puede representar un bit o puede almacenar un bit de información.

Un solo bit no puede hacer una representación total de varios datos; si cada pieza de datos (carácter) pudiera representarse por un 1 o un 0, entonces solo se necesitaría un bit; sin embargo, se hace necesario almacenar números más grandes, textos, imágenes y otros tipos de datos; es aquí donde entra los patrones de bits. Este patrón, secuencia o cadena de bit está

formada por un número determinado de bits, ya sea 8, 10, 20 bits u otro número y es una combinación de ceros (0) y unos (1). Un ejemplo de patrón de bits:

1 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1

Un Byte es un patrón de bits con una cantidad de 8 bits por lo general. La Figura 16 muestra el esquema de un bit y un byte

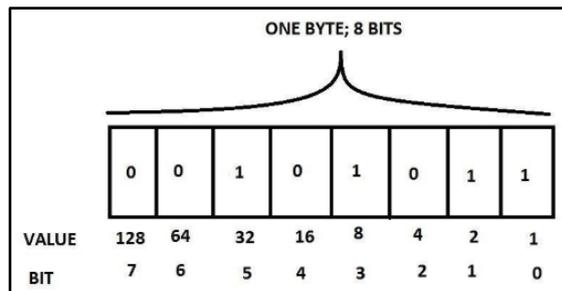


Figura 16. Representación de un Byte

El número de valores que puede ser representado por una serie de dígitos es x^n , donde x es el número de valores que cada dígito puede representar, y n es el número de dígitos usados. En una base binaria el número de valores (o combinaciones) será 2^n . Por ejemplo, para 5 bits tendremos 32 valores; para 8 bits, 256 valores; para 12 bits, 4096 valores, etc. En el caso del producto Mascara de Nubes se tienen 8 bits, esto quiere decir que la escala de grises se extiende desde 0 a 255, en total 256 valores.

2.6. Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos empleados para este estudio son:

2.6.1. Coeficiente de Correlación de Pearson (R)

Es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables cuantitativas relacionadas linealmente. Está limitado entre -1 y 1; que es, $-1 \leq R_{os} \leq +1$. Si $R_{os} = -1$, indica que hay una perfección por una asociación negativa lineal entre o (dato observado) y s (dato satelital). Similarmente si $R_{os} = +1$, indica que hay una perfección por una asociación positiva lineal (Rivadeneira, 2019).

$$R_{os} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \dots \dots \dots (2)$$

Donde: O = observado, S = satélite, \bar{O} = promedio del observado, \bar{S} = promedio del satélite.

2.6.2. Bias (B)

Conocido también como sesgo. Mide la relación entre los valores estimados y los valores reales. Si B es mayor que cero (0), indica que el evento fue pronosticado con mayor frecuencia que el observado o real, esto se conoce como sobreestimación. Si B es menor que cero (0), indica lo contrario, que el evento fue pronosticado con menos frecuencia que el observado y se denomina subestimación (Wilks, 2006).

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \dots \dots \dots (3)$$

2.6.3. Raíz Cuadrada Media del Error (RMSE)

Nos da la medida de las diferencias promedio entre el valor del observado O_i y el valor estimado por el satélite S_i . En otras palabras, es la raíz cuadrada de las diferencias individuales entre valores simulados y observados; cuantifica la precisión del modelo (Rivadeneira, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2 \dots \dots \dots (4)}$$

Donde: O_i es el valor observado, S_i es el valor estimado por satélite, N es el número de valores analizados.

III. METODOLOGÍA

3.1. Materiales

3.1.1. Zona de estudio

Perú está ubicado en la parte central y occidental de América del Sur entre los paralelos 0°2' y los 18°21'34" de latitud sur y los meridianos 68°39'7" y 81°20'13" de longitud oeste. Su territorio limita con países como Ecuador, Colombia, Brasil, Bolivia y Chile, y tiene una extensión geográfica que alcanza 1'285,215.60 km². Además, se encuentra determinado por la presencia de la Cordillera de los Andes que atraviesa el territorio de norte a sur configurando, tanto el clima como la geografía, con tres áreas claramente diferenciadas: Costa, Sierra y Selva. Asimismo, tres son las cuencas hidrográficas que se encuentran en el territorio peruano: la cuenca hidrográfica del Pacífico, del Amazona y del Lago Titicaca.



Figura 17. Mapa Político del Perú.

3.1.2. Información Satelital

En esta investigación se utilizó el producto satelital Máscara de Nubes MODIS (MODIS Cloud Mask, mejor conocido en inglés) que es un producto generado en Nivel 2 a resoluciones espaciales de 1 km y 250 m (en nadir). El algoritmo emplea una serie de umbrales visibles e infrarrojos y pruebas de consistencia para especificar la confianza de que se observa un lugar (o vista) sin obstrucciones de la superficie de la Tierra.

Se trabajó con los dos archivos de datos del producto Mascara de Nubes MODIS: MOD35_L2 que contiene los datos recopilados del satélite Terra, y MYD35_L2 que contiene datos recopilados del satélite Aqua a una resolución espacial de 1 km y un intervalo de tiempo de captación de 5 min.

3.1.3. Información Meteorológica

- Se recopiló información de la variable cobertura nubosa en 10 estaciones meteorológicas aeronáuticas (ver Anexo 1) en el periodo 2005 al 2018.
- Se utilizó la información de Reanalysis y climatología mensual del NCEP – NCAR para el periodo 2002 – 2018 para las variables de temperatura, humedad relativa, viento, presión, temperatura superficial del mar y radiación de onda larga.

3.1.4. Herramientas

Se utilizaron las siguientes herramientas para el procesamiento de imágenes y realizar el análisis:

- HP Z6 G4 Workststation, procesador Intel Xeon Gold 6144, 96 Gb de memoria RAM
- Disco duro externo de 4 TB
- Lenguaje de Programación R versión 3.6
- ArcMap versión 10.3
- Microsoft Office

3.2. Métodos

Se descargó los archivos del producto Máscara de Nubes MODIS para ambos satélites de la plataforma web LAADS DAAC que pertenece a la NASA como se ve en la Figura 18 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>) desde enero de 2002 hasta diciembre de 2018 para el caso del satélite Terra, y desde julio de 2002 hasta diciembre de 2018 para el

caso del satélite Aqua. Esto se debe a que el satélite Aqua se lanzó en mayo de 2002 y se obtuvo la primera imagen a partir de junio del mismo año.

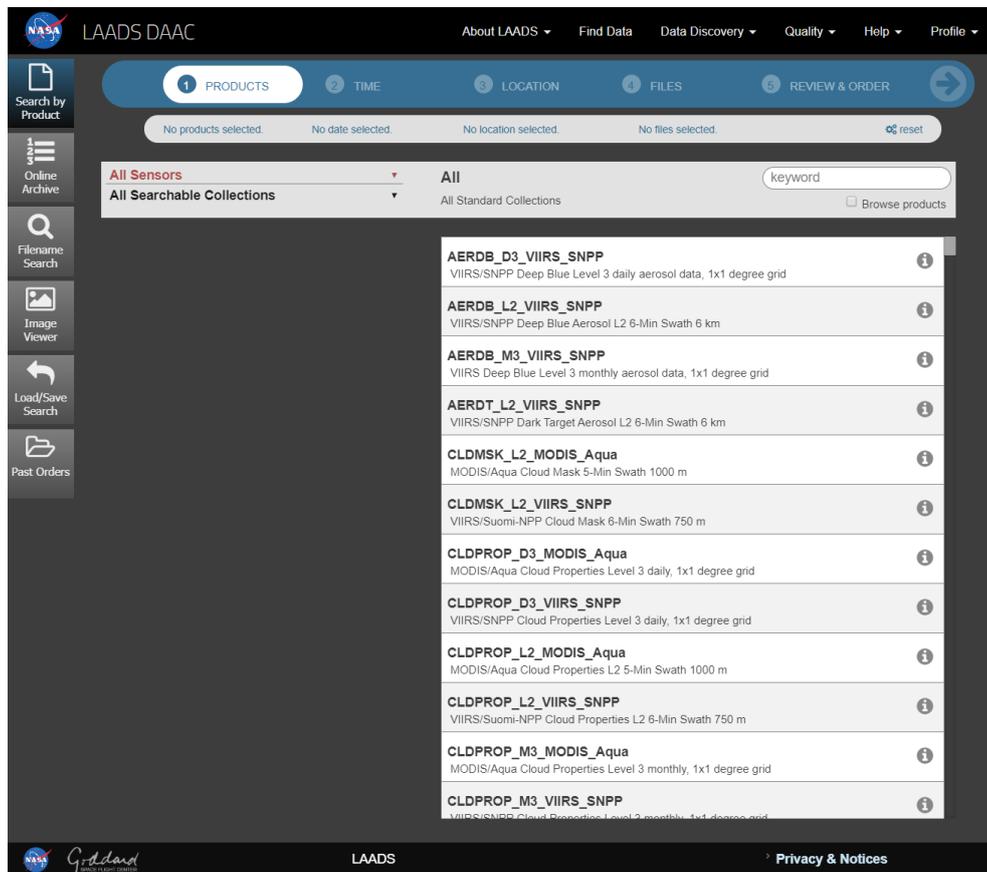


Figura 18. Plataforma Web LAADS DAAC de la NASA

Sobre la plataforma web, en la opción Products se seleccionó los productos MOD35_L2 y MYD35_L2, ambos por separado para una facilidad de descarga; en la opción Time se seleccionó el periodo de tiempo que se desea evaluar y descargar.

En la opción Location que se refiere a la ubicación se seleccionó dos cuadros o cuadrantes (tiles) que lleguen a cubrir el territorio peruano. Estos fueron el h10v9 y el h11v10, no se seleccionó un tercer cuadro (h10v10) debido a que observaba lo mismo que los otros dos cuadros, por lo que no hubo necesidad de seleccionarlo. En la Figura 19 se muestra el procedimiento que se indicó anteriormente.

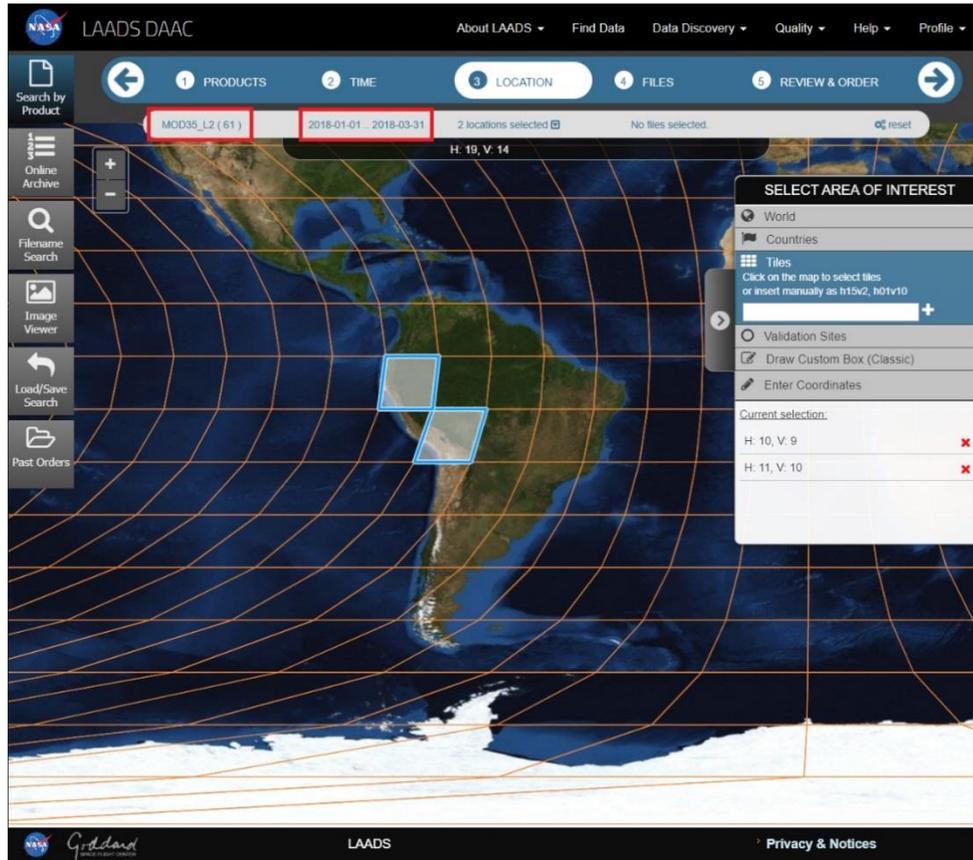


Figura 19. Ubicación de Perú en la organización de productos del MODIS en tiles.

Se tuvo en cuenta lo siguiente, la máxima cantidad que permite la plataforma para descargar son de 2000 imágenes. Al ser un periodo largo de casi 17 años, se hizo varias solicitudes de descarga para cada producto, siguiendo las instrucciones que la misma plataforma indica para poder descargar si se realiza un pedido con una cantidad grande de imágenes.

3.2.1. Metodología para determinar la cobertura nubosa promedio en porcentaje a nivel mensual usando el producto Máscara de Nubes MODIS.

Consistió en extraer el SDS Cloud_Mask que contiene la información con respecto a la cobertura nubosa, que es el punto principal y mayor importancia de este producto. Para cumplir con el primer objetivo de la investigación se hizo lo siguiente:

- 1) Las imágenes o productos del sensor MODIS están en proyección sinusoidal. Estas imágenes descargadas fueron reproyectadas a la proyección Geográfica Lat/Lon o más conocido como WGS84 que permitió una mejor visualización de la imagen. A cada pixel en la Máscara de Nubes se le asignó un código de 48 bits, pero el propósito de esta investigación es usar los tres primeros bits del primer byte que son los más importantes y relevantes (ver tabla 4). El indicador Máscara de nubes (bit 0) indica si el algoritmo ha

sido aplicado para un pixel o no. El indicador UFOV contiene los bits de los niveles de confianza sobre tener cielo despejado, estos niveles de confianza se traducen a probabilidades en porcentaje (%) que indican si un pixel se determinó despejado o nublado. Los valores de probabilidad usados para estos niveles de confianza son los cuatro umbrales que se describen en la tabla 4: (0), (1), (2) y (3) representan el 0%, 66%, 95% y 99% de confianza de que un pixel podría estar libre de nubes respectivamente (Armitage, 2013).

Tabla 4: Descripción de los primeros tres bits del primer byte del SDS Cloud_Mask.

Bits	Descripción del Campo	Interpretación
0	Indicador Máscara de nubes	0 = No Determinado 1 = Determinado
1-2	Indicador Campo de Visión sin Obstrucciones (UFOV, siglas en ingles)	00 = Nublado (0) 01 = Probablemente Nublado (1) 10 = Probablemente Despejado (2) 11 = Despejado (3)

Para poder manipular los archivos del sensor MODIS en formato HDF se usó la herramienta GDAL (Geospatial Data Abstraction Library en inglés). GDAL es un conjunto de herramientas de abstracción de datos geoespaciales que permite trabajar con el tratamiento de Datos Geoespaciales ya sea datos en formato ráster y vectoriales, es libre y son de código abierto. Funciona prácticamente en todos los sistemas operativos; además, funciona en diferentes lenguajes de programación. En esta investigación se usó el lenguaje R que es de libre acceso.

- 2) Para poder usar el GDAL con lenguaje R se utilizó la librería “gdalUtils”. Esta librería viene a ser los contenedores para las herramientas o utilidades del GDAL y las funciones para las que se usaron fueron: i) mostrar los SDS’s que posee los archivos en formato HDF y seleccionar el (los) SDS(s) de interés, ii) la reproyección de las imágenes, iii) convertir los datos ráster en otro formato diferente y iv) recortar sobre el área de interés. En el Anexo 4 se muestra el código de procesamiento que se hizo en lenguaje R para procesar las imágenes satelitales del sensor MODIS

Si se quiere ver a mayor detalle sobre otras funciones de la librería “gdalUtils”, revisar la página web <https://www.rdocumentation.org/packages/gdalUtils/versions/2.0.3>

- 3) Luego, para realizar el promedio de las imágenes agrupadas mensualmente y dentro de las horas de paso por Perú, se utilizó la herramienta del software ArcGis llamado “Estadísticas de celdas” o “Cell Statistics” en inglés. Esta herramienta calcula una estadística de rásteres múltiples. Realiza varios cálculos estadísticos, pero se escogió la opción promedio.

Para poder usar esta herramienta en ArcGis se tuvo que convertir todos los archivos de formato “HDF” a formato “TIF”. Este tipo de formato ráster hace que la imagen satelital se convierta en una matriz y permite manipular, cambiar, extraer entre otras cosas, los datos almacenados en la imagen satelital.

3.2.2. Metodología para determinar la influencia de los sistemas meteorológicos a nivel sinóptico mensual en el periodo 2002 – 2018 que favorecen la nubosidad en Perú.

Para observar de manera espacial como los sistemas meteorológicos intervienen en la nubosidad de Perú, se usó ciertas variables que proporciona el reanalysis NCEP-NCAR para diferentes niveles isobáricos usando el lenguaje de programación R, que permite manipular y procesar este tipo de información con su respectivo formato de almacenamiento (Castillo, 2018). Estas variables muestran el comportamiento de estos sistemas a nivel promedio mensual y se ven a continuación:

a. Análisis en niveles bajos de la atmósfera

El análisis en niveles bajos se realizó al nivel aproximado de superficie (~1000 hPa) o en 850 hPa. Se evaluó el comportamiento espacial y temporal de la presión atmosférica a nivel del mar, temperatura, humedad y Radiación de onda larga.

- Análisis de temperatura del aire

Este análisis indica campos de isoterma que tienen contrastes térmicos (°C) que constituye el límite entre dos tipos de masas de aire.

- Análisis de humedad relativa

Permite conocer que áreas tienen mayores valores de humedad y pueden provocar la formación de nubes.

- Análisis de viento

Este análisis permite conocer el comportamiento del viento (m/s) sobre la advección del aire hacia otras partes del continente que influyan o provoquen la formación de nubes.

- Análisis de presión atmosférica

Permite identificar sistemas anticiclónicos o ciclónicos y el gradiente isobárico que hay entre estos campos. Además, este gradiente permite identificar las zonas de influencia del viento, al estar juntas estas líneas indica mayor intensidad del flujo de vientos, lo opuesto significaría menor intensidad del viento.

- Análisis de Radiación de onda larga

Este análisis permite indicar zonas donde hay bajos y altos niveles de Radiación de onda larga, ya que está influenciado por la presencia de nubes y afecta el balance de Radiación del planeta Tierra.

- b. Análisis en niveles medios y altos de la atmósfera

Se analizó los flujos de vientos y humedad relativa en los niveles isobáricos de 500 y 200 o 300 hPa que corresponden a niveles medios y niveles altos, respectivamente. Permitió visualizar el comportamiento respectivo en niveles bajos de las circulaciones de las masas de aires, y diferenciarlas entre masas de gran saturación y mínima saturación que puedan provocar, tanto la formación o crecimiento de las nubes y genere cobertura nubosa, como su disminución o inhibición de estas (Castillo, 2018).

3.2.3. Metodología para validar los resultados del producto Máscara de Nubes con datos reales de estaciones meteorológicas

Consistió en validar la información de nubosidad estimada por ambos satélites, Terra y Aqua, sobre el área de estudio que es todo el Perú con datos registrados de estaciones meteorológicas de superficie como las aeronáuticas (informes meteorológicos METAR) y en el periodo establecido del 2002 – 2018.

El análisis se hace para las estaciones meteorológicas aeronáuticas en superficie que registran cobertura nubosa con categorías clasificadas en octantes (términos de cielo nublado) durante todo el año. Las imágenes satelitales registran la cobertura nubosa en porcentaje en términos de cielo despejado, por lo que es necesario el cambio de término para

las estaciones meteorológicas que vendría ser la inversa. Para esto, se invierte los valores de las estaciones meteorológicas aeronáuticas de cobertura nubosa.

En la tabla 5 se muestra la equivalencia de la clasificación de la cobertura nubosa en categorías y en (%) de cielo nublado y cielo despejado. Como la cobertura nubosa registrada por las estaciones meteorológicas se registra por categorías y no en valores, se establece un valor promedio del rango que determina esa categoría y en términos de cielo despejado para realizar la validación. Esto significa que, SKC, FEW, SCT, BKN y OVC representan el 100, 81, 56, 25 y 0% de probabilidad de cielo despejado (tabla 5).

Tabla 5: Cobertura nubosa clasificada en categorías y su equivalencia en términos de cielo nublado y cielo despejado

Categoría	Cielo nublado		Cielo despejado	
	octas	%	%	% (promedio)
SKC	0	0	100	100
FEW	1	12.5	87.5	81
	2	25	75	
SCT	3	37.5	62.5	56
	4	50	50	
BKN	5	62.5	37.5	25
	6	75	25	
	7	87.5	12.5	
OVC	8	100	0	0

Para la validación de la nubosidad estimada del satélite y de la estación meteorológica aeronáutica, se extrajo los valores de probabilidad de tener cielo despejado en cada coordenada que corresponde a una estación aeronáutica mediante el método punto-pixel para cada mes del año. Esto quiere decir que el resultado final que se obtuvo en base al primer objetivo que se trata de un promedio mensual en un rango horario de un periodo de años, se extrae los valores que corresponde a la ubicación de las estaciones aeronáuticas y se evaluaron los parámetros estadísticos.

Los parámetros estadísticos argumentados en el marco teórico 2.6 se evaluaron de la siguiente forma:

Coefficiente de correlación de Pearson (R): Ayuda a determinar, como primer paso, la relación entre las variables. Un valor mayor a cero que se acerque a uno (1) da como resultado una relación perfecta positiva entre la información satelital y la información de la

estación meteorológica aeronáutica; y si el valor es menor a cero que se acerque a -1 indica lo contrario, relación perfecta negativa.

La probabilidad del error para esta investigación está determinada con un 5 por ciento, siendo un umbral convencional. El número de muestras “n” depende de la cantidad de datos, debido a que se trabajó con promedios mensuales de cobertura nubosa para un periodo de años (2002-2018), por lo que el valor de “n” fue 12 por la cantidad de meses. Entonces se establece que el valor de R calculado debe ser mayor a 0.80 para que sea significativo con un nivel de confianza del 95 por ciento (Rivadeneira, 2019).

Bías o sesgo (B): Valores cercanos a cero indican que los valores estimados por la imagen satelital son perfectos y lejos de este valor, ya sea positivo o negativo, indican sobreestimación o subestimación respectivamente, además que es sensible a valores lejanos o extremos.

RMSE: No hay un umbral que defina su significancia estadística por lo que dependerá del rango de sus datos. Los valores más bajos o cercanos a cero de este parámetro indican un mejor ajuste o se consigue un menor error en las estimaciones de cobertura nubosa, en otras palabras, indican cuan cerca están los puntos de datos observados con los valores estimados por el producto satelital.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Determinar la cobertura nubosa promedio en porcentaje de cielo despejado a nivel mensual usando el producto Máscara de Nubes del sensor MODIS

Para esta sección, el análisis se hace en cada estación del año, cada tres meses, para ver cómo es el comportamiento o evolución de la cobertura nubosa en el territorio peruano, pero los resultados se muestran para cada mes en dos rangos horarios promediados: 10 – 11 am y 1 – 2 pm.

4.1.1. Análisis para la estación de verano

Para el mes de enero se observa en la Figura 20, en ambos rangos horarios, una cobertura nubosa muy notoria en casi todo el territorio peruano. Esto quiere decir que hay un bajo porcentaje de encontrar cielo despejado tanto en la Sierra como en la Selva de Perú. La Cordillera de los Andes favorece la formación de las nubes por orografía, donde la parte occidental de la Cordillera es la más alta y que actúa como una muralla o barrera que impide el traslado de las nubes de la Selva hacia la Costa. Este bloqueo provoca el ascenso forzoso del aire permitiendo que se formen las nubes y haya cobertura nubosa, por ende, se obtenga porcentajes por debajo del 19% de tener cielo despejado. Así mismo; durante este mes, en la Selva se forman los sistemas convectivos que se traducen como nubes verticales grandes que se forman por convección y que provocan una probabilidad por debajo del 31% de tener cielo despejado.

Para el mes de febrero (ver Anexo 2), se observa que la cobertura nubosa se incrementa en casi toda la Sierra y Selva de Perú en ambos rangos horarios. Se sabe que en este mes la formación de nubes se incrementa, ya que se emiten muchas alarmas sobre desastres naturales que ocurren en estas regiones. Se observa que la cobertura nubosa es alta en varias áreas del territorio peruano y se obtiene una probabilidad por debajo de 14% de tener cielo despejado. Para la Costa, (ver Anexo 2) se observa que el porcentaje de cielo despejado disminuye ligeramente en la zona Sur y poca disminución en la zona Centro; sin embargo, en la zona Norte el porcentaje de tener cielo despejado es bajo a comparación de las otras

dos zonas. Esto se debe a que la altitud de la cordillera en la zona Norte es menor en comparación con la zona Centro y Sur, provocando que las nubes crucen y la cobertura nubosa se incremente. Esto sucede también en la Costa zona Centro y Sur, pero con muy poca menor frecuencia.

Para el mes de marzo, (ver Anexo 2) las condiciones de cobertura nubosa se mantienen en el rango de 10 – 11 am y una variación en el rango de 1 – 2 pm en casi todo el Perú. La probabilidad de tener cielo despejado se mantiene por debajo de 16% tanto en casi toda la Selva como en la Sierra zona Norte y Centro. En la Sierra zona Sur se tiene grandes elevaciones por la cordillera y mesetas que son llanuras elevadas respecto al nivel del mar. Esto en cierta forma provoca que la cobertura nubosa sea poca y la probabilidad de tener cielo despejado sea de 42% a 72%, mayor a comparación de las otras dos zonas de la Sierra. En casi toda la Costa disminuye ligeramente la probabilidad de encontrar cielo despejado con una diferencia marcada en la zona sur de esta región de tener más del 78% de probabilidad.

Algo que caracteriza a la estación de verano, que comprende los primeros tres meses, es que aumenta la cantidad de nubes en la región Sierra y Selva. En estas dos regiones, los mecanismos de formación de nubes como la convección y el ascenso orográfico ocurren con mayor frecuencia e intensidad que generan una gran cobertura nubosa en estas regiones, y afectan de cierta forma a la región Costa cuando llegan a traspasar la Cordillera de los Andes.

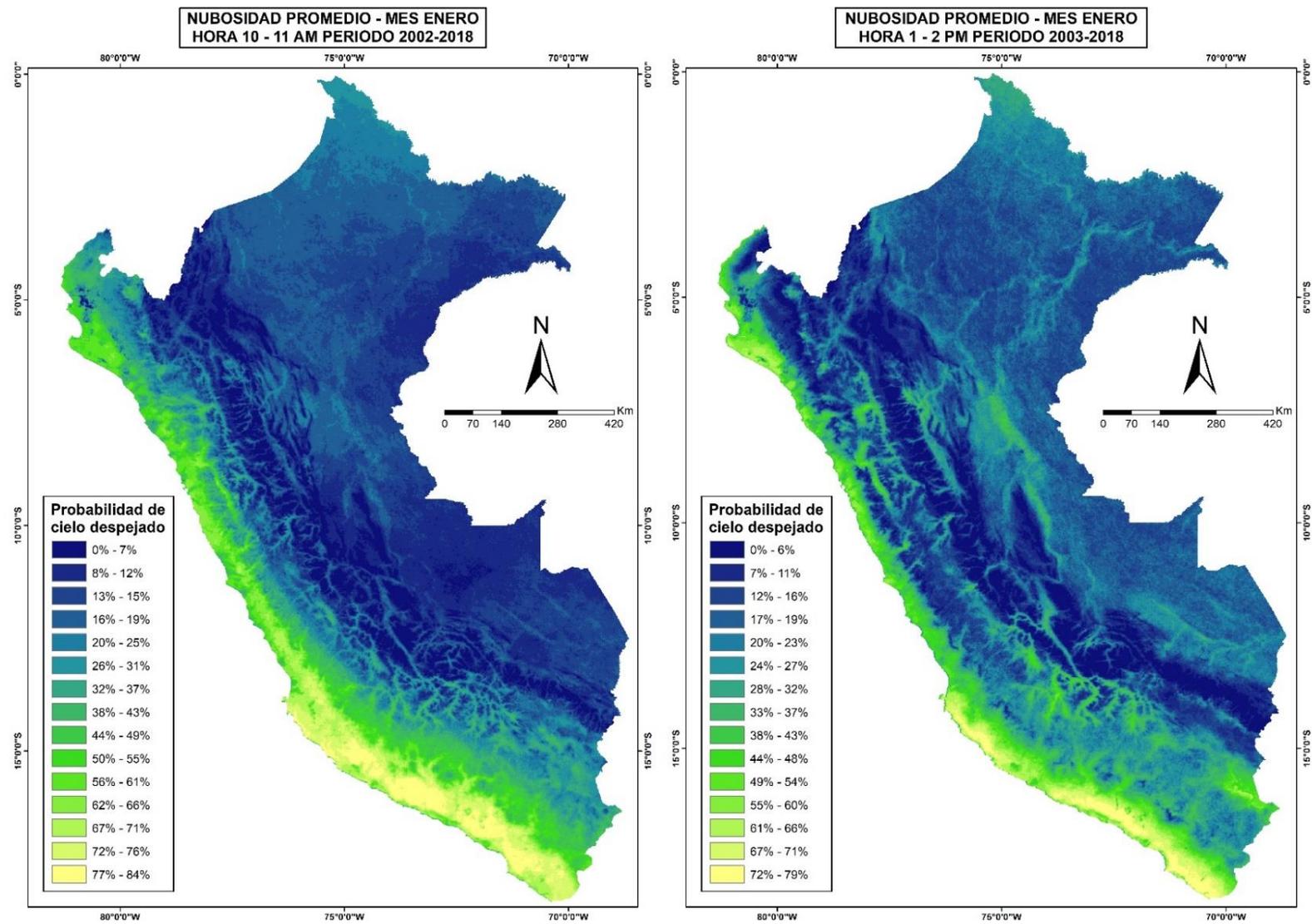


Figura 20. Cobertura nubosa promedio en términos de cielo despejado para todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de enero.

4.1.2. Análisis para la estación de otoño

Para el mes de abril, en ambos rangos horarios (ver Figura 21) se observa que el porcentaje de tener cielo despejado empieza a aumentar; en otras palabras, la formación de nubes empieza a disminuir ya sea por actividad convectiva o por orografía en casi todo el Perú y se tiene menos cobertura nubosa. En la Costa, zona Norte y Centro se observa que el probabilidad de tener cielo despejado aumenta y en la zona Sur, la probabilidad de tener cielo despejado es mayor a 74%. En la región Sierra, se disminuye las áreas que son afectadas por la cobertura nubosa y en otras, la probabilidad de tener cielo despejado se mantiene muy bajo. En la Selva zona Centro y Sur, la probabilidad de tener cielo despejado ha aumentado (hasta un 42% en el primer rango horario y 66% para el segundo rango horario), pero en la zona Norte aún, en ciertas áreas, se mantiene con una probabilidad menor al 24% de tener cielo despejado.

Para el mes de mayo (ver Anexo 2) se observa en ambos rangos horarios que, la cobertura nubosa empieza a disminuir y la probabilidad de tener cielo despejado incrementa en la región Selva excepto en la zona norte, lo mismo sucede para la región Sierra, pero con mayor magnitud en la zona Sur. En esta zona, la cobertura nubosa tiene una mayor disminución a comparación de las otras zonas y la probabilidad de tener cielo despejado es mayor al 58% al igual que en la parte occidental de la Cordillera de los Andes. Por otro lado, en el litoral de la región Costa se observa que la cobertura nubosa se incrementa dando entender que las condiciones climáticas están cambiando.

Para el mes de junio, en ambos rangos horarios (ver Anexo 2) se observa que hay una variación diferente en la cobertura nubosa en todo el Perú. Casi toda la zona sur de Perú (con mayor resalte en la región Sierra), a excepción de la región Costa, hay una baja cobertura nubosa, lo que significa una alta probabilidad de encontrar cielo despejado superior al 74%. Esta misma condición se establece para la parte occidental de la Cordillera. En la región Selva, la cobertura nubosa sigue disminuyendo en la zona Centro y en cierta forma la zona norte. En esta zona se tiene áreas dispersas que empieza a aumentar la probabilidad de tener cielo despejado entre 23% al 39% pero con cobertura nubosa resaltante en el extremo norte de la región Selva. En la región Sierra se observa una variación notoria de la cobertura nubosa que disminuye y la probabilidad de tener cielo despejado aumenta tanto en la zona Norte como Centro. Lo contrario sucede para la región Costa, la cobertura nubosa aumenta en casi toda la región lo que hace notar el inicio de la temporada de invierno.

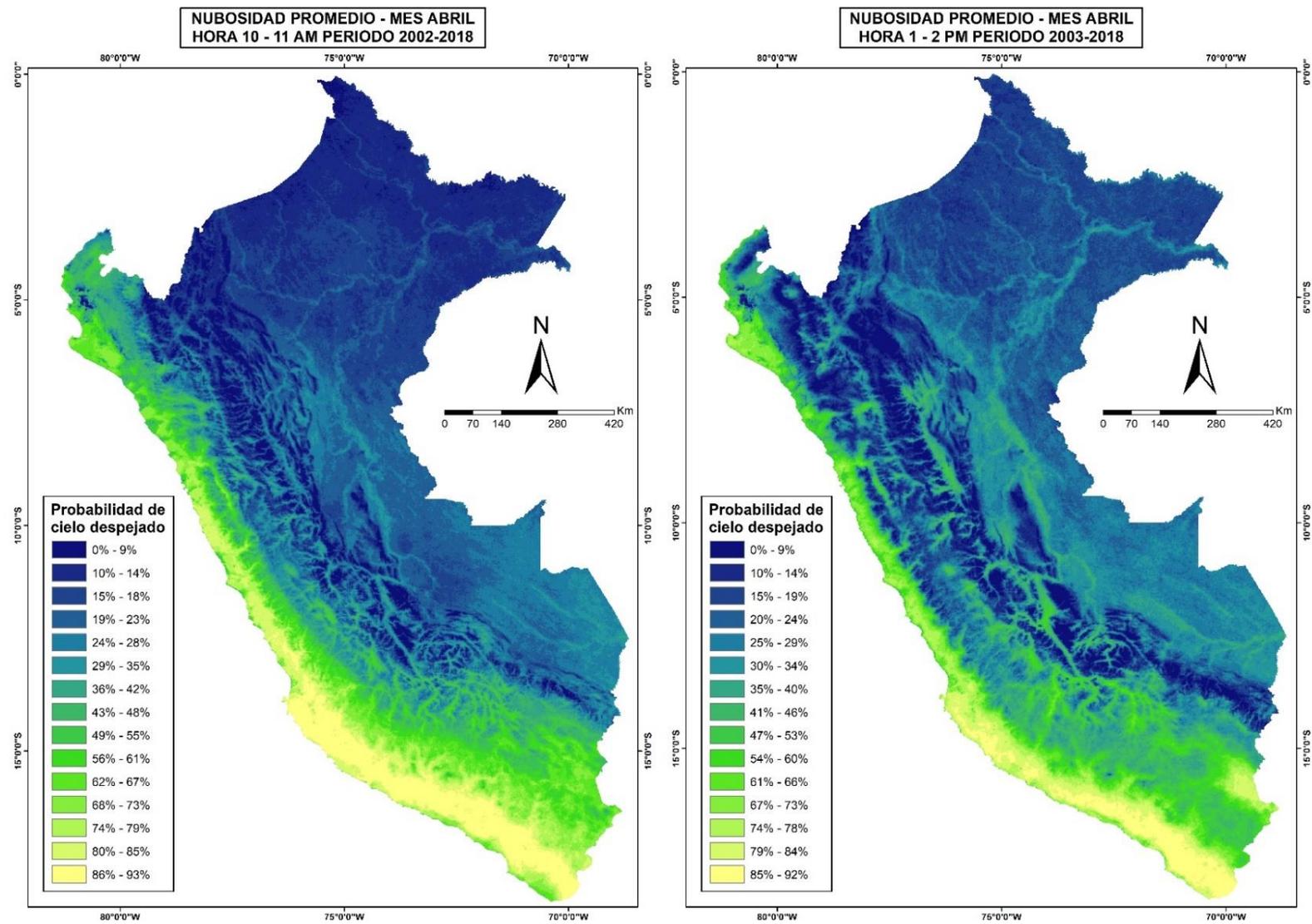


Figura 21. Cobertura nubosa en promedio en términos de cielo despejado para todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de abril.

4.1.3. Análisis para la estación de invierno

Para el mes de julio (ver Figura 22) se observa que se tiene más áreas donde la cobertura nubosa sigue disminuyendo y, por ende, la probabilidad de tener cielo despejado aumenta. Esto se ve en la región Sierra zona Norte y Centro, con mayor resalte en la zona Sur que tiene una probabilidad mayor al 71% y casi toda la parte occidental de la Cordillera de los Andes. Sucede lo mismo para la región Selva, la cobertura nubosa es menor en la zona Centro y Sur con una probabilidad aproximada del 58% al 65% de tener cielo despejado, pero en la zona Norte la cobertura nubosa aún se mantiene en ciertas áreas. Todo lo opuesto sucede en la región Costa, la cobertura nubosa se intensifica en casi toda la región con una probabilidad menor al 19% de tener cielo despejado. Esto denota el inicio de la temporada de invierno que caracteriza la presencia de nubes en esta región.

En el mes de agosto, (ver Anexo 2) se observa que la cobertura nubosa en el rango horario de 10 – 11 am disminuye en casi toda la región Selva con una probabilidad aproximada de 67% al 72% de tener cielo despejado en la zona Centro y Sur, además de la parte occidental de los Andes. Esto sucede lo mismo para el otro rango horario, pero con una menor probabilidad. En la región Sierra, se observa que, para ambos rangos horarios, la cobertura nubosa se mantiene y que en ciertas áreas aumenta ligeramente su cobertura nubosa como en la zona Norte y Centro; en la zona Sur aún mantiene la probabilidad mayor al 72% de tener cielo despejado. Por otro lado, las condiciones sobre cobertura nubosa para la región Costa se mantiene con respecto al mes anterior, desde la zona Norte hasta el Sur con una probabilidad menor al 42% de tener cielo despejado en el primer rango horario, en el segundo horario la probabilidad de tener cielo despejado aumenta en ciertas áreas.

En el mes de setiembre, se observa de forma general para la región Sierra y Selva que la cobertura nubosa empieza a aumentar para ambos rangos horarios (ver Anexo 2). En la región Selva, las áreas dispersas que tenían poca cobertura nubosa empieza a incrementarse con mayor énfasis en el segundo rango horario. Para la región Sierra, en la zona Norte y Centro se observa como la cobertura nubosa empieza a aumentar, así como en la zona Sur donde el cielo está más despejado a comparación de las otras, también empieza a aumentar en ciertas áreas. Hay una probabilidad máxima aproximada de 85% de tener cielo despejado en esa zona. Para la región Costa, se mantiene la probabilidad con respecto al mes anterior de tener cielo despejado que es menor del 40%, pero la extensión que afecta la cobertura nubosa empieza a disminuir.

Esta estación del año se caracteriza por no presentarse muchos desastres naturales debido a la poca formación nubosa que se presenta al inicio de ésta y por ende poca cobertura nubosa. Esto sucede en un lado de la cordillera, por el otro lado sucede lo contrario, por lo que la cordillera de los Andes genera una influencia notoria sobre la cobertura nubosa en el Perú.

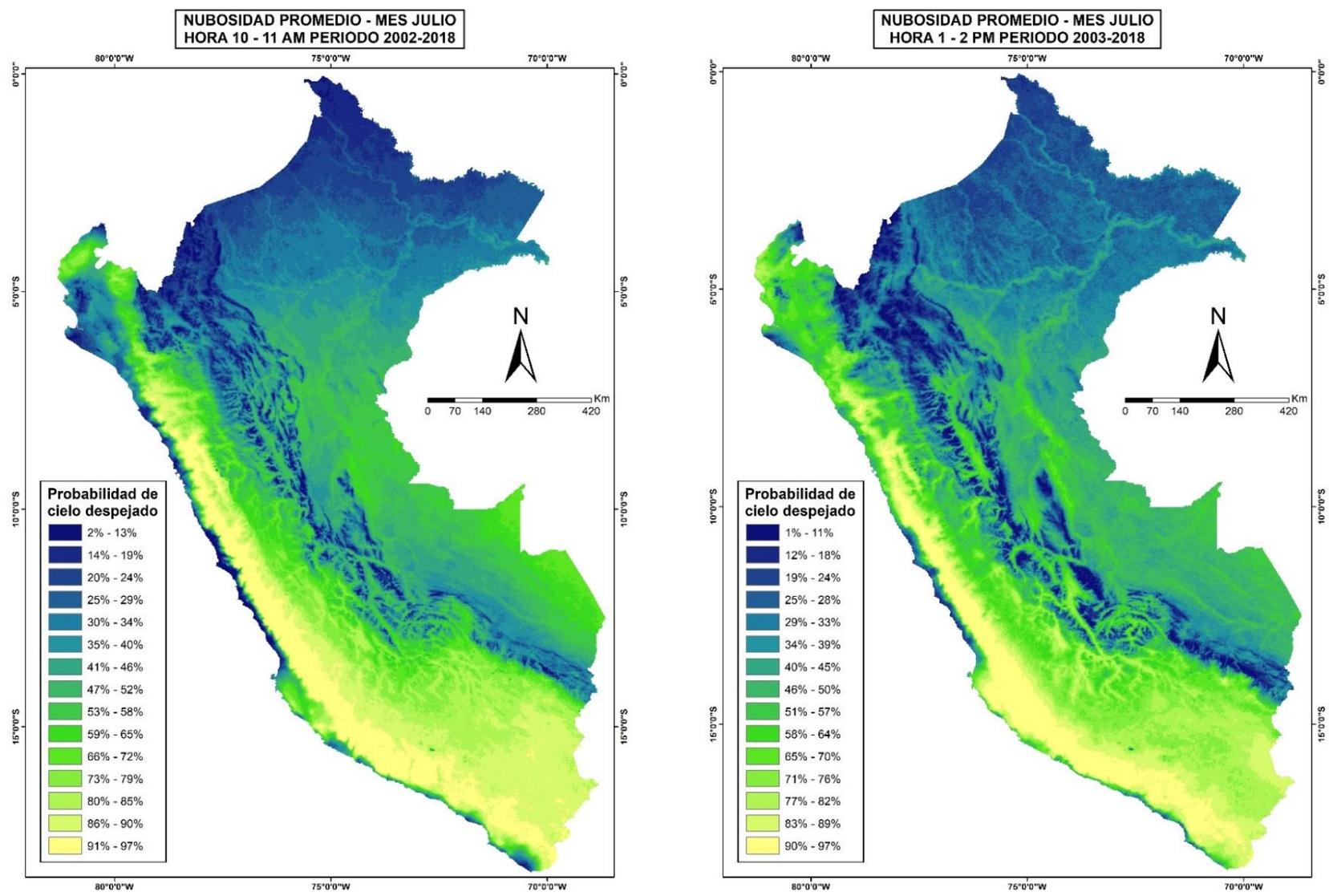


Figura 22. Cobertura nubosa promedio en términos de cielo despejado para todo en todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de julio.

4.1.4. Análisis para la estación de primavera

En el mes de octubre, se observa claramente que, en ambas imágenes de la Figura 23, el inicio de cómo la cobertura de nubes empieza a aumentar en toda la región Selva, las tres zonas, así como en la región Sierra, zona Norte y Centro, la parte oriental de los Andes; en la zona sur, la cobertura nubosa también disminuye, pero la probabilidad de tener cielo despejado es mayor comparado a las otras dos zonas con un valor no mayor al 67%. En la región Costa, se observa una disminución de la cobertura nubosa en su extensión, pero en el litoral, en algunas zonas, aún se observa una cobertura nubosa notoria con probabilidad menor al 25% de tener cielo despejado. En el segundo rango horario, se observa una menor cobertura nubosa con respecto al primer rango horario.

En el mes de noviembre se observa que, en ambos rangos horarios (ver Anexo 2), la cobertura nubosa se incrementa en toda la región Selva, en sus tres zonas donde la probabilidad está por debajo del 35% de tener cielo despejado. En la región Sierra, la zona Norte y Centro también se incrementó la cobertura nubosa con una probabilidad por debajo del 48% de cielo despejado; en la zona Sur de la región Sierra, al ser una zona más despejada que las otras también aumenta su cobertura nubosa por lo que disminuye su probabilidad de tener cielo despejado. En la región Costa, se sigue observando el mismo patrón visto en el mes anterior donde la cobertura de nubes disminuye en casi toda la región y la probabilidad de tener cielo despejado aumenta hasta un 48% aproximadamente.

Para el mes de diciembre (ver Anexo 2) se observa en ambos rangos horarios, que la cobertura nubosa sigue incrementándose en casi toda la región Selva y Sierra en las tres zonas donde la probabilidad de encontrar cielo despejado es menor al 21% y 47% respectivamente. Este aumento se debe a que en la región Selva, el proceso de convección para formar nubes se está incrementando, así mismo, el proceso por ascenso orográfico este formando nubes en la región Sierra. Por otro lado, en casi toda la región Costa se observa que la cobertura nubosa disminuye y la probabilidad de tener cielo despejado aumente entre 50% al 70% aproximadamente.

En esta estación del año, se observa que la formación de nubes empieza aumentar de forma considerable, principalmente en la región Sierra y Selva; y en la región Costa disminuye de una manera ligera la cobertura de nubes. Esto da a entender que existe una especie de ciclo de vida de la cobertura de nubes en cada estación del año, para cada región y zona del Perú.

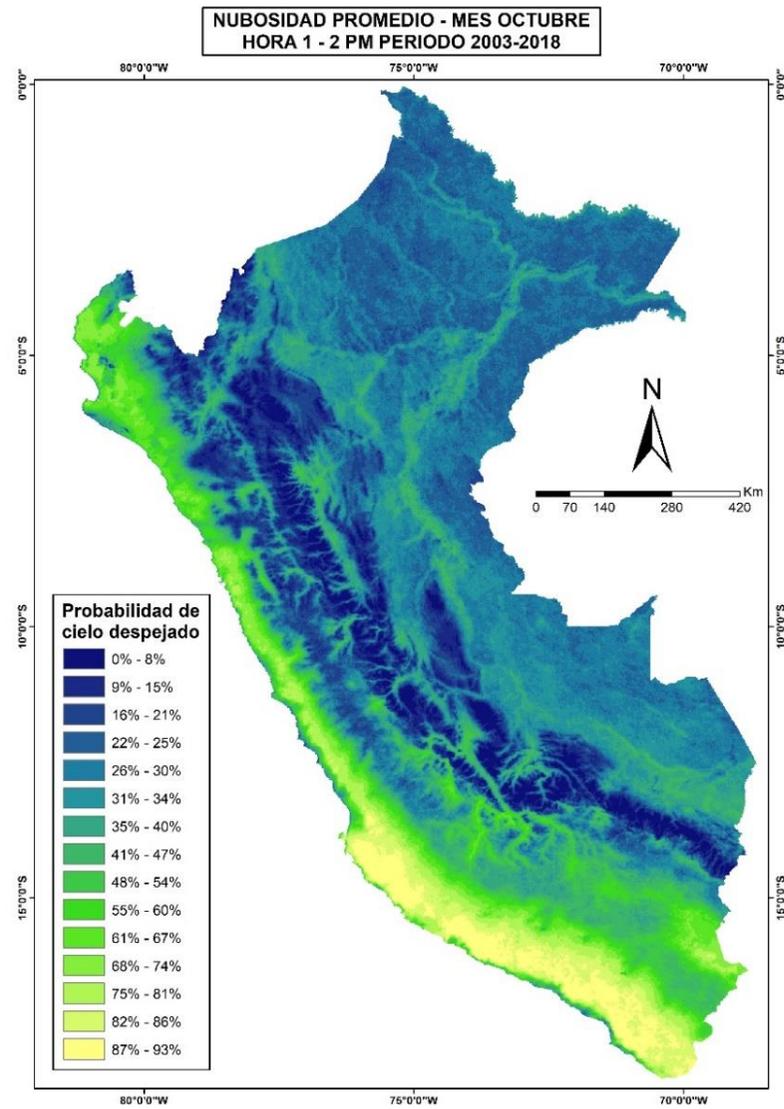
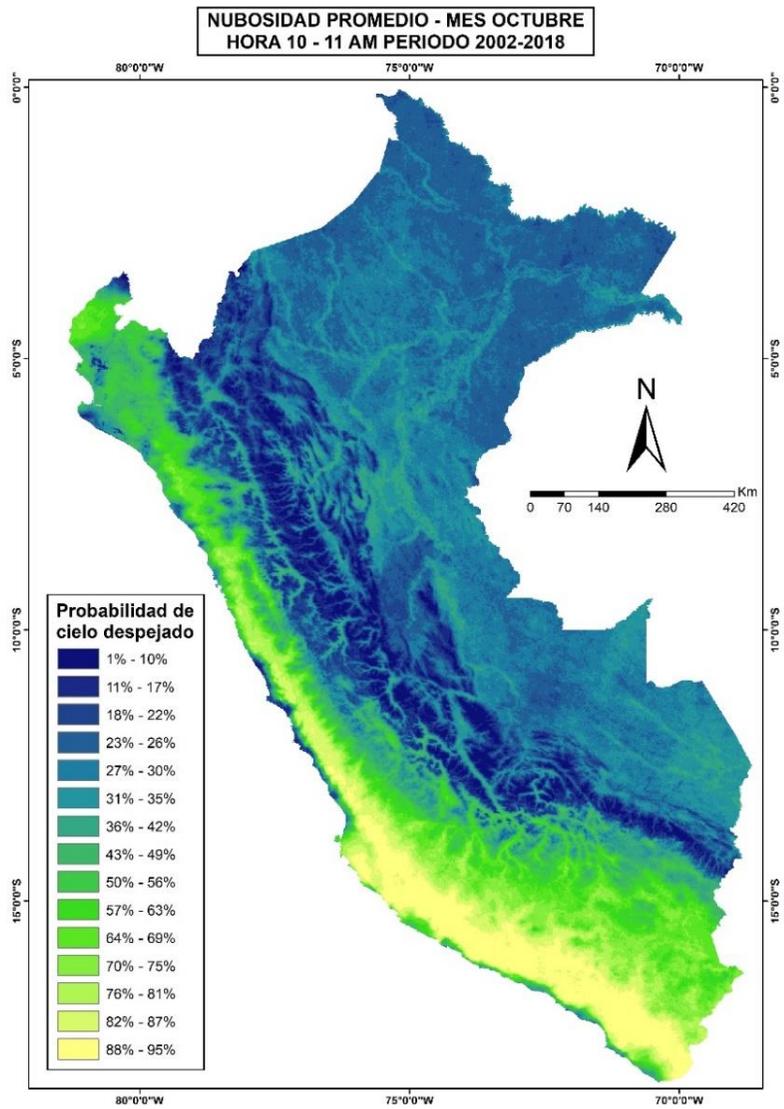


Figura 23. Cobertura nubosa promedio en términos de cielo despejado para todo el Perú en dos rangos horarios para el mes de octubre.

Lo común en todos los meses analizados es la gran influencia de la Cordillera de los Andes, la región Amazónica y el mar que permite la formación de nubes en casi todo el territorio del Perú. Se pudo observar como los Andes actuaban como una muralla que forzaba el ascenso de una masa de aire y permitía la formación de las nubes en un solo lado de la cordillera, que es parte de la Sierra y la extensa cobertura de nubes que se da en la Selva por el mecanismo de convección que dependía mayormente de la estación del año, todo lo relacionado a un clima tropical. Sin embargo, al otro lado de la cordillera era una situación distinta. Al actuar como un muro, había muy pocas nubes que llegaban a superar su altitud por lo que no había cobertura nubosa y la probabilidad de tener cielo despejado era alto. Por lo que, la formación de nubes en la Costa depende generalmente de la temperatura que tiene el mar, a pesar que su clima es árido y desértico.

4.2. Determinar la influencia de los sistemas meteorológicos sinópticos a nivel mensual que favorecen la nubosidad del Perú.

Para esta sección, el análisis también se hace para cada estación del año, cada tres meses, para ver cómo las variables meteorológicas, a nivel sinóptico, influyen en la formación de nubes y como resultado se dé la cobertura nubosa en el territorio peruano, pero los resultados se muestran para cada mes. Se observa en diferentes niveles de la atmósfera: nivel de superficie (1000 hPa), niveles bajos (850 hPa), niveles medios (500 hPa) y niveles altos (200 y 300 hPa) para una mejor comprensión del estado de la atmósfera.

4.2.1. Análisis para la estación de verano

Para el mes de enero, teniendo en cuenta los procesos para la formación de nubes, se observa que la temperatura promedio del aire (Figura 24a) es mayor a 25°C en casi todo el territorio del continente Sudamericano lo cual, indica una iniciativa para la formación de nubes. La humedad relativa promedio es casi mayor al 90% a nivel de la superficie (Figura 24b) en la región central del continente, también se observa una baja humedad relativa promedio al Sur del continente, como en Argentina y Chile. En niveles medios (Figura 24c), la humedad relativa promedio es superior al 60% en la parte amazónica y en niveles altos, (Figura 24d) la humedad promedio es superior a 50% en la misma zona. Esto quiere decir que, en la columna atmosférica de la cuenca Amazónica, la formación de nubes se da cerca de la superficie como nubes bajas y muy poca formación de nubes en los niveles superiores por su bajo contenido de humedad, esto disminuirá el crecimiento vertical de las nubes por el bajo contenido de humedad. Por lo que, ambas condiciones provocan la formación de nubes

bajas en casi toda la región de la cuenca Amazónica. Se observa también, tanto en niveles medios como en niveles altos, una masa de aire seca que se ubica en el océano pacífico cerca de la costa occidental del continente que no permitiría el desarrollo de las nubes.

En la Figura 25b, se observa en el noreste de Brasil, que el viento en niveles bajos tiene una velocidad mayor a 13 m/s y una dirección hacia el suroeste. Al llegar a los Andes se desvía debido al bloqueo que genera éste adoptando su misma dirección. Este movimiento del viento es el SALLJ que provoca la advección de temperatura y humedad; y el traslado de las nubes que se forman en la cuenca Amazónica hacia la Sierra y Selva del Perú; por ende, esto provoca que haya una cobertura nubosa amplia en esta parte del territorio peruano. En niveles medios (Figura 25c), el viento no tiene un comportamiento significativo en la cuenca Amazónica que influya en la formación de nubes. Por otro lado, en niveles altos (Figura 25d) se observa un comportamiento antihorario del viento en la parte central del continente, que es la AB. Este suceso ocurre comúnmente en la estación del verano austral y provoca el desplazamiento y distribución de masas de aire en casi todo el continente Sudamericano. Al norte de la AB se observa el traslado de nubes hacia el territorio peruano.

Para la Costa peruana, se observa la Figura 26a, que la temperatura superficial promedio del mar en casi toda la costa peruana está entre 23 - 24°C e indica que las aguas no son frías y no influyen en la formación de nubes; además, el APS que se observa en la Figura 26b de presión reducida a nivel del mar está ubicada más al sur y tampoco genera mucha influencia en las nubes sobre Perú. Esto significa que, en casi toda la Costa peruana no se tuvo mucha cobertura nubosa debido a las altas temperaturas del mar.

En la Figura 26c, se observa que los valores más bajos, menores a 200 W/m², sobre radiación de onda larga se encuentran en la cuenca amazónica y parte central del continente. Esto se debe a que la nube actúa como una barrera para que la radiación que emite la Tierra no salga hacia el exterior indicando así la presencia de cobertura nubosa mediante estos bajos valores de radiación. Así mismo, esta variable indica también la posición del ZCIT, que se encuentra dentro del continente por los bajos valores que muestra la Figura 26c. El ZCIT se observa en la confluencia de vientos a nivel de superficie (Figura 25a) en la línea ecuatorial.

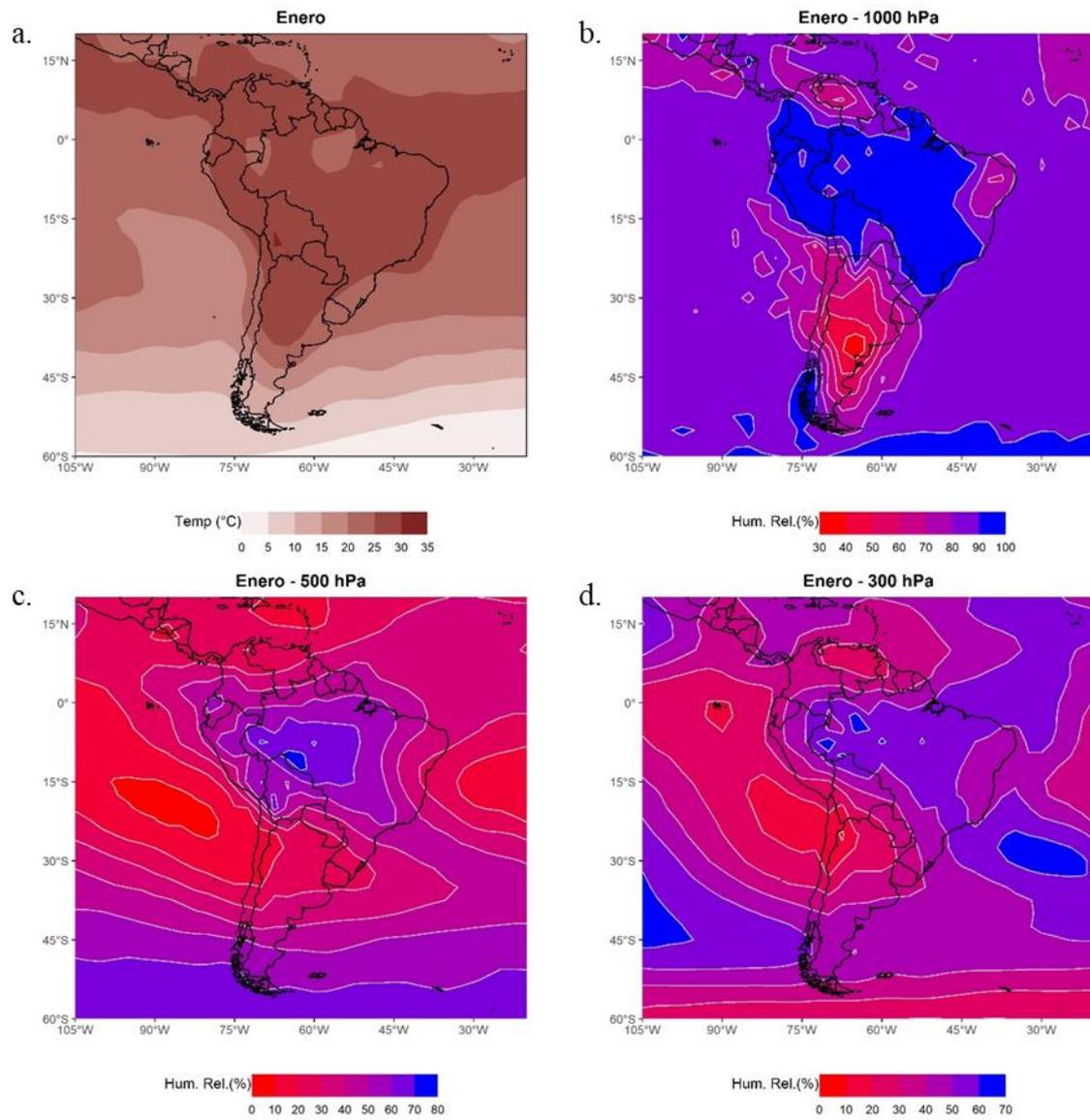


Figura 24. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de enero en el periodo 2002-2018.

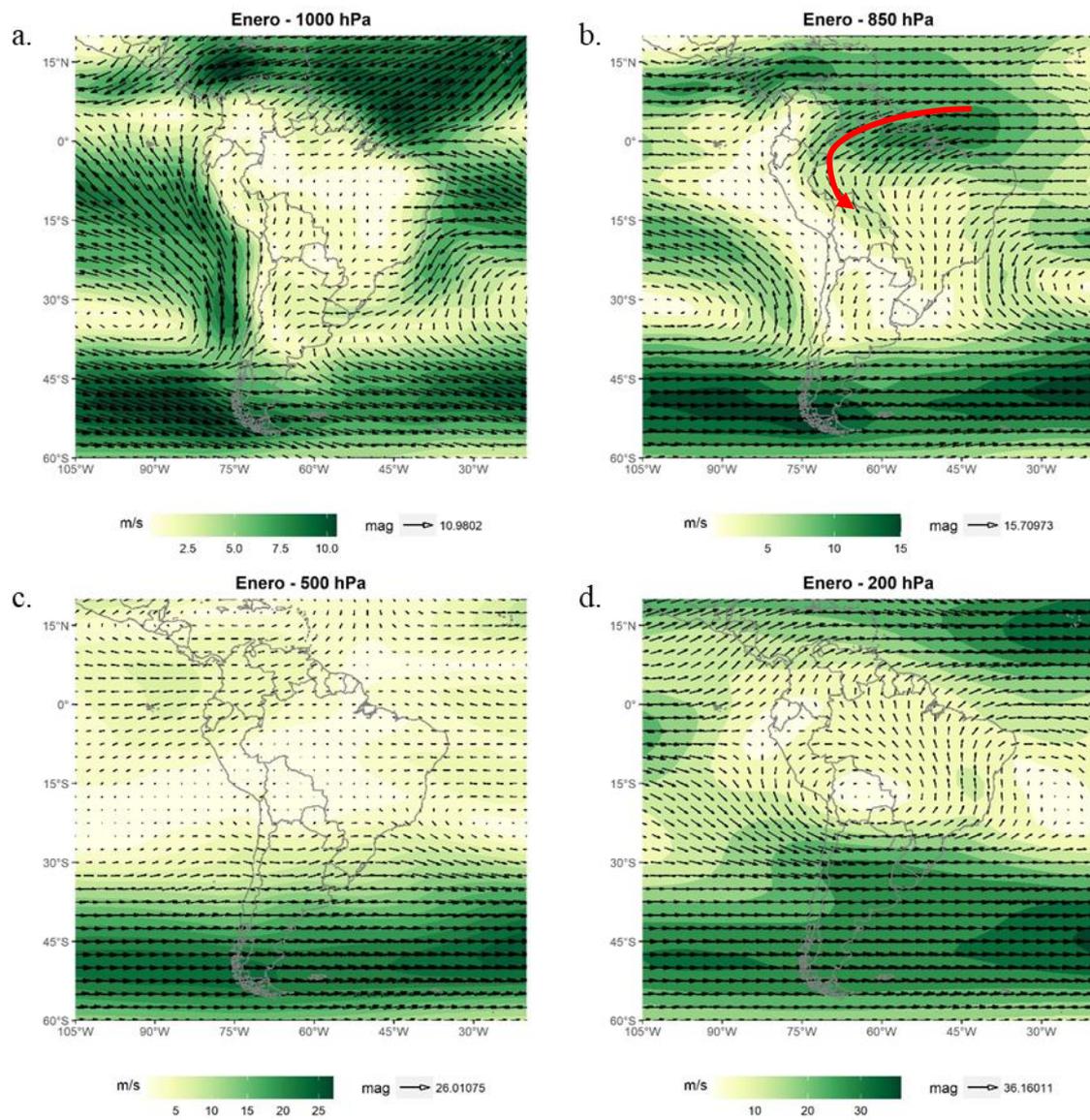


Figura 25. Mapas de reanalysis del NCEP-NCAR de la velocidad y dirección promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de enero en el periodo 2002-2018 (flecha roja es SALLJ).

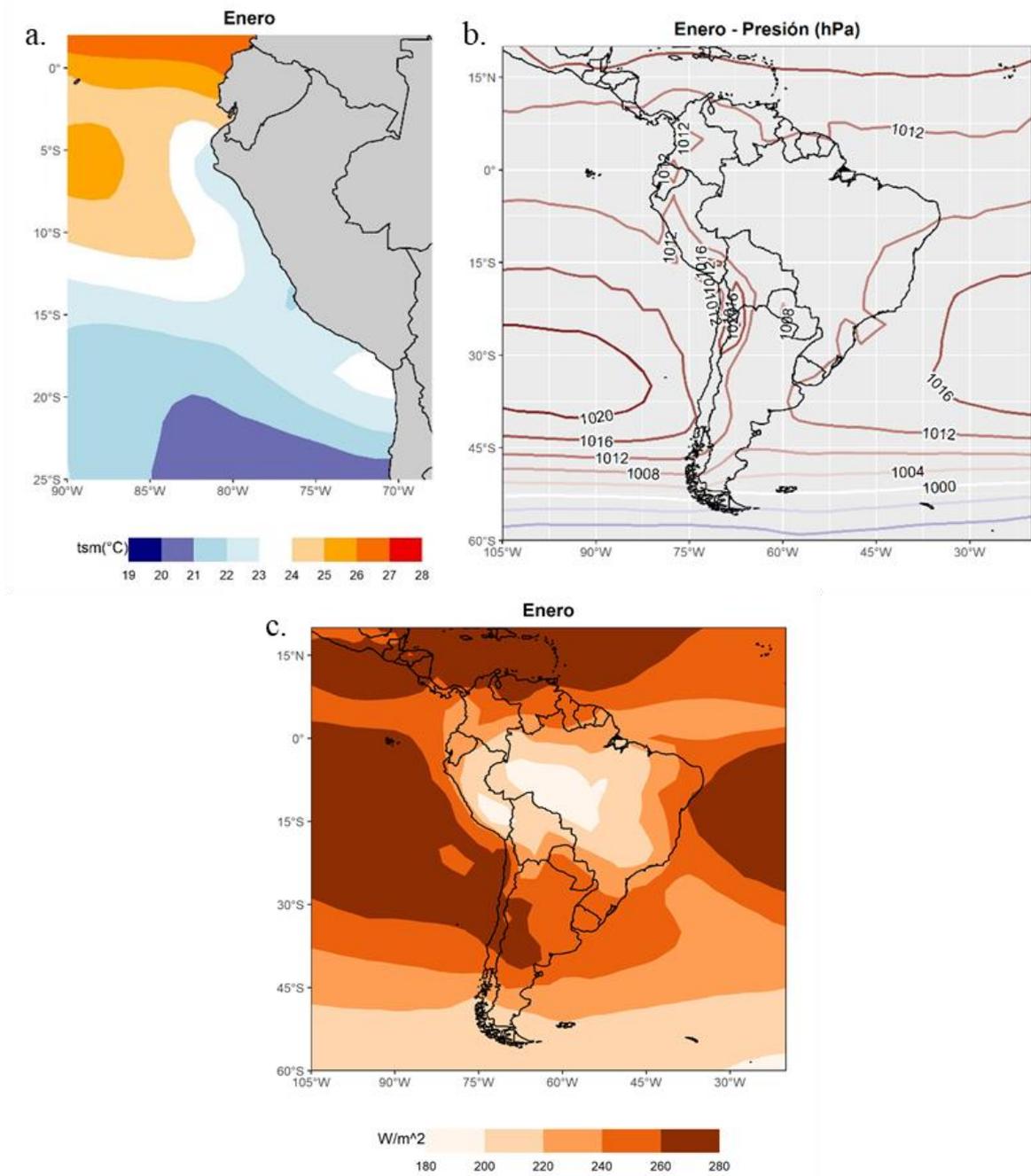


Figura 26. Mapas de reanalysis de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducida a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de enero en el periodo 2002-2018.

Para el mes de febrero, en la Figura 27a, se observa que se mantienen las condiciones del mes anterior con respecto a la temperatura promedio del aire, que es mayor a 25°C. La humedad relativa promedio sigue siendo alta o mayor al 90% a nivel de la superficie (Figura 27b) en la parte central del continente, además, también se observa la baja humedad relativa que se encuentra en el sur del continente como en Argentina y Chile. En niveles medios (Figura 27c), se incrementa el área donde la humedad promedio es mayor al 70% y en niveles altos (Figura 27d) también se mantiene la humedad promedio superior al 50% en la cuenca amazónica. Esto indica que hay formación de nubes bajas en esta zona del continente, así como en la Sierra y Selva, ya que el bajo contenido de humedad en niveles superiores disminuye de cierta forma el desarrollo vertical de estas nubes. Además, se observa una masa de aire seco proveniente del océano pacífico con dirección hacia sureste que ingresa al continente (Figura 27c y 27d). Esto no permite la formación y desarrollo de nubes en la zona sur de Perú, principalmente en la Costa.

En la Figura 28b, se observa que el viento mantiene las mismas condiciones analizadas del mes anterior en niveles bajos. En este nivel, el viento advecta humedad desde la cuenca amazónica hacia la Sierra y Selva de Perú lo que provoca la formación de nubes, así como el traslado de nubes formadas en esta región amazónica. En niveles medios (Figura 28c), no hay mucha influencia del viento ya que está en calma en la cuenca amazónica, lo que propicia a una atmósfera estable y no favorece la formación de nubes. En niveles altos (Figura 28d), se observa que la AB aún se mantiene distribuyendo la humedad en todo el continente, lo que provoca la advección de humedad y temperatura; y esto provoca la formación de nubes en el territorio peruano.

En la Costa peruana, como se ve en la Figura 29a, la temperatura superficial promedio del mar es de 24 - 25°C en casi todo el litoral. Hay un incremento con respecto al mes anterior, lo cual no influye mucho en la formación de nubes y el ASP está más al sur y no genera mucha influencia en las nubes como se ve en la Figura 28a con respecto al viento en superficie y la Figura 29b de presión reducida a nivel del mar.

En la Figura 29c, los valores de Radiación de onda larga se mantienen menores a 200 W/m² en la cuenca amazónica indicando así, la presencia de nubes en esta región del continente, así como la ubicación del ZCIT.

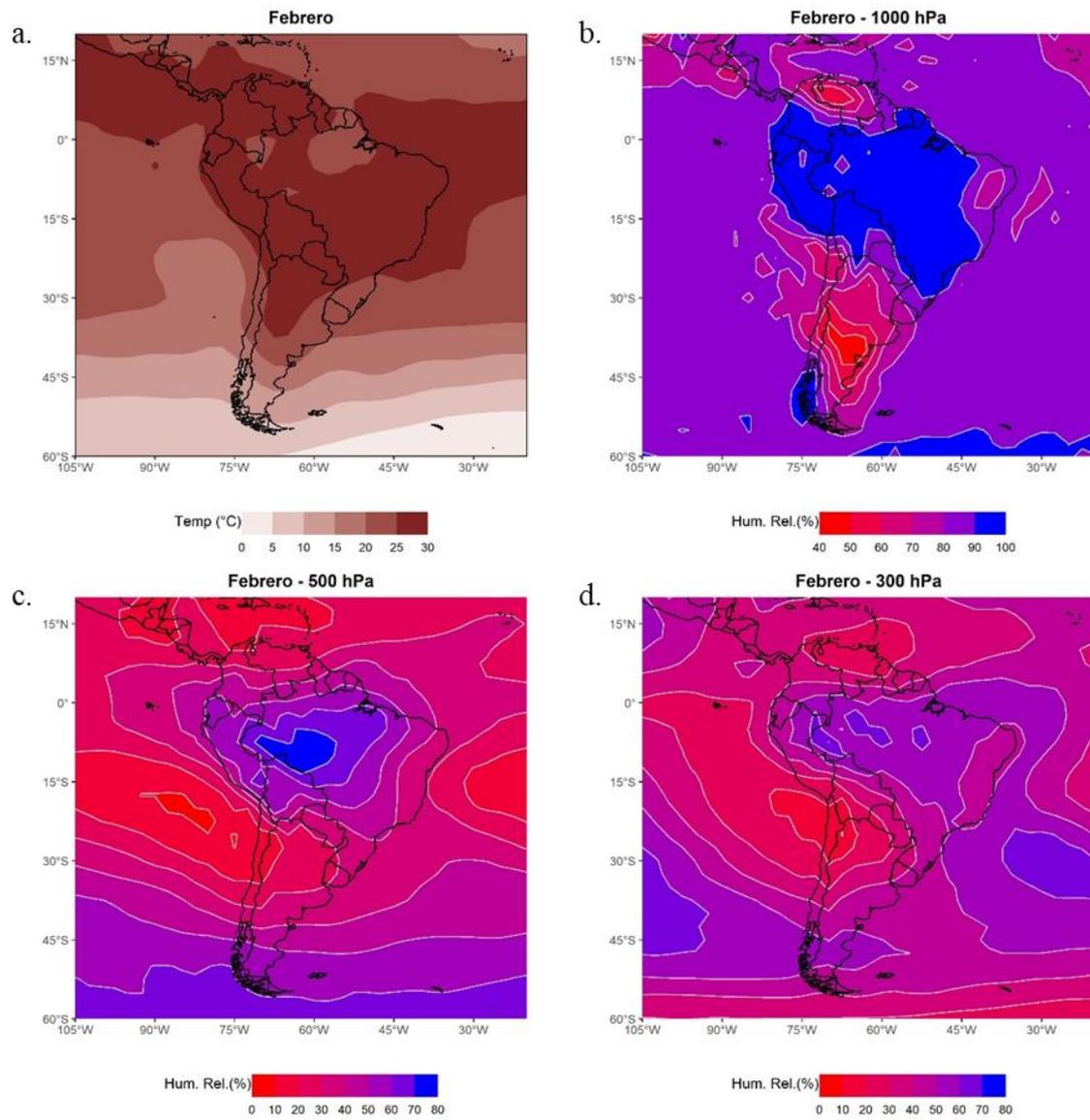


Figura 27. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y la humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de febrero en el periodo 2002-2018.

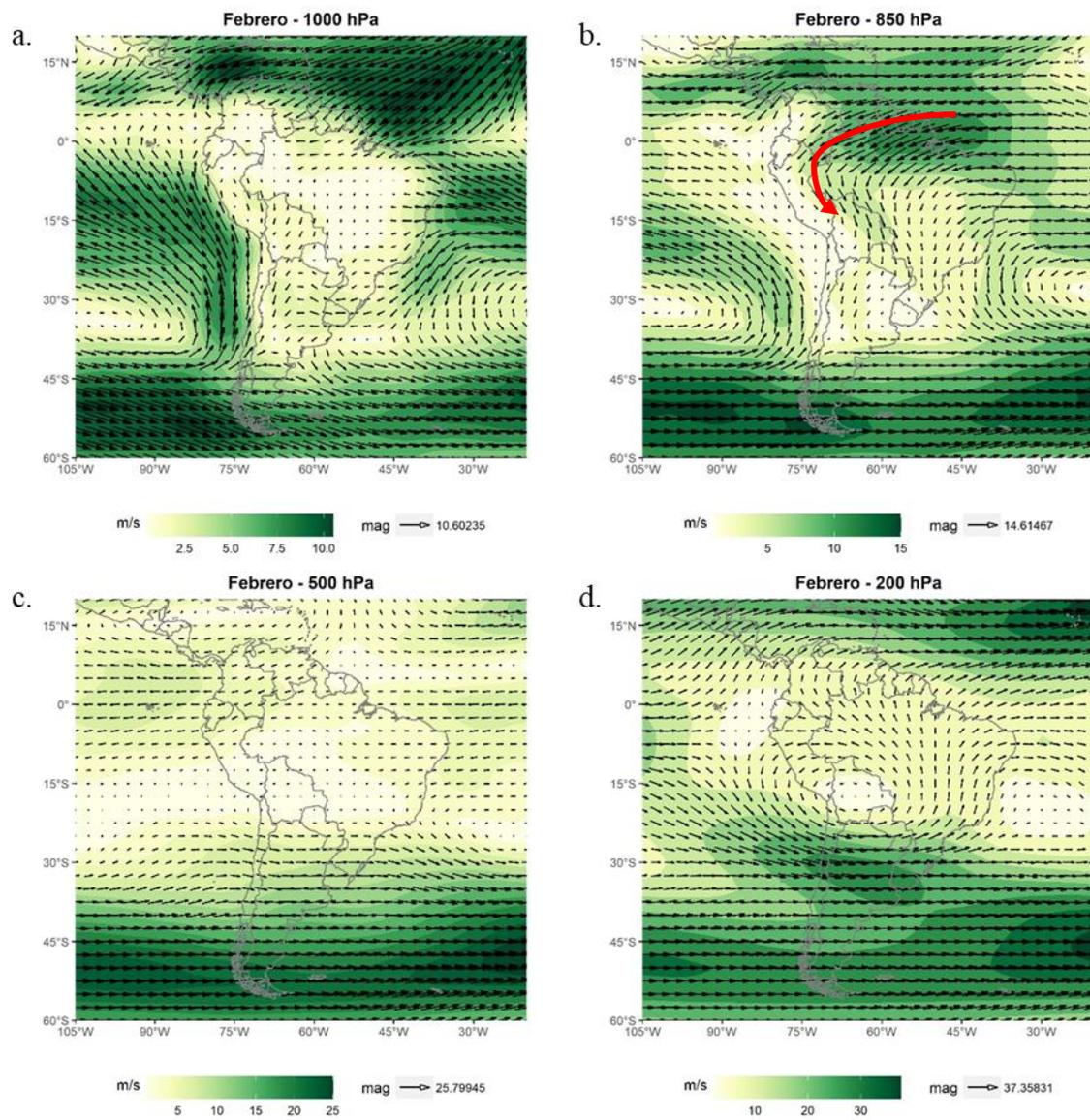


Figura 28. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de febrero en el periodo 2002-2018 (flecha roja es SALLJ).

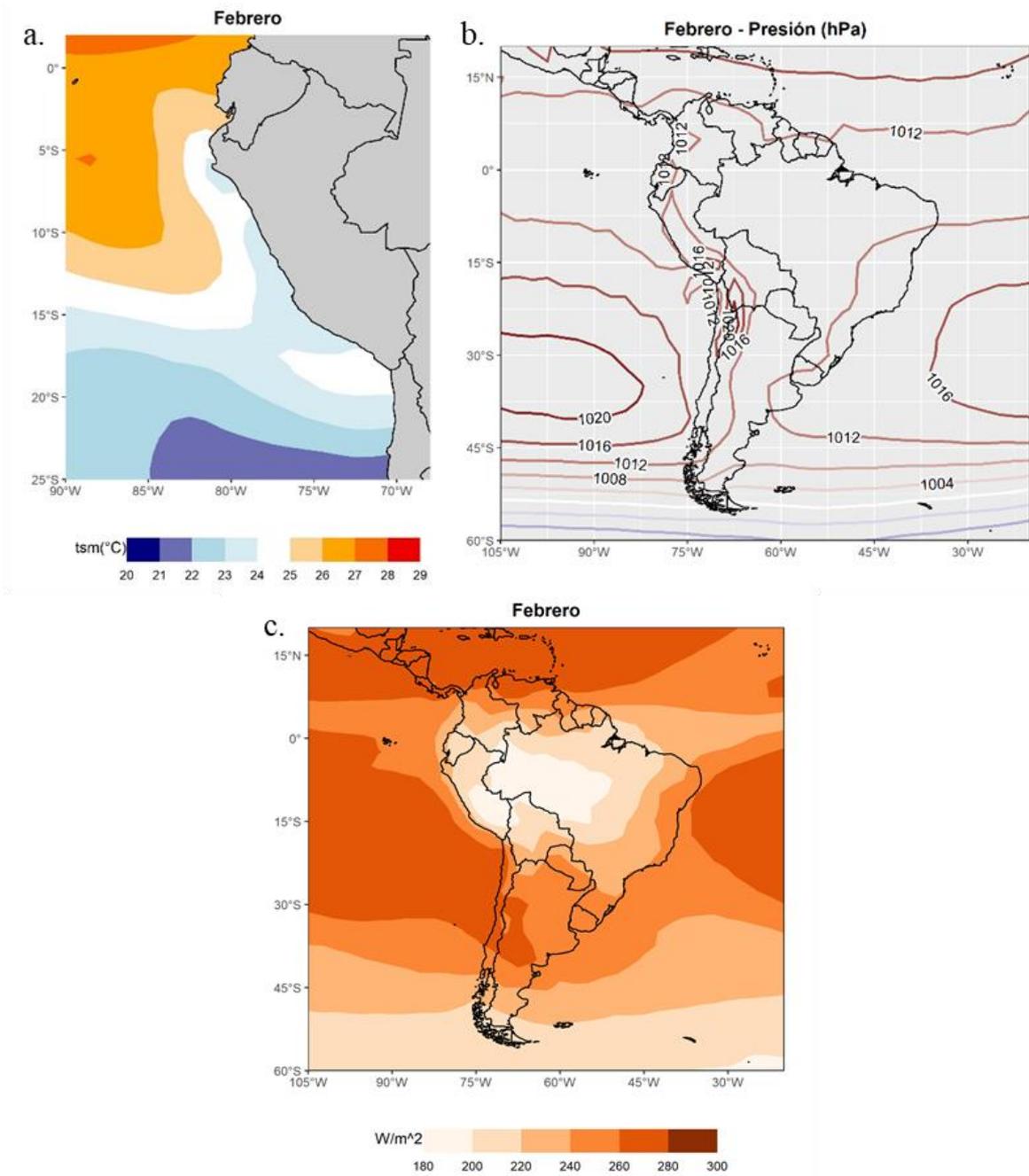


Figura 29. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de febrero en el periodo 2002-2018.

Para el mes de marzo, en la Figura 30a se observa que la temperatura del aire se mantiene con valores superiores a 25°C en la cuenca amazónica, así como en la zona tropical del continente. A nivel de superficie, la humedad relativa promedio (Figura 30b) se mantiene alto con valores superiores al 90% en la cuenca amazónica, así como en la parte tropical del continente; también se mantiene la masa de aire seco en el sur del continente. En niveles medios (Figura 30c), se observa que la humedad promedio se mantiene con los mismos valores, pero se ubica un poco más al norte con respecto al mes anterior, además se observa que la masa de aire seco que proviene del Pacífico ingresa al continente por Chile. En niveles altos (Figura 30d), se observa que la humedad relativa promedio no es tan alto, y se mantiene en la cuenca amazónica, y que la masa de aire seco que proviene del Pacífico entró al continente por Chile. Como se detalla, la formación de nubes se da en niveles bajos ya que la humedad es alta y la temperatura del aire también para la Sierra y Selva, pero en niveles superiores, la humedad es bajo, por lo que disminuirá el crecimiento de las nubes en estos niveles.

Con respecto al viento, en niveles bajos (Figura 31b), se observa que el comportamiento del mismo se mantiene, se ve una advección de humedad y temperatura desde la cuenca amazónica hacia la Selva y Sierra que provoca la formación de nubes, así como también su traslado de éstos en la misma dirección. En niveles medios (Figura 31c), se observa que el viento, en el norte de la cuenca amazónica, tiene una dirección del este y aumenta su velocidad, lo que puede provocar una advección de humedad y posible formación de nubes en el norte del Perú. En niveles altos (Figura 31d), se observa que se mantiene la Alta de Bolivia distribuyendo la humedad en todo el continente. Por el norte, traslada la humedad de la región amazónica; y por el sur, ingresa al continente la masa de aire seco que se ubicaba en el Océano Pacífico y que no permite la formación de nubes en el Sur de Perú.

En la Costa peruana (Figura 32a), la temperatura superficial promedio del mar se mantiene entre 23 - 25°C; aún se mantiene alta, por lo que no habrá mucha formación de nubes en casi toda la costa de Perú. La posición del ASP se desplaza un poco hacia el norte (Figura 32b), aunque no favorece mucho a la formación de nubes en el sur de Perú, ya que la temperatura del mar es alta y la masa de aire seco es cálida en Chile.

En la Figura 32c, se observa que la Radiación de onda larga aún posee valores menores a 200 W/m² en la cuenca amazónica indicando la presencia de nubes con el ZCIT, pero tiene un desplazamiento hacia el norte, porque el sol empieza a desplazarse al hemisferio norte.

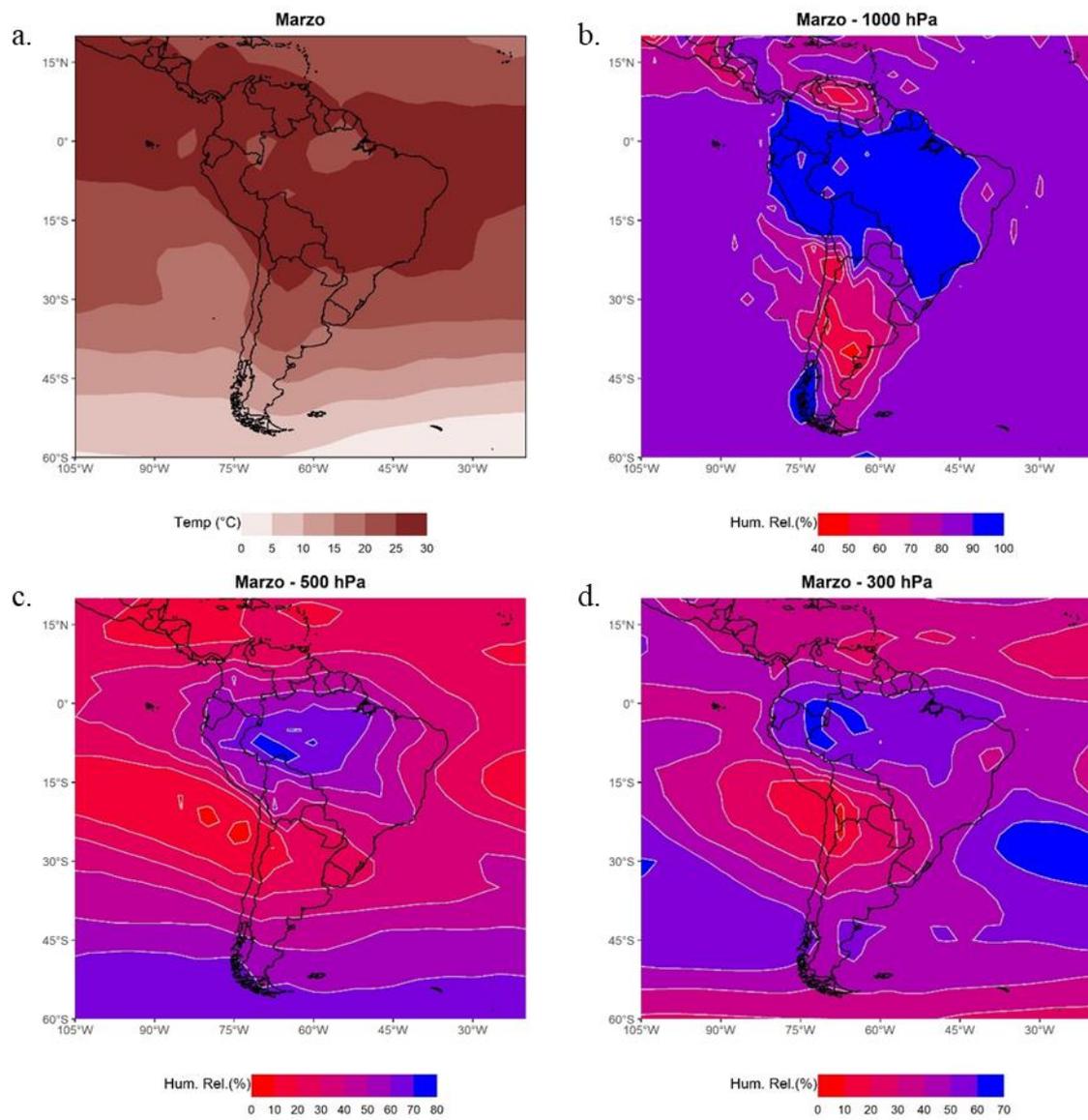


Figura 30. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de marzo en el periodo 2002-2018.

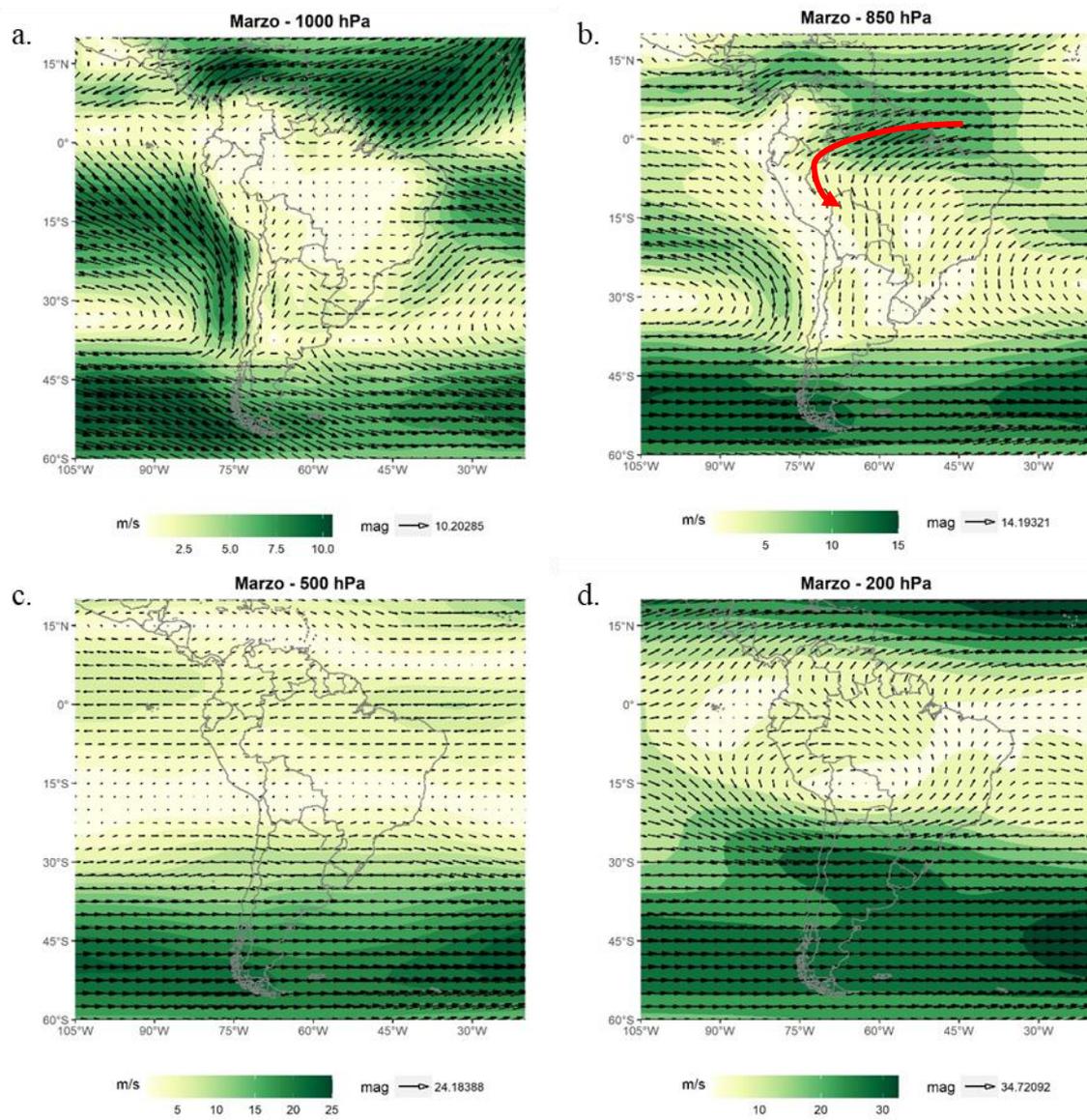


Figura 31. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de marzo en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).

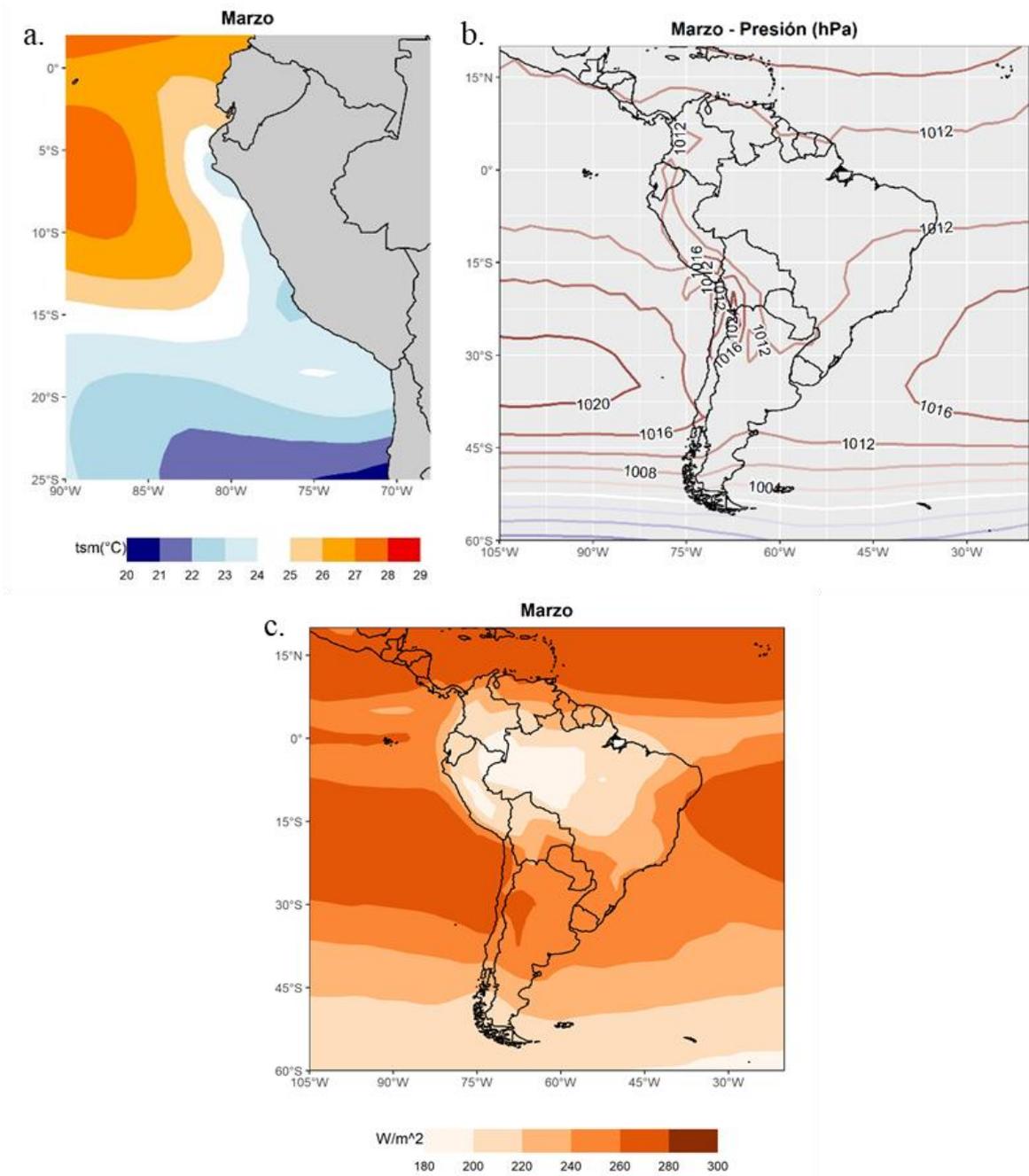


Figura 32. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (sb) y Radiación de onda larga (c) para el mes de marzo en el periodo 2002-2018.

4.2.2. Análisis para la estación de otoño

En la Figura 33a, para el mes de abril se observa que la temperatura promedio del aire se mantiene con valores superiores a 25°C en la cuenca amazónica del continente. Esto indica que hay la iniciativa para la formación de nubes en esta parte del continente y en otras áreas. A nivel de superficie (Figura 33b), la humedad relativa promedio se mantiene con valores altos en el continente (incluido la cuenca amazónica) pero va disminuyendo el área que cubre. Además, aún se mantiene la presencia de una masa de aire seca en el sur del continente (Argentina y Chile) analizada en los meses anteriores. En niveles medios (Figura 33c), se observa que la masa de aire con humedad de la cuenca amazónica se desplaza hacia el norte del continente; y al sur del continente, cerca al norte de Chile, ingresa una masa de aire seco del Pacífico. En niveles altos (Figura 33d), se mantiene las condiciones vistas en el mes anterior; la cuenca amazónica tiene una humedad relativa que se desplaza un poco al norte y la presencia de una masa de aire seco dentro del continente, entre Chile, Bolivia y Perú. Esto indica que la formación de nubes se da con normalidad en los niveles inferiores, pero no en los niveles superiores lo que dificultará su crecimiento en la Sierra y Selva de Perú.

Con respecto al viento, se observa en niveles bajos (Figura 34b), que la dirección del viento en la cuenca amazónica se mantiene con dirección del este hacia el norte de Perú, pero disminuye su velocidad. También, el SALLJ desaparece, lo que indica que la formación de nubes tanto en la Sierra como en la Selva empieza a disminuir su frecuencia. En niveles medios (Figura 34c), se observa una dirección del viento del este en la cuenca amazónica, pero con una velocidad de aproximadamente 5 m/s que es bajo y que puede adveccionar humedad hacia la Selva de Perú, en el norte; por otro lado, entre el norte de Chile y sur de Perú se observa una dirección del viento hacia el este. En niveles altos (Figura 34d), se observa que la AB está desapareciendo, el giro antihorario no está muy bien definido. También se observa la Corriente en Chorro subtropical que traslada la masa de aire seco del Océano Pacífico al continente. Esto quiere decir que la formación de nubes se mantiene en la parte amazónica por la advección de humedad y temperatura que genera los vientos o el desplazamiento de las nubes en niveles bajos y medios; por otro lado, en el Sur de Perú hubo poca formación de nubes debido al ingreso de una masa de aire seco del océano por acción de la Corriente en Chorro

Para la costa peruana (Figura 35a), la temperatura superficial promedio del mar es entre 22 – 23 °C en casi todo el litoral de la costa de Perú, la temperatura aún es alta para que exista cobertura nubosa. El núcleo del ASP (ver Figura 35b) se desplaza un poco al norte siguiendo

la dirección del sol pero que no genera mucha influencia a través del viento a nivel de superficie (Figura 34a) en la nubosidad para el sur del Perú.

En la Figura 35c, se observa que los menores valores de Radiación de onda larga se ubican al norte y tienen una menor área de cobertura con respecto al mes anterior en la cuenca amazónica. Esto indica que la actividad convectiva en esta región está disminuyendo y, por ende, la cobertura nubosa disminuye. Además, la posición del ZCIT se mantiene con respecto a los meses anteriores (Figura 34a).

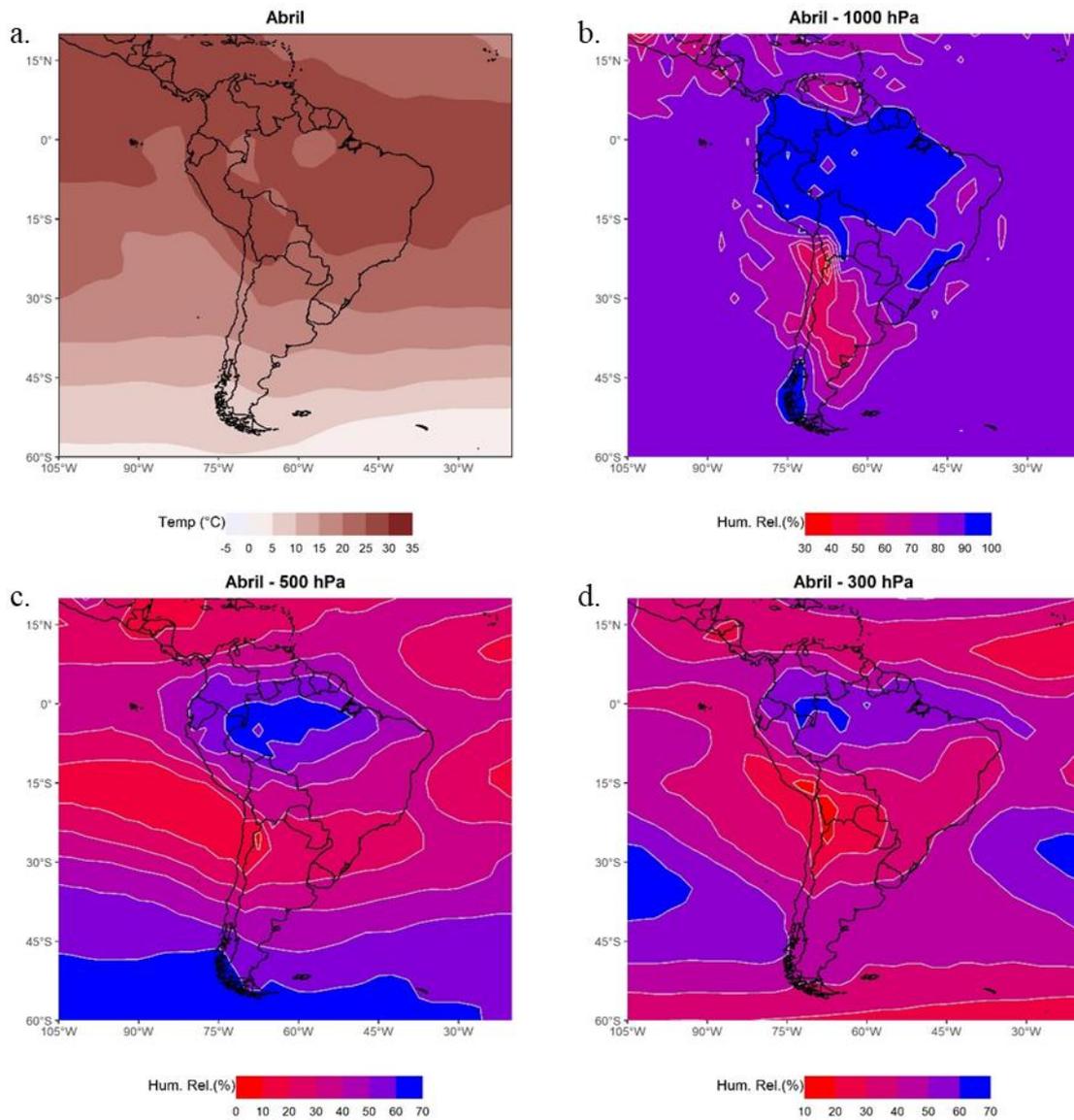


Figura 33. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmósfera para el mes de abril en el periodo 2002-2018.

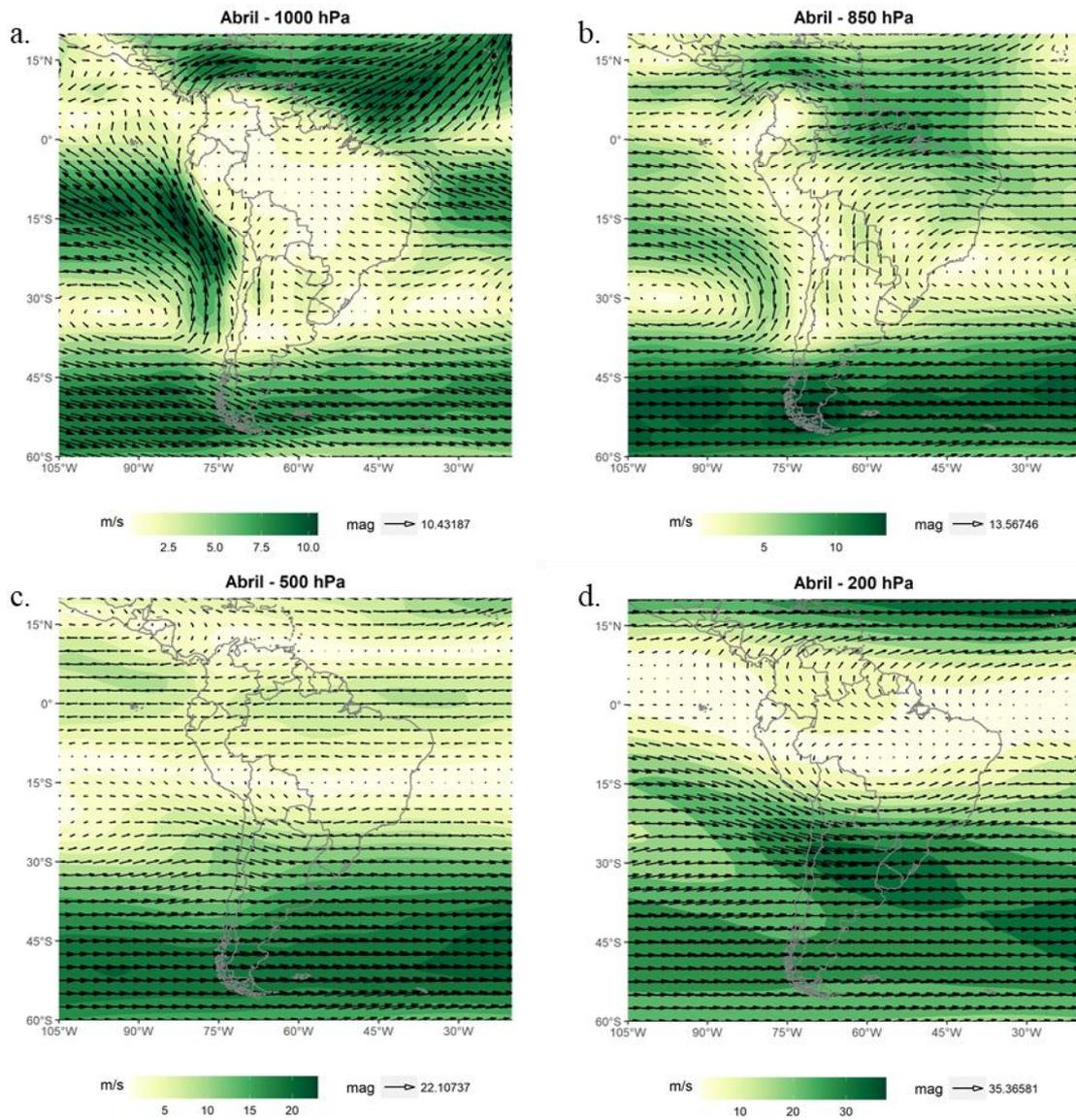


Figura 34. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de abril en el periodo 2002-2018.

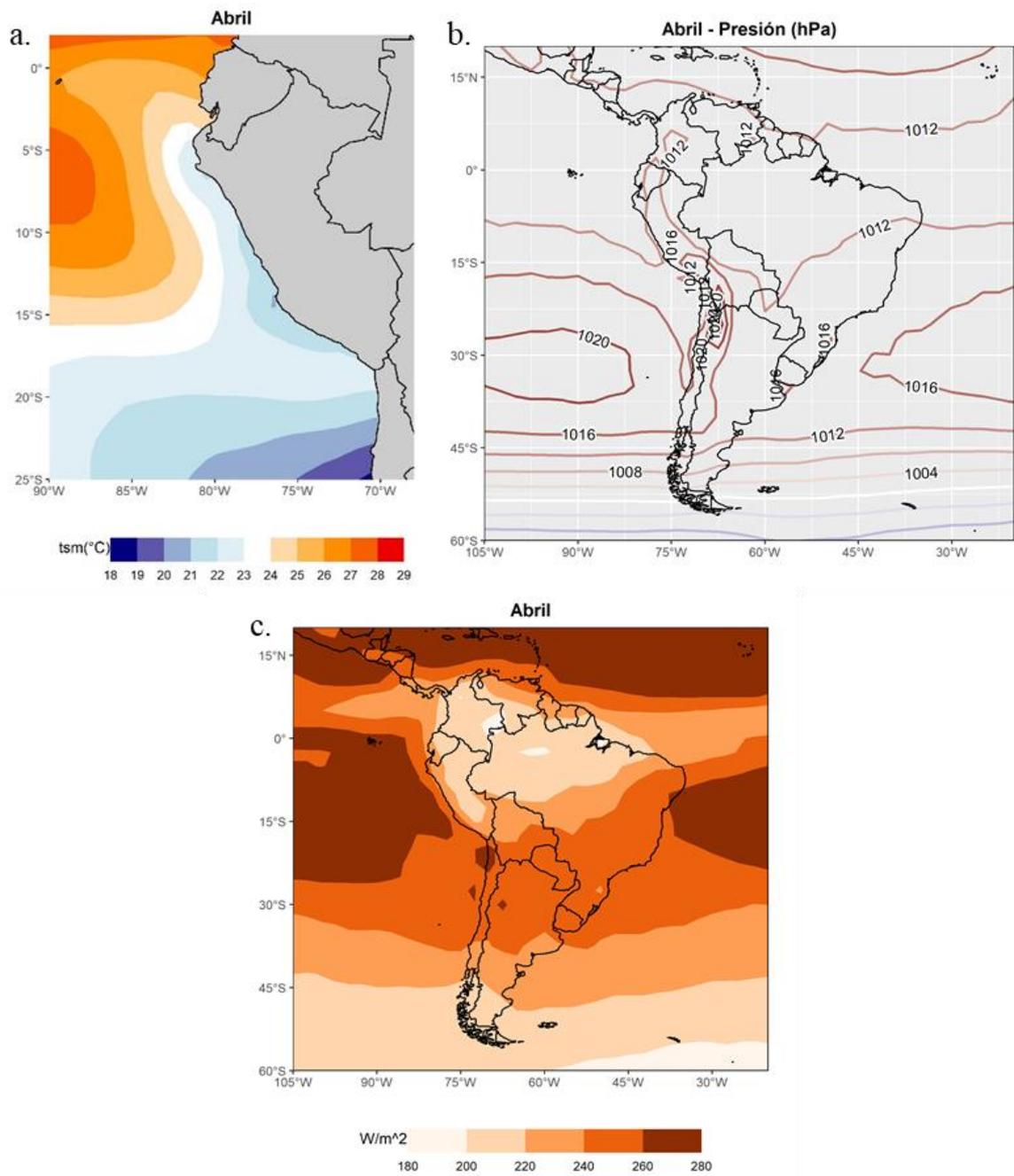


Figura 35. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de abril en el periodo 2002-2018.

Para el mes de mayo, en la Figura 36a, se observa que la temperatura promedio del aire en la mayor parte de la cuenca amazónica (también el norte del continente) es superior a 25°C, favoreciendo así la formación de nubes. A nivel de superficie (Figura 36b), La humedad relativa promedio se mantiene alto con casi al 100%, principalmente en la región amazónica, pero no abarca todo el continente. Al este de Brasil sus valores son bajos, por lo que la cobertura nubosa disminuye en esa región. También se observa que la masa de aire seca aún prevalece en el norte de Chile y parte de Bolivia y Argentina. En niveles medios (Figura 36c), se observa que la humedad que se encuentra en la región amazónica se desplaza hacia el Norte y está disminuyendo su área que abarca; por otro lado, la masa de aire seca que se ubica entre el Norte de Chile y el Pacífico se desplaza hacia el norte, lo que tiene una influencia en el Sur de Perú. En niveles altos (Figura 36d), la masa de aire seco que se encuentra dentro del continente entre Perú y Chile se desplaza hacia el norte afectando esta misma zona; además, la humedad que se encontraba en la cuenca amazónica empieza a disminuir. Esto indica que la frecuencia para formar nubes en la cuenca amazónica, así como en el mayor parte del continente, va disminuyendo por la poca humedad que hay en la columna atmosférica. Esto afecta a la cobertura nubosa en la Sierra y Selva de Perú.

Con respecto al viento, se observa que en niveles bajos (Figura 37b), en la cuenca amazónica tiene una dirección hacia el oeste y que el SALLJ desapareció. Esto indica una advección de humedad y temperatura, o el desplazamiento de nubes hacia la Selva y Sierra, zona Norte de Perú. En niveles medios (Figura 37c), se observa un giro antihorario débil del viento en el centro de Brasil, cerca al límite con Bolivia que influye de cierta manera el transporte de humedad en el continente; además, al norte de Chile, el viento hace ingresar al continente la masa de aire seco que se encontraba en el océano lo que provoca que no haya cobertura de nubes en la zona sur del Perú. En niveles altos (Figura 37d), se observa que la AB ha desaparecido y la Corriente en Chorro subtropical se encuentra más al norte, que transporta la masa de aire seco que se encontraba en el Pacífico hacia el continente. Esto significa que la formación de nubes disminuye en la Selva y Sierra del Perú, y que en la zona Sur del Perú hay muy poca formación de nubes debido al ingreso de la masa de aire seco del Pacífico.

Para la costa de Perú, se observa en la Figura 38a, que la temperatura superficial promedio del mar está entre 20 – 22°C en todo el litoral. Esto significa que la temperatura del mar empieza a disminuir. El ASP se desplaza hacia el norte (Figura 38b) y empieza a generar una influencia en el viento a nivel de superficie (Figura 37a) que provoca la advección del

aire seco cálido que se encuentra en el norte de Chile (Figura 36b) y que podría formar nubes si la temperatura superficial del mar sigue disminuyendo en el sur de Perú.

En la Figura 38c, los valores de Radiación de onda larga empiezan a aumentar en la cuenca amazónica. Esto significa que la formación de nubes ha disminuido y permite la salida de esta radiación ya que no hay mucha cobertura nubosa formada que impida su salida. También indica que el ZCIT mantiene su posición en el océano (Figura 37a), pero se desplaza según el movimiento del sol.

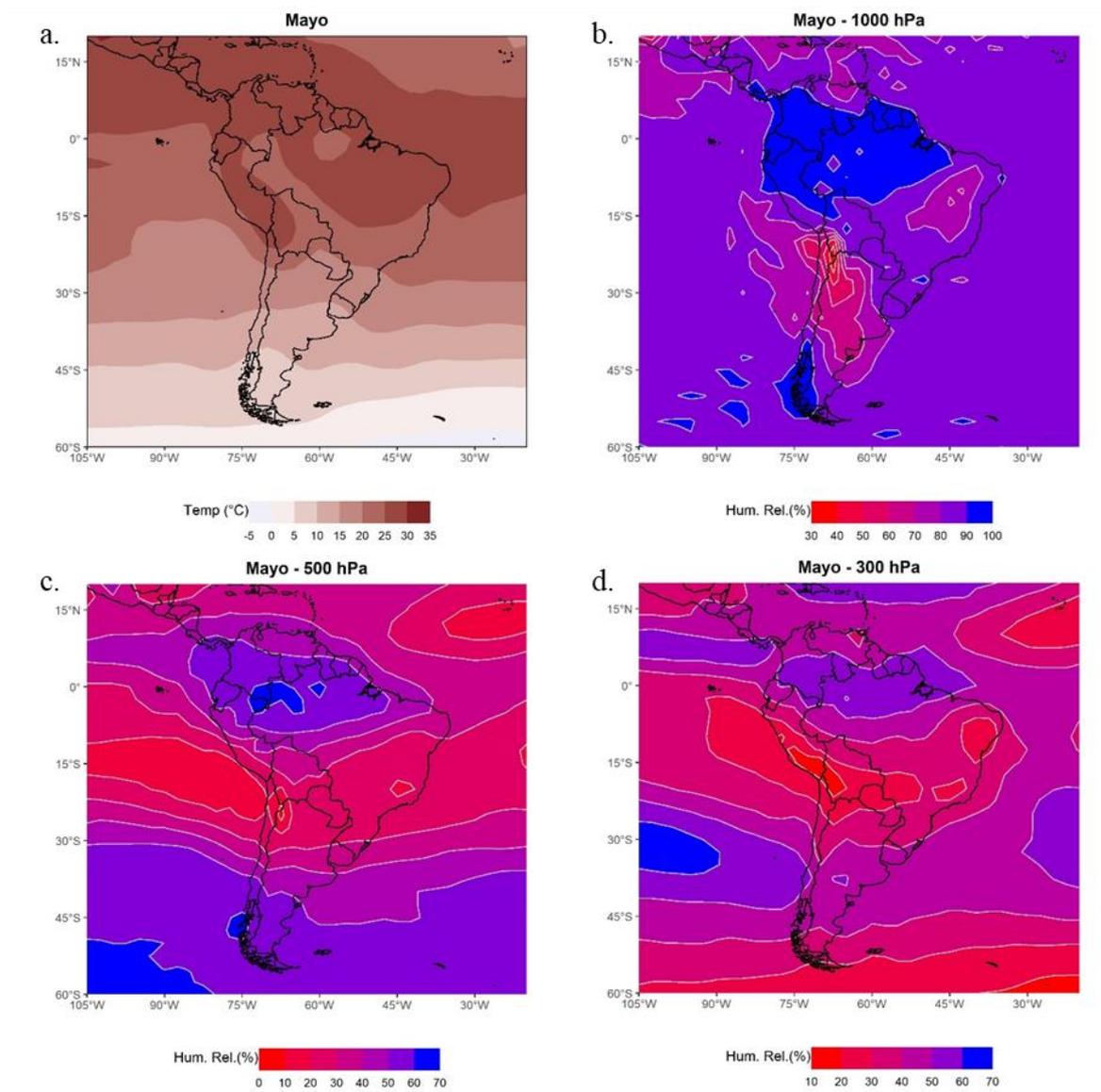


Figura 36. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmósfera para el mes de mayo en el periodo 2002-2018.

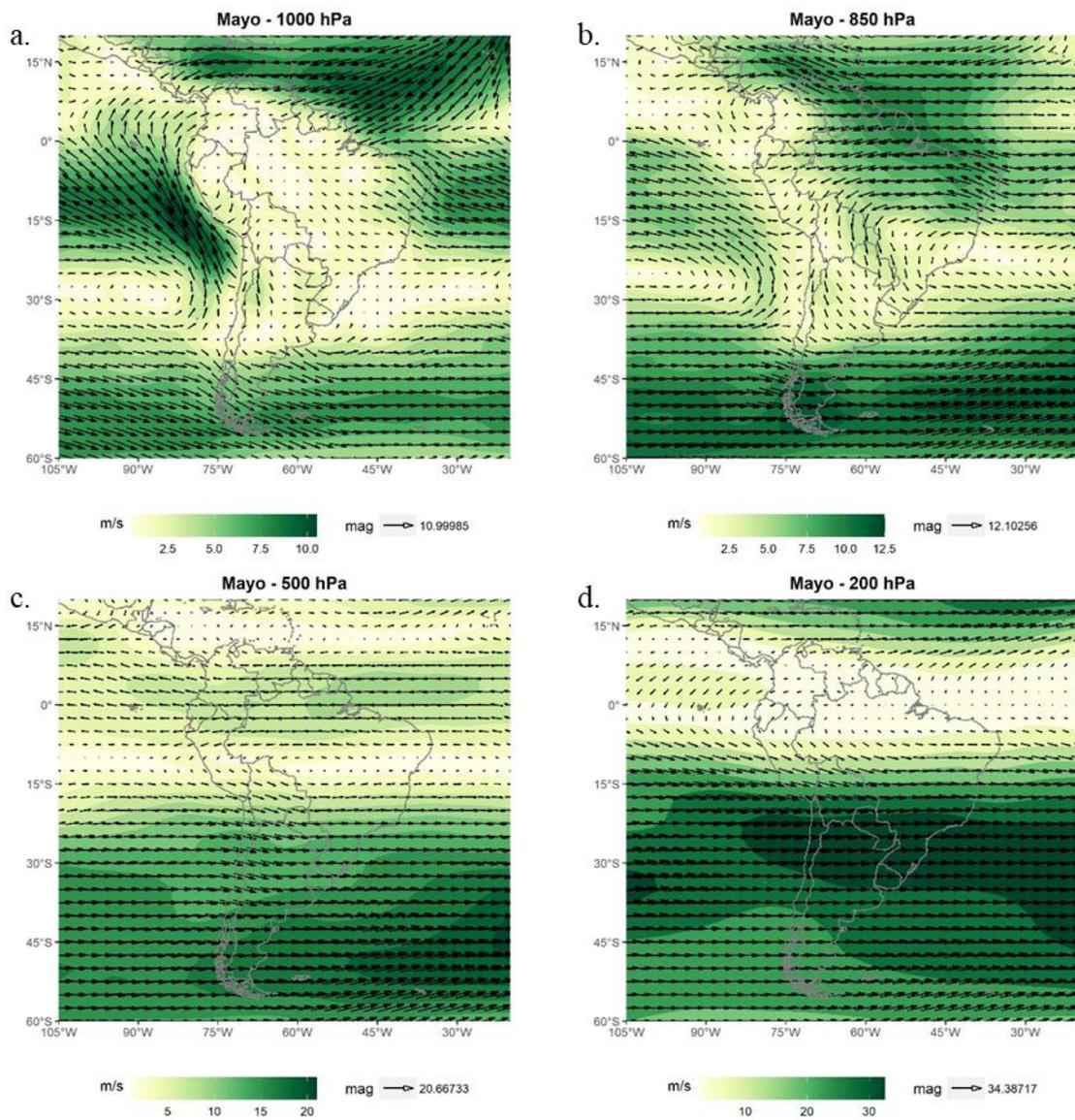


Figura 37. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de mayo en el periodo 2002-2018.

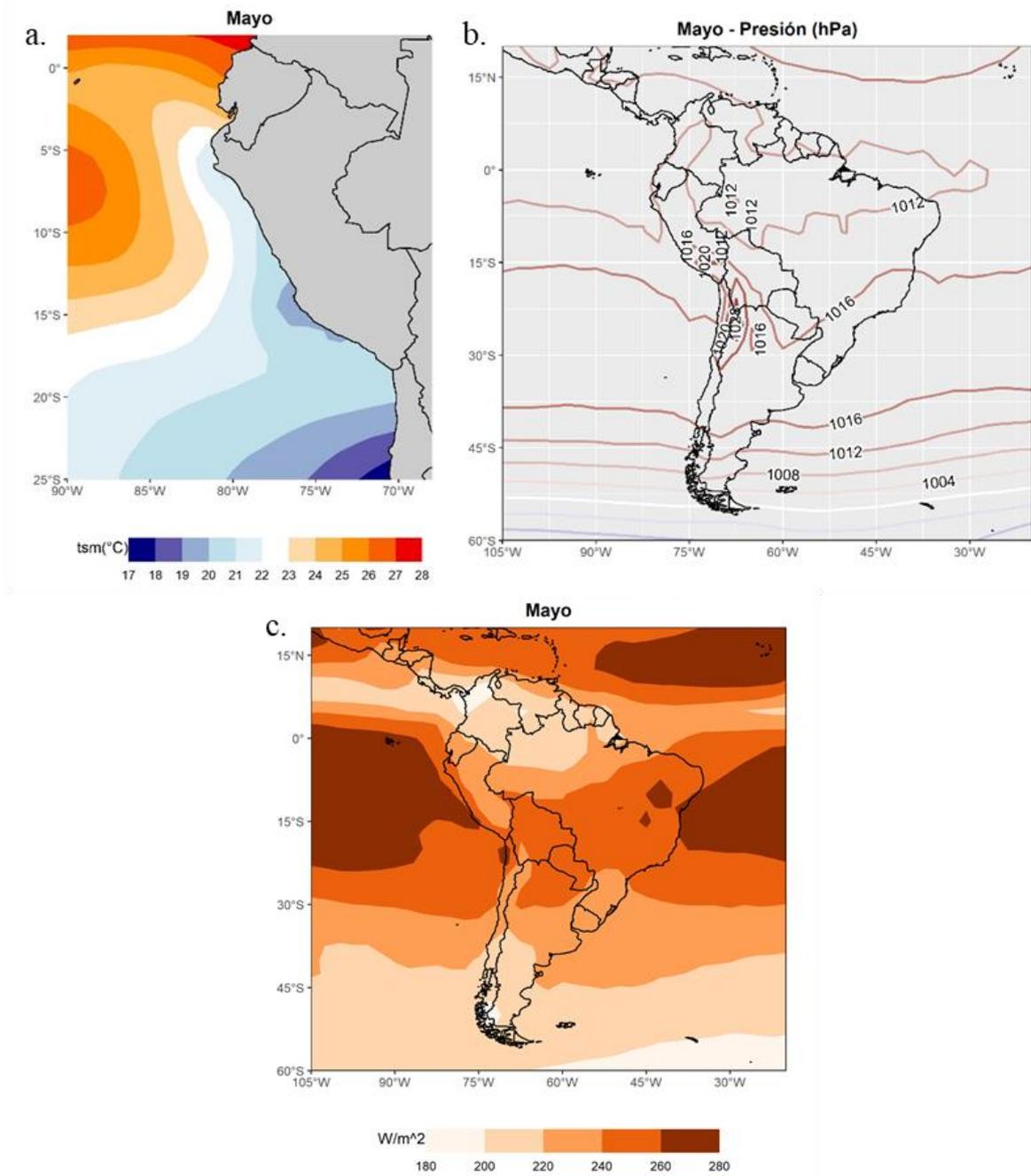


Figura 38. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de mayo en el periodo 2002-2018.

Para el mes de junio, en la Figura 39a se observa que la temperatura promedio del aire es mayor a 25°C en la mayor parte de la cuenca amazónica del continente. Esto hace indicar que casi la mitad del año, esta situación se mantiene o no varía mucho, por lo que, favorece la formación de nubes en esta parte del continente. En niveles bajos (Figura 39b), se observa que empieza a disminuir la humedad relativa promedio en la cuenca amazónica y en lugares como el centro de Brasil, el sur de Perú y Bolivia; el norte de Chile y Argentina, lo que hace indicar la presencia de masas de aire seco que dificultan la formación de nubes en un principio. En niveles medios (Figura 39c), se observa que, en casi todo el continente, la humedad relativa promedio está por debajo del 50% lo que dificulta el crecimiento de las nubes. En niveles altos (Figura 39c), también se tiene la misma condición que en niveles medios, se observa que la humedad relativa promedio fue menor al 30% en la parte central del continente y parte de la cuenca amazónica. Esto hace indicar que la formación de nubes disminuye en casi todo el continente, así como en la Selva y Sierra de Perú, por los bajos valores de humedad que presenta la columna atmosférica.

La Figura 40b, en niveles bajos, el viento de la cuenca amazónica tiene una dirección hacia el oeste con una velocidad no superior a 10 m/s, lo cual significaría una advección de humedad y temperatura; y un posible traslado de la nubosidad que se ha formado hacia la Selva y Sierra del Perú, zona norte. En niveles medios (Figura 40c), se observó que hay un ligero sentido antihorario en el viento en la parte central de Brasil que puede influenciar de cierta manera la distribución de las nubes. También se observó, a partir de 20°S, la dirección de los vientos hacia el este y con una velocidad aproximada de 10 m/s que muestra la advección de la masa de aire seco del Pacífico al continente. En niveles altos (Figura 40d), se observa a la Corriente en Chorro subtropical transportar la masa de aire seco que hay en el Pacífico hacia el continente, lo que provoca que haya una baja formación de nubes en el Sur de Perú.

Para la costa de Perú, se observa en la Figura 41a que la temperatura superficial promedio del mar está entre 19 – 22°C en todo el litoral. Esta temperatura del mar va disminuyendo, donde la más fría se encuentra al sur del Perú. La acción que genera el ASP con el viento, a nivel de superficie (ver Figura 40a), hace que advecete la masa de aire seco cálido que se encuentra en el Norte de Chile y pase por aguas frías, provocando así que la atmósfera se condense y se formen las nubes en la Costa, zona centro y sur del Perú, principalmente.

Los valores de Radiación de onda larga (Figura 41c) son mayores a 240 W/m^2 en la cuenca amazónica y parte central del continente. Esto indica que la formación de nubes en el continente ha disminuido progresivamente debido a las bajas concentraciones de humedad que se vieron en diferentes niveles de la columna atmosférica y no hubo cobertura nubosa. Además, el ZCIT se desplaza hacia el norte (Figura 40a), lo que provoca que haya poca cobertura de nubes en la cuenca amazónica.

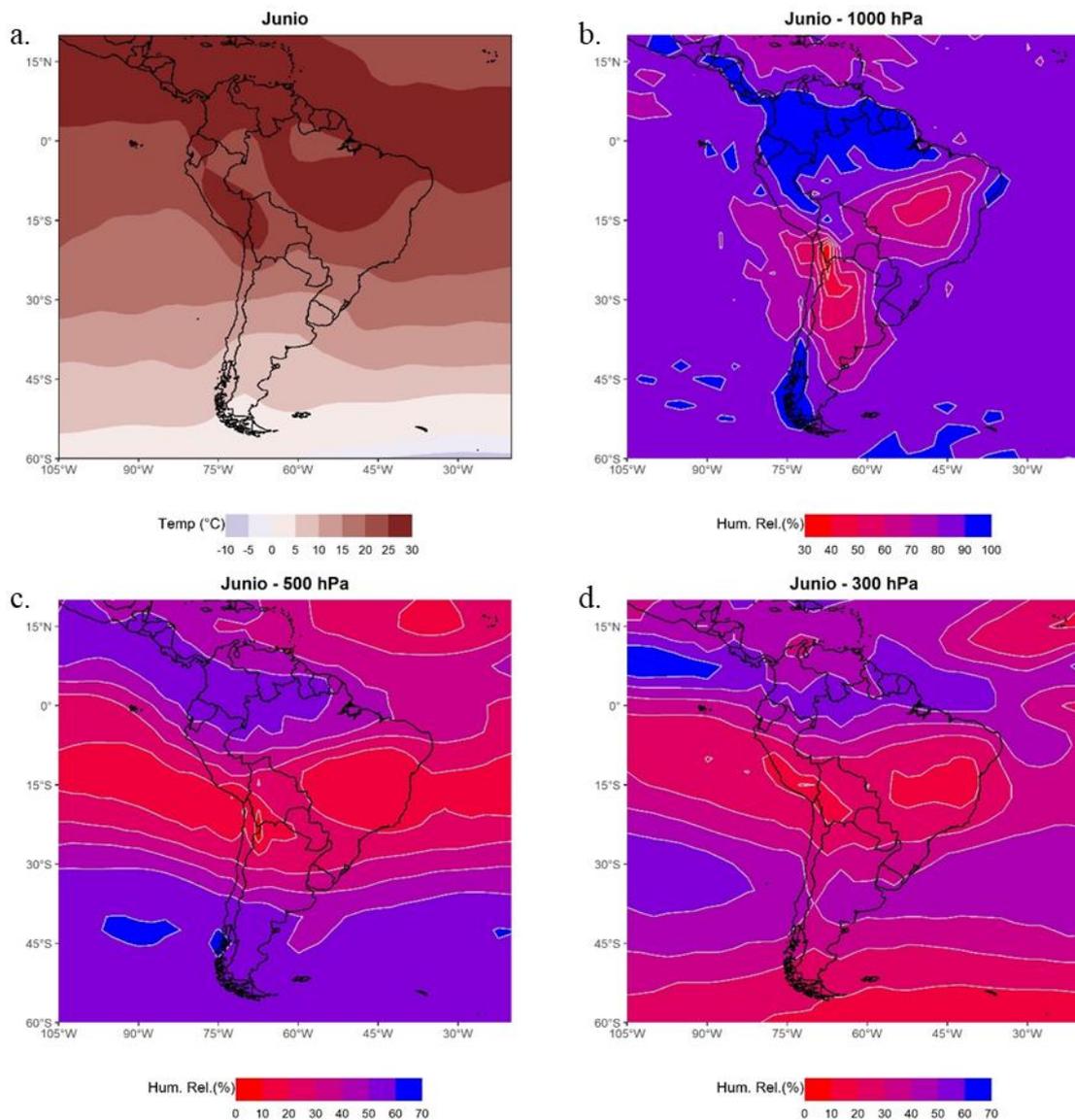


Figura 39. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de junio en el periodo 2002-2018

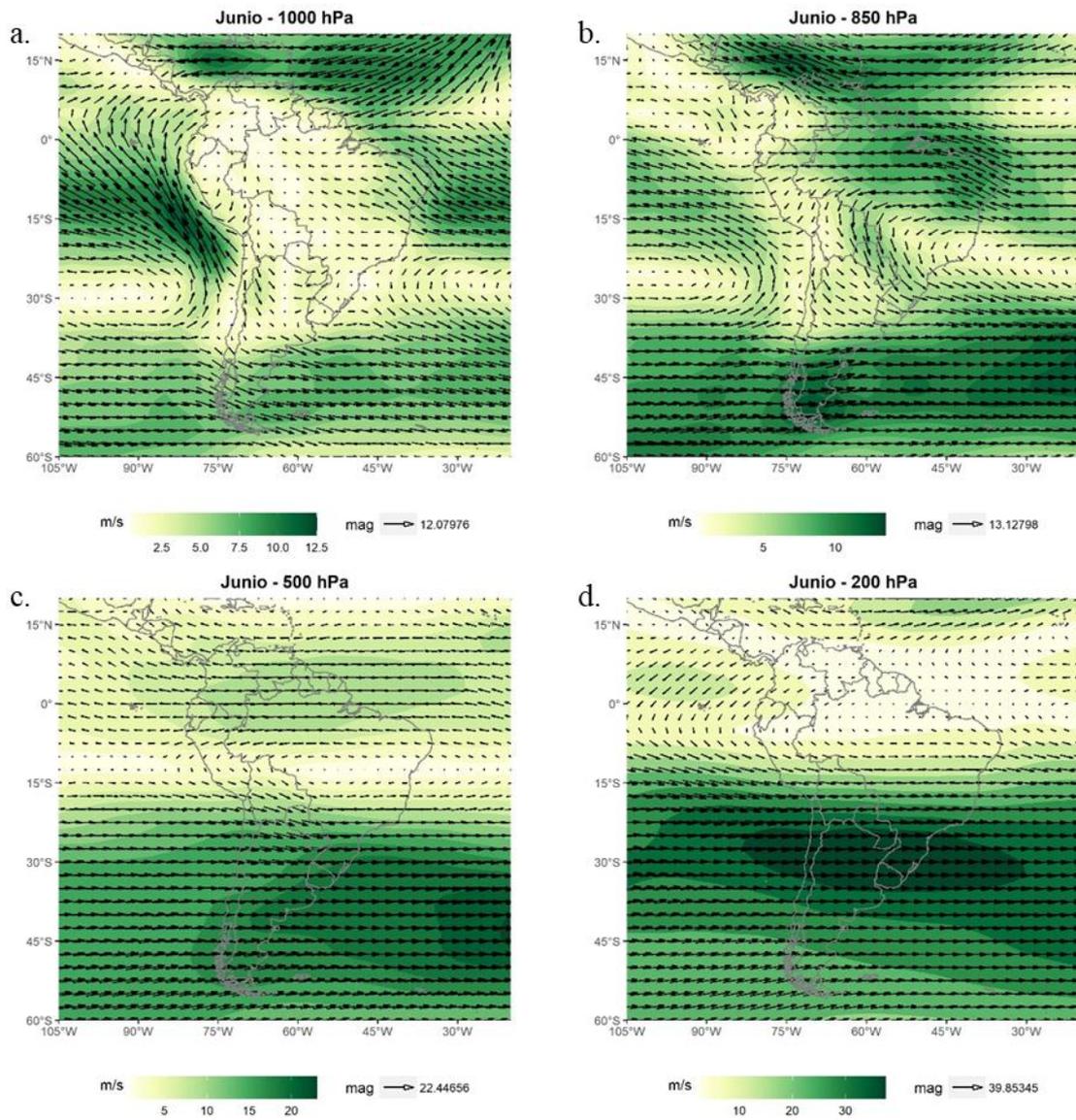


Figura 40. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de junio en el periodo 2002-2018.

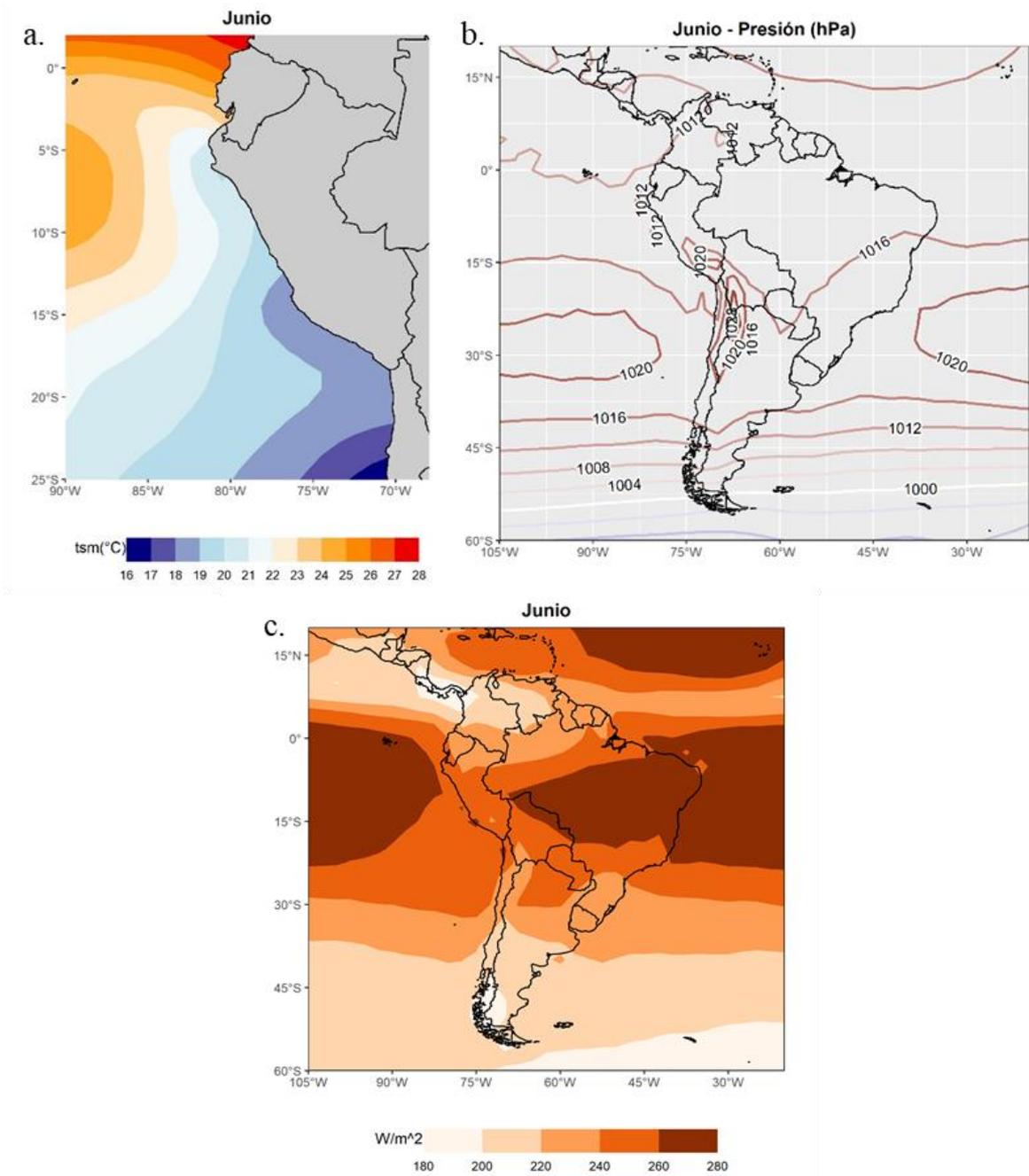


Figura 41. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de junio en el periodo 2002-2018.

4.2.3. Análisis para la estación de invierno

En el mes de julio, (ver Figura 42a) se observa que la temperatura promedio del aire en la cuenca amazónica es mayor a 25°C. Esto indica que la condición para formar nubes sigue prevaleciendo en ésta y otras partes del continente. A nivel de superficie (Figura 42b), se observa que la humedad relativa promedio en la parte central Brasil es bajo y parte de la cuenca amazónica está disminuyendo. Esto provoca que la formación de nubes en esta parte del continente no se dé con mucha frecuencia para la Sierra y Selva de Perú. Además, se observa una masa de aire seco cálido entre el sur de Perú y Chile. En niveles medios (Figura 42c), se observa que la humedad relativa promedio es muy bajo en la parte central del continente debido a la presencia de aire seco; en la cuenca amazónica va disminuyendo su valor. Esto no permitirá que la formación o crecimiento de las nubes sea muy frecuente para el territorio de Perú. En niveles altos (Figura 42b), se observa que la humedad relativa promedio en el continente (incluido la cuenca amazónica) es bajo debido a las mismas condiciones vistas en niveles medios. Esto hace indicar que no habrá mucha formación o crecimiento de las nubes en el continente en los diferentes niveles, así como en todo el territorio de Perú.

La Figura 43b, en niveles bajos, se observa que las condiciones del viento se mantienen con respecto al mes anterior. En la cuenca amazónica, la dirección del viento es hacia el oeste llegando de manera perpendicular a los andes y formando las nubes de forma orográfica en la Sierra y por convección en la Selva, ambos en la zona norte del Perú. En niveles medios (Figura 43c), se observa el giro antihorario del viento en el centro de Brasil que, por el Norte advecta temperatura o humedad hacia la Sierra y Selva de Perú, y por el Sur, advecta masa de aire seco que proviene del Pacífico al continente. En niveles altos (Figura 43d), se observa la Corriente en Chorro subtropical dentro del continente y que advecta la masa de aire seco que se encontraba en el Pacífico al continente y afecta al Sur de Perú en la formación de nubes.

Para la costa de Perú, la temperatura superficial promedio del mar está entre 18 – 21°C en todo el litoral (Figura 44a). Es menor comparado al mes anterior y esta disminución permite la formación de nubes principalmente en el Sur y Centro porque el APS, con su influencia en el viento a nivel de superficie (ver Figura 43a), advecta la masa de aire seco cálido que se encontraba en el norte de Chile (Figura 42b) hacia el Noroeste y se condensa al pasar por una superficie fría permitiendo que se forme una cobertura nubosa notable.

Los valores de radiación de onda larga (Figura 44c) se mantienen superiores a 260 W/m^2 , lo que indica que hay una baja frecuencia de formación de nubes debido a las bajas concentraciones de humedad vistas en el continente, así como en diferentes niveles de la atmosfera. Por ende, no hay una cobertura nubosa notable, principalmente en la cuenca amazónica que impida la salida de esta radiación. El ZCIT se desplaza hacia el norte (Figura 43a y 44c), lo que favorece a que no haya mucha cobertura nubosa en la cuenca amazónica.

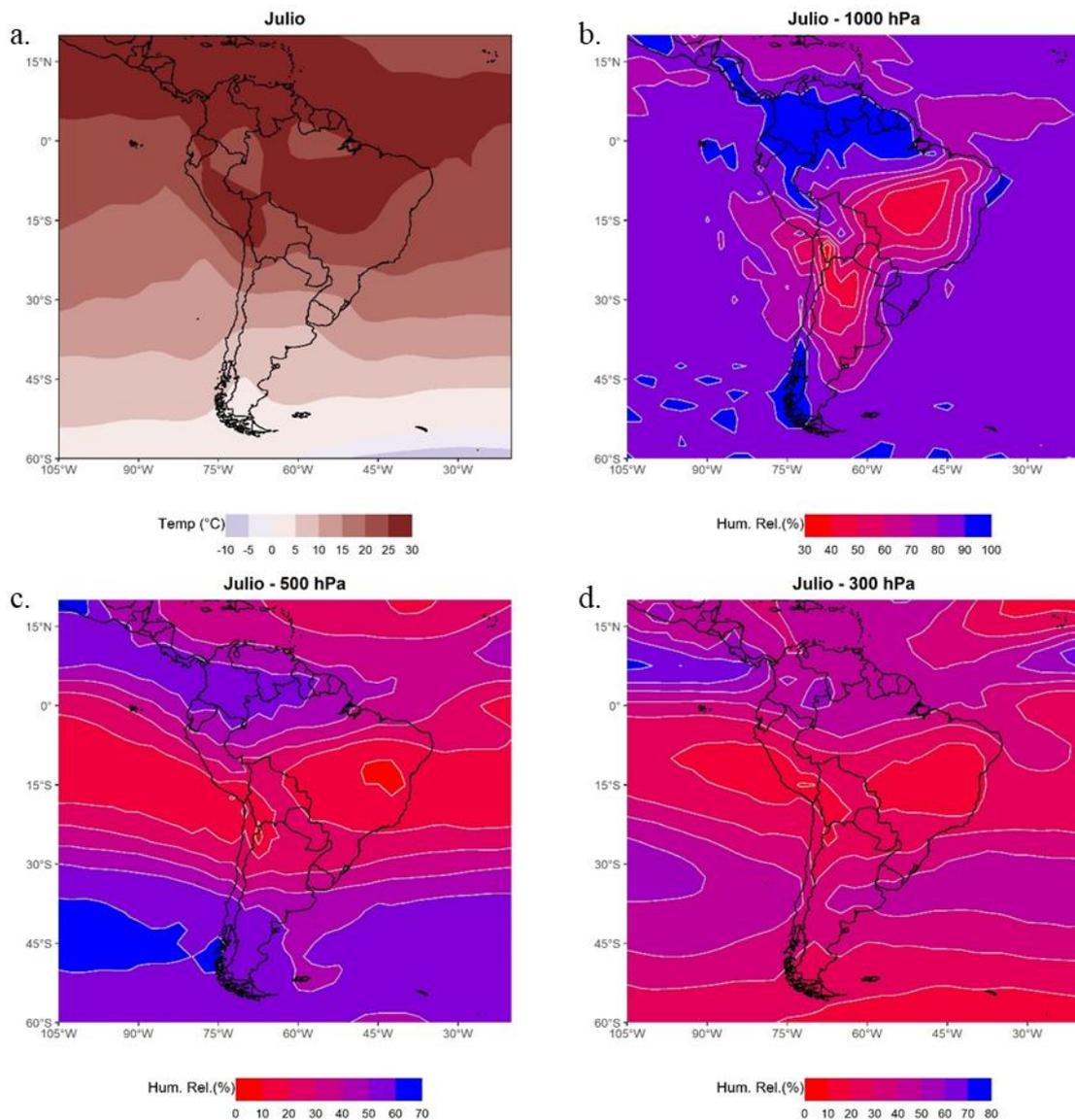


Figura 42. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de julio en el periodo 2002-2018.

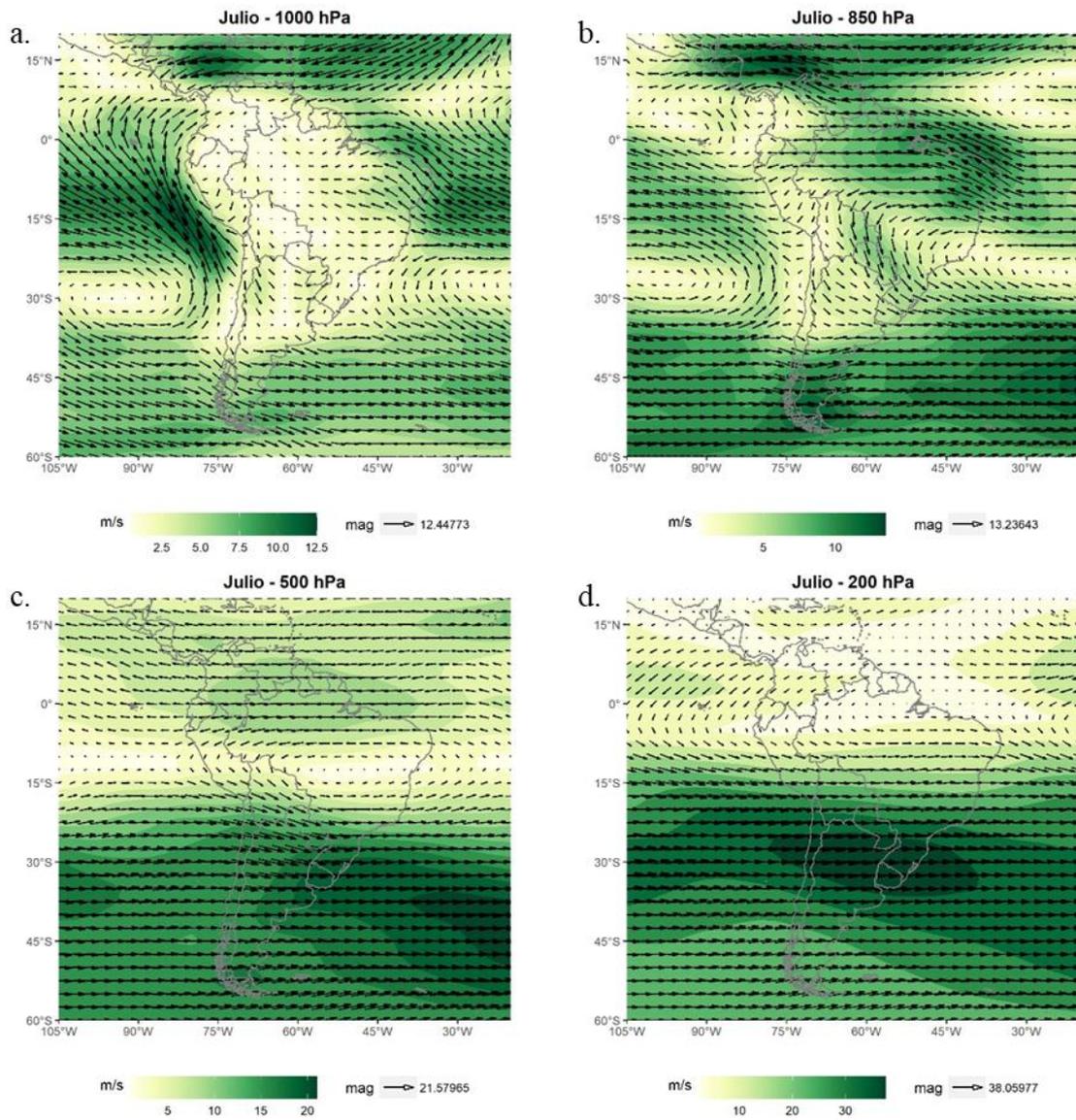


Figura 43. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de julio en el periodo 2002-2018.

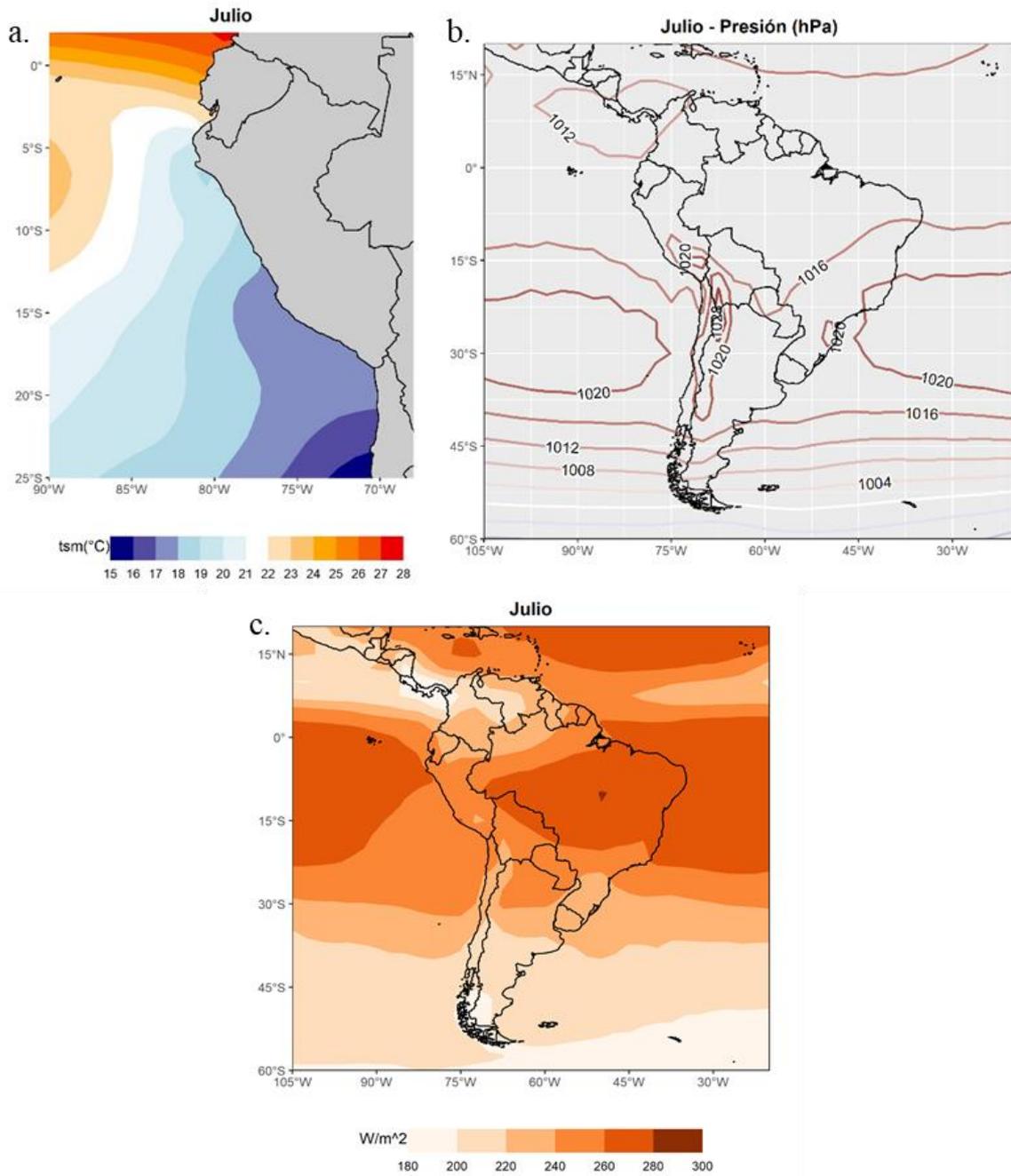


Figura 44. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de julio en el periodo 2002-2018.

En el mes de agosto (ver Figura 45a), se observa que la temperatura promedio del aire es superior a 25°C en la cuenca amazónica. Esta condición sigue prevaleciendo por lo que favorece la formación de nubes en esta parte del continente. A nivel de superficie (Figura 45b), se observa que la humedad relativa promedio en gran parte del continente, incluyendo la cuenca amazónica, tiene valores bajos a comparación del mes anterior. Esto indica una baja frecuencia para formar nubes en esta zona, por lo que, tanto la Selva como la Sierra del Perú se ven afectados con poca cobertura nubosa. En niveles medios (Figura 45c), se observa que se mantiene con valores bajos de humedad relativa promedio (menores a 30%) en la parte central del continente y en la cuenca amazónica, por lo que no favorece la formación de nubes en casi todo el territorio de Perú. En niveles altos (Figura 45d), se observa el mismo patrón que se vio en niveles medios, baja humedad en casi todo el continente, así como en la cuenca amazónica. Esto no aporta a la formación o crecimiento de las nubes en casi todo el territorio peruano.

Con respecto al viento, en niveles bajos (ver Figura 46b) se observa que mantiene las mismas condiciones vistas con respecto al mes anterior; en la cuenca amazónica, el viento tiene dirección del este que advecta humedad y temperatura, y llega de forma perpendicular a la cordillera lo que provoca la formación de nubes por ascenso orográfico en la Sierra y por convección en la Selva, ambos en la zona norte. En niveles medios (Figura 46c), se observa que se mantiene la circulación anti horaria del viento que se encuentra entre el límite de Bolivia y Brasil. Esta circulación permite, por el norte la advección de humedad o desplazamiento de las nubes, y por el sur, la advección de aire seco que proviene del Pacífico hacia el continente. En niveles altos (Figura 46d), se observa que la Corriente en Chorro subtropical tiene un desplazamiento hacia el Sur, pero mantiene sus condiciones como en el mes anterior, y que traslada masa de aire seca que se encuentra en el Pacífico hacia el continente. Estas condiciones mencionadas indican que la formación de nubes disminuye de manera considerable en todo el territorio del Perú, en los diferentes niveles de la atmósfera al igual que el mes anterior.

Para la costa de Perú, se observa que la temperatura promedio superficial del mar es entre 17 – 21°C en todo el litoral (Figura 47a), lo cual indica que disminuye con respecto al mes anterior. Esta disminución favorece la formación de nubes gracias a la intervención del APS. Este sistema influye en el viento a nivel de superficie (Figura 46a), permitiendo la advección de masa de aire seca cálida que se ubica en el Norte y Centro de Chile en dirección al

Noroeste y cruce las aguas frías del océano. Esta interacción del aire seco cálido sobre una superficie fría hace que se condense y se enfríe formando las nubes bajas en el Sur de Perú.

En la Figura 47c, se observa que los valores de Radiación de onda larga mantienen las condiciones que se vieron en el mes anterior. Los valores siguen siendo superior a 260 W/m^2 indicando la poca cobertura nubosa que se manifiesta en el continente, así como en la cuenca amazónica. Además, el ZCIT se encuentra aproximadamente entre los 10°N y 15°N (Figura 46a y 47c), lo que provoca poca cobertura nubosa en esta región del continente, ya que se encuentran más al norte.

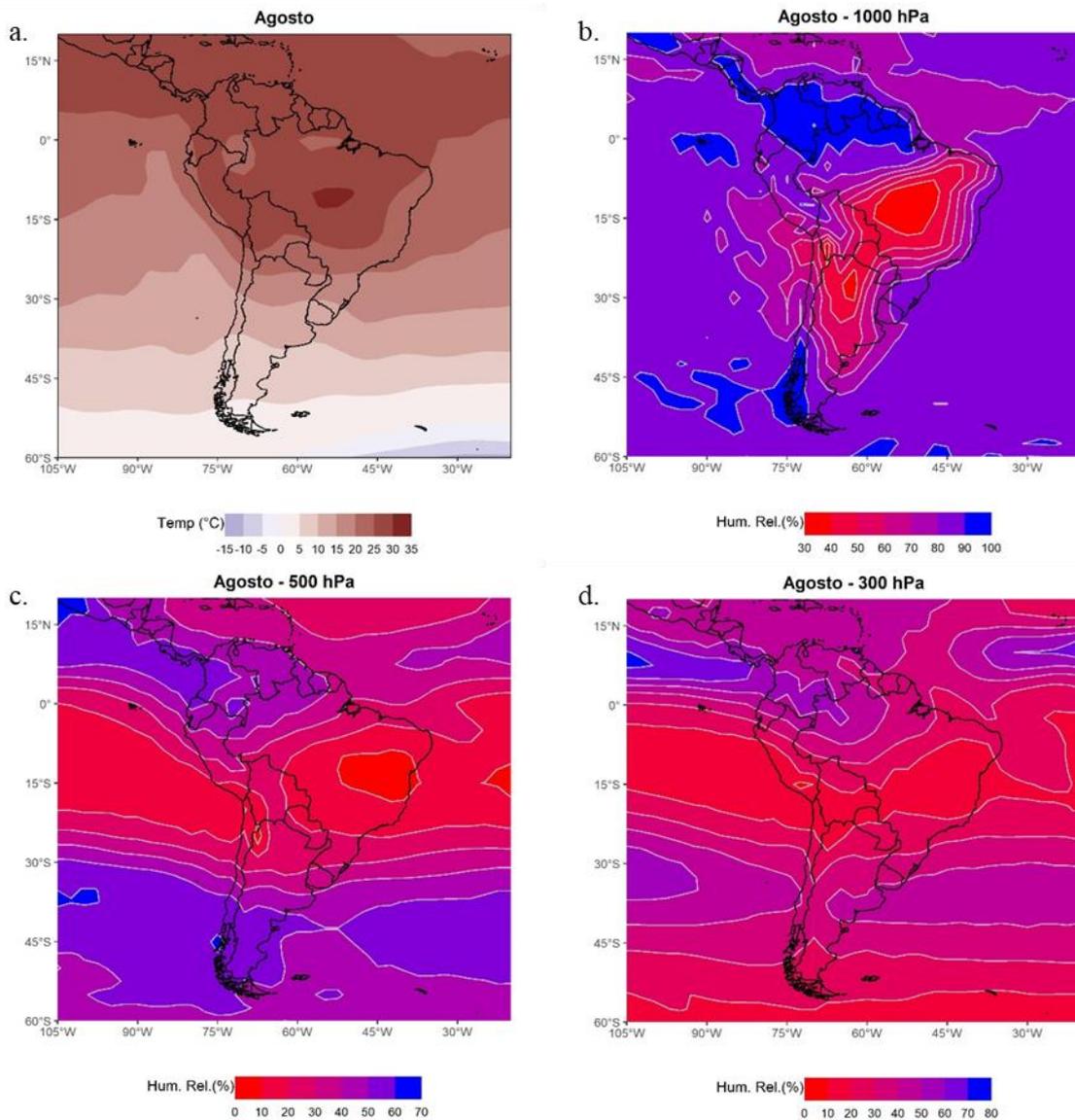


Figura 45. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmósfera para el mes de agosto en el periodo 2002-2018.

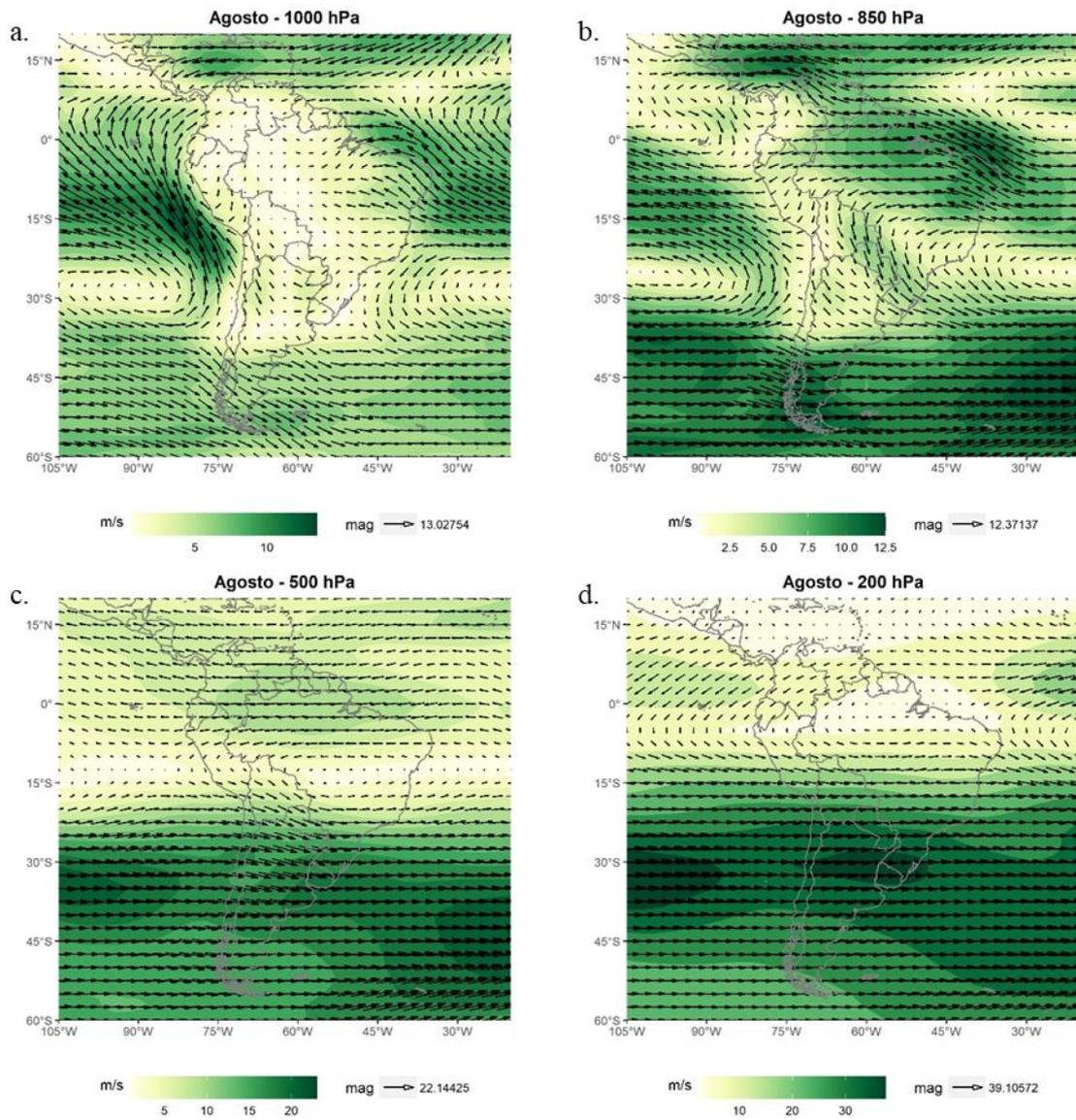


Figura 46. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de agosto en el periodo 2002-2018.

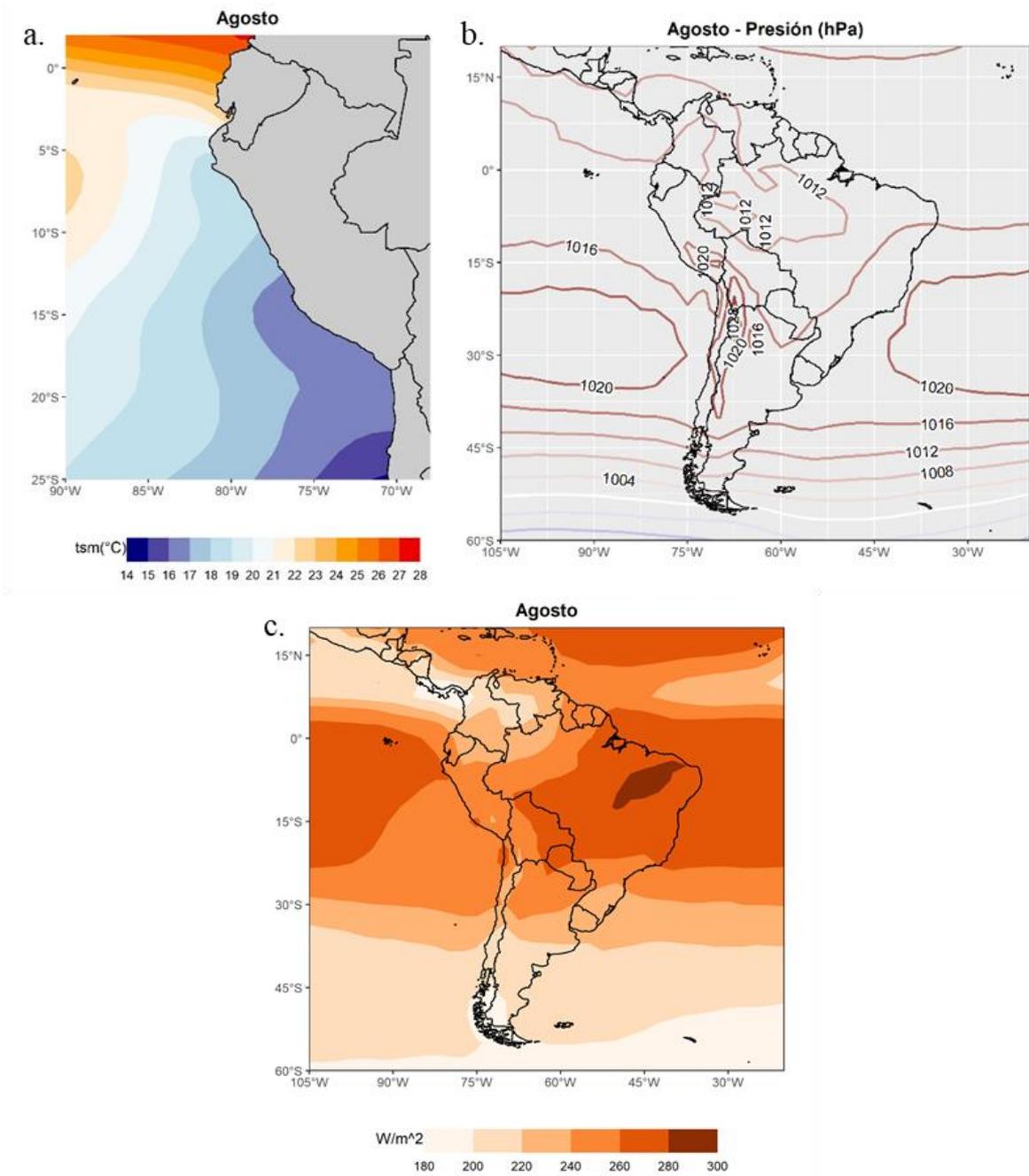


Figura 47. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de agosto en el periodo 2002-2018.

En el mes de setiembre, se observa en la Figura 48a que la temperatura promedio del aire sigue siendo mayor a 25°C en la parte tropical del continente y en toda la cuenca amazónica, lo cual favorece la formación de nubes. A nivel de superficie (Figura 48b), se observa que las condiciones de humedad relativa promedio se mantienen con respecto al mes anterior; casi todo el continente tiene bajos valores de humedad (menor a 50%) como en el lado oriental de Brasil, así como el límite entre Perú y Chile, y Argentina; también en la cuenca amazónica hay un bajo nivel de humedad (menor a 70%), lo que no permite la formación de nubes en la Selva de Perú. En niveles medios (Figura 48c), se observa que se mantiene la misma condición del mes anterior con respecto a la humedad, valores menores al 40% de humedad en la parte central del continente por ingreso de una masa de aire seca del océano al igual que en la cuenca amazónica. En niveles altos (Figura 48d), se observa la misma condición de humedad que en niveles medios; bajos valores de humedad en la parte central del continente lo que no permite la formación de nubes. Por otro lado, se observa un ingreso de una masa de aire con humedad (mayor al 60%) por Colombia hacia la cuenca amazónica lo que favorece la formación de nubes. Estas condiciones mencionadas en los diferentes niveles de la atmosfera, aun no favorecen de manera frecuente la formación de nubes, lo que provoca que la cobertura nubosa sea muy poca o casi nada en el continente.

En la Figura 49b, con respecto al viento en niveles bajos, se observa que el viento mantiene su condición con respecto al mes anterior, donde la dirección es hacia el oeste de la cuenca amazónica y que advecta humedad y temperatura o traslada nubes hacia la Selva, zona norte del Perú; además, llega de forma perpendicular a los andes provocando la formación de nubes por ascenso orográfico en la zona norte. En niveles medios (Figura 49c), se observa que aún prevalece la circulación antihoraria del viento que se vio en los meses anteriores permitiendo, por el norte la advección de humedad o transporte de las nubes en dirección hacia el oeste de la cuenca amazónica; y por el sur advecta aire seco que proviene del Pacífico hacia el continente. En niveles altos (Figura 49d), se observa la influencia del Jet subtropical que se mantiene en las mismas condiciones del mes anterior y que advecta aire seco del Pacífico al continente.

Para la costa peruana, la temperatura superficial promedio del mar es entre 17 – 20°C en todo el litoral como se ve en la Figura 50a. Las condiciones se mantienen con respecto al mes anterior y el enfriamiento se mantiene en el Centro y Sur de la Costa. El APS es más intenso en este mes (Figura 50b), por lo que el viento a nivel de superficie (Figura 49a) va a tener una mayor velocidad para transportar masa de aire seca y cálida del norte de Chile

hacia el norte. Al pasar por una superficie fría provoca que el aire se enfríe y aumenté su humedad, condensándose y provocando la cobertura nubosa en la zona centro y sur de la Costa de Perú.

En la Figura 50c, los valores de Radiación de onda larga empiezan a disminuir ligeramente en la cuenca amazónica (menor a 260 W/m^2). Esto indica que la formación de nubes se está dando de forma gradual, ya que su presencia impide la salida de ésta por la cobertura nubosa que se está formado, tanto en la cuenca misma como en otra zona del continente. Además, el ZCIT mantiene su posición con respecto al mes anterior (Figura 49a y 50c), por lo que la cobertura nubosa es poca en esta parte del continente.

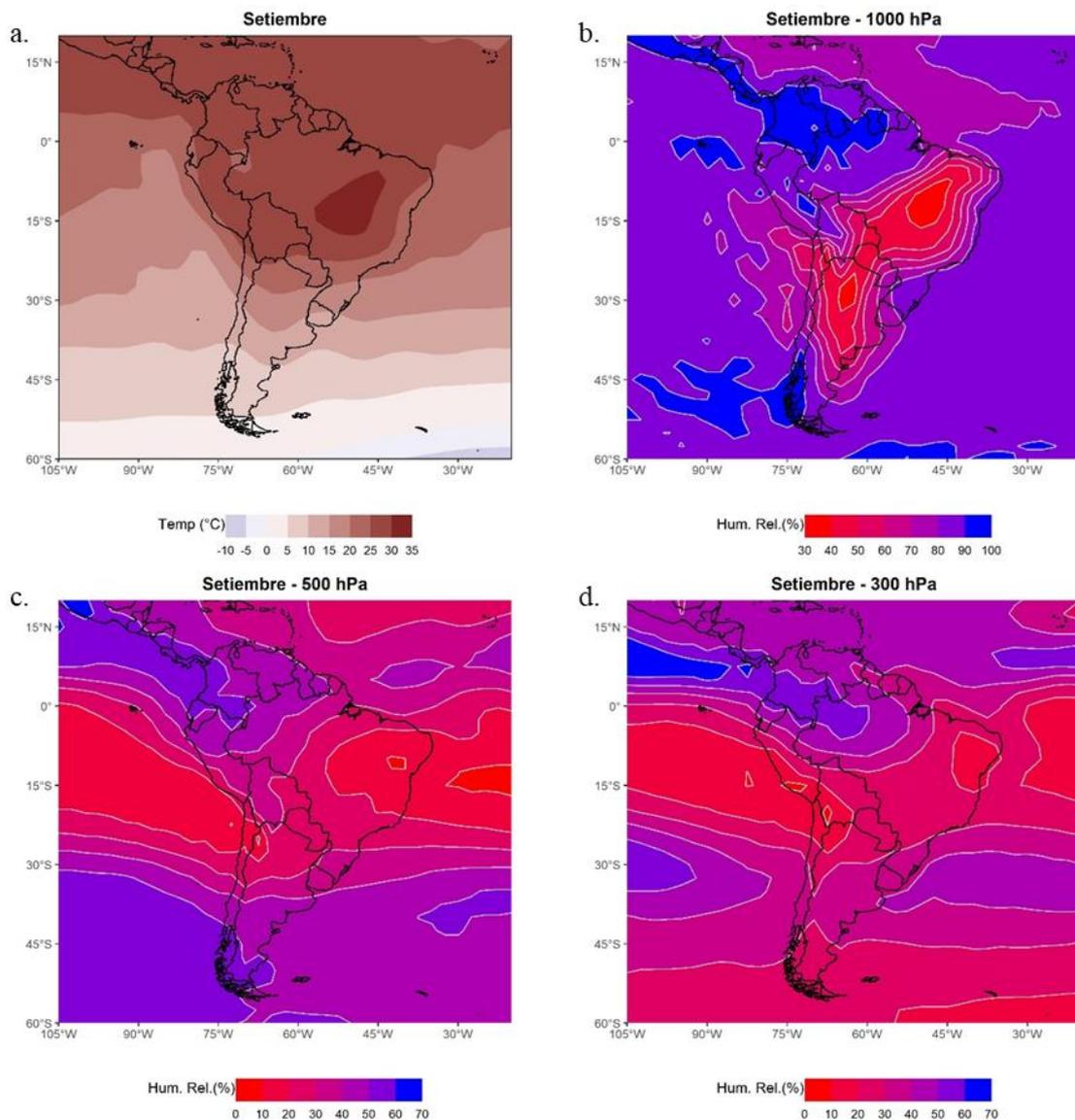


Figura 48. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmósfera para el mes de setiembre en el periodo 2002 – 2018.

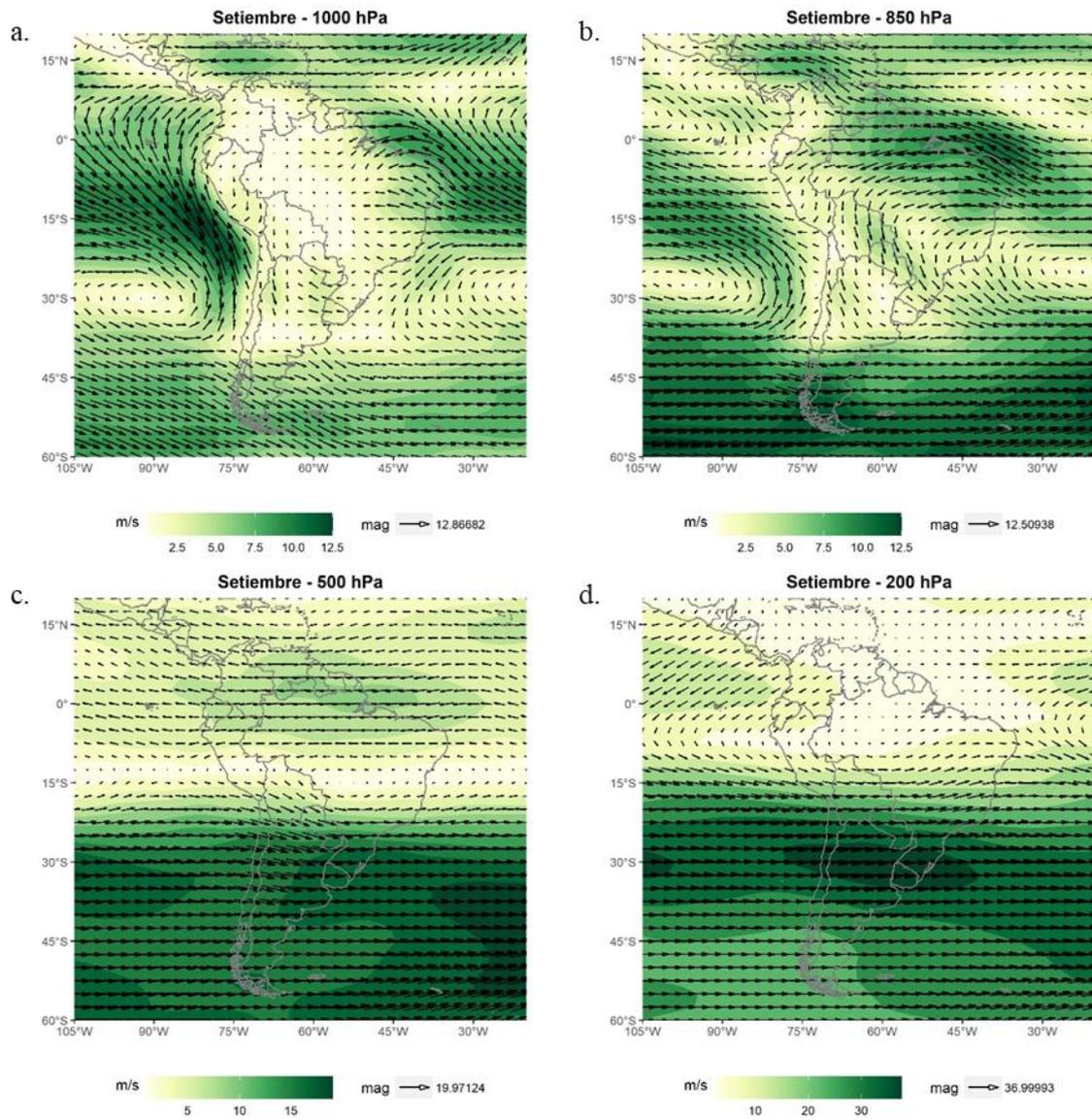


Figura 49. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de setiembre en el periodo 2002 – 2018.

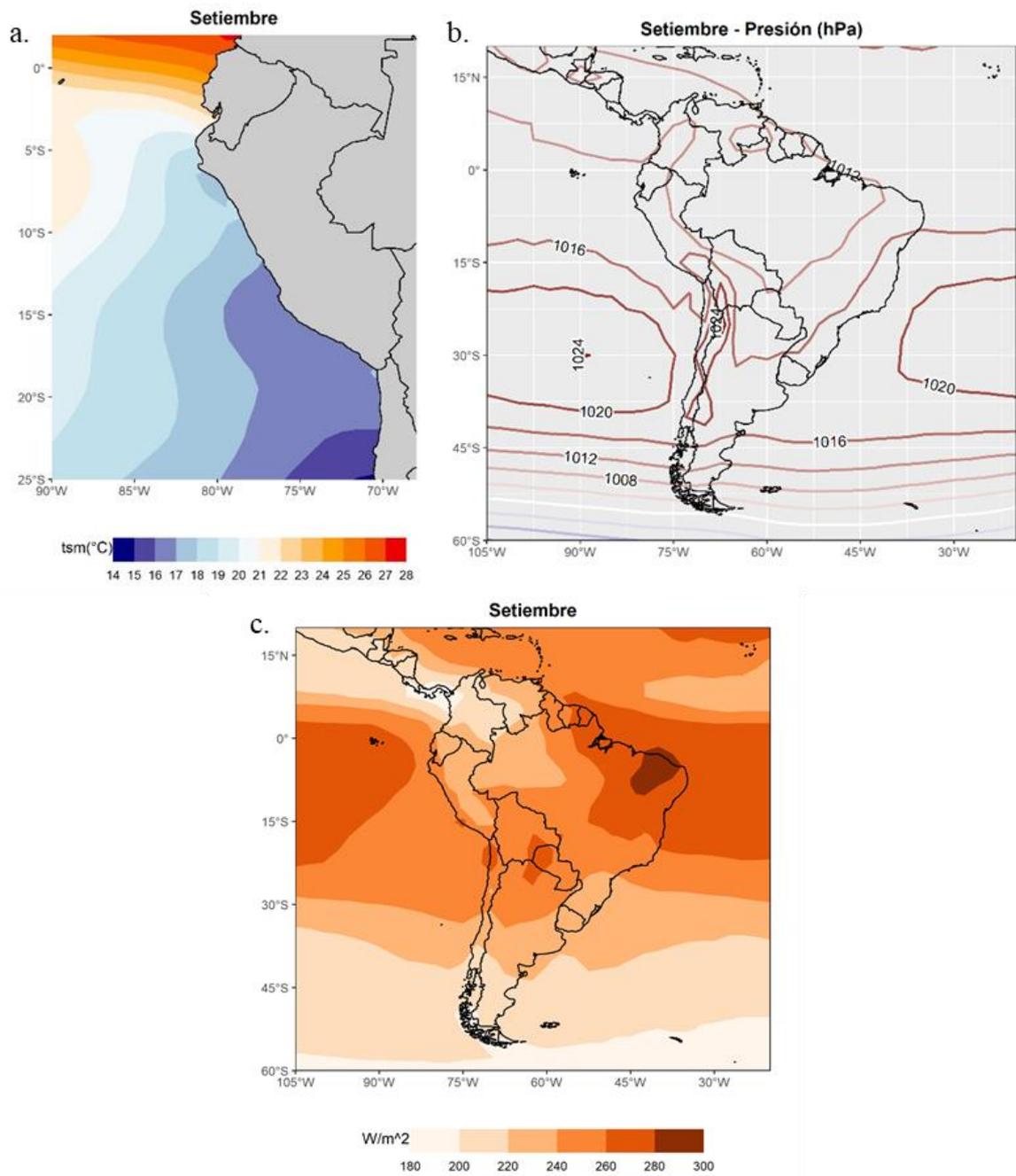


Figura 50. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de setiembre en el periodo 2002 – 2018.

4.2.4. Análisis para la estación de primavera

Para el mes de octubre, en la Figura 51a se observa que la temperatura promedio del aire es mayor a 25°C en la cuenca amazónica, así como la parte norte y centro del continente, lo que indica que sigue prevaleciendo la formación de nubes. A nivel de superficie, se observa que en la cuenca amazónica (Figura 51b), la humedad relativa promedio se incrementa de manera progresiva lo cual favorecería la formación de nubes y se empieza a incrementar la cobertura nubosa. Por otro lado, en el lado oriental del continente aún prevalece la baja humedad como en Brasil, la presencia de una masa de aire seca cálida en Chile, Argentina, Bolivia y Paraguay no permitirá que se formen nubes y no haya cobertura nubosa. En niveles medios (Figura 51c), se observa que ya ingresó la masa de aire al continente con cierta humedad por Colombia hacia la cuenca amazónica, lo que hace indicar que permitirá la formación de nubes en este nivel o el desarrollo vertical de las mismas; por otro lado, se observa una masa de aire seca en el Pacífico Central que se desplaza un poco al Sur y que ingresa al continente, lo que no permitirá la formación o crecimiento de nubes en el Sur y Centro de Perú en este nivel. En niveles altos (Figura 51d), se observa el mismo comportamiento que en niveles medios, un ingreso de masa de aire con humedad por Colombia hacia la cuenca amazónica lo que permitirá la formación de nubes o su crecimiento; por otro lado, el ingreso de una masa de aire seco del Pacífico Central hacia el continente con dirección al sureste, provoca la poca formación de nubes o no permita su crecimiento en este nivel en el Centro y Sur de Perú.

En la Figura 52b, en niveles bajos, se observa que el viento que proviene de la cuenca amazónica de Brasil hacia Perú cambia su dirección cuando llega a la cordillera de los Andes en su mismo sentido que es hacia el sureste. Este movimiento hace que advectione humedad y temperatura que permite la formación de nubes por convección en la Selva y por ascenso orográfico en la Sierra del Perú. En niveles medios (Figura 52c), se observa que la circulación antihoraria del viento entre Brasil y Bolivia está desapareciendo; pero que por el norte aún permite la advección de humedad de la región amazónica de Brasil hacia la Selva de Perú; y por el sur se observa el ingreso de la masa de aire seca del Pacífico al continente debido a la acción del viento y que disminuye la frecuencia para formar nubes en el sur del Perú. En niveles altos (Figura 52d), se observa que hay una circulación antihoraria del viento entre Bolivia y Brasil, pero el comportamiento aún se mantiene con respecto al mes anterior, donde el jet subtropical traslada masa de aire seca del Pacífico hacia el continente en

dirección al Sureste. Esto no permitirá que se formen las nubes o permita su crecimiento en el Sur de Perú.

En la costa peruana, la temperatura superficial promedio del mar es entre 18 – 21°C (Figura 53a). Se observa que los valores de temperatura del mar aumentan con respecto al mes anterior, pero el enfriamiento sigue en el Sur y Centro. El APS (Figura 53b), con acción del viento a nivel de superficie (Figura 52a), advecta aire seco y cálido del norte de Chile hacia el Noroeste. Al pasar por una superficie fría como el mar provoca que el aire se vuelva húmedo y se condense, para luego formar una cobertura nubosa en esta zona de la Costa de Perú. Este enfriamiento del mar favorece la formación de nubes en el Pacífico oriental.

En la Figura 53c, se observa que los valores de Radiación de onda larga siguen disminuyendo en la cuenca amazónica (menor a 240 W/m²). Esto indica que la frecuencia de la formación de nubes se está incrementando de manera progresiva debido al incremento de humedad relativa que se vio en los tres niveles de la atmósfera en esta zona del continente mencionado anteriormente. Además, el ZCIT se desplazó hacia el sur con respecto al mes anterior (Figura 52a), lo que aumenta la cobertura de nubes en la región amazónica.

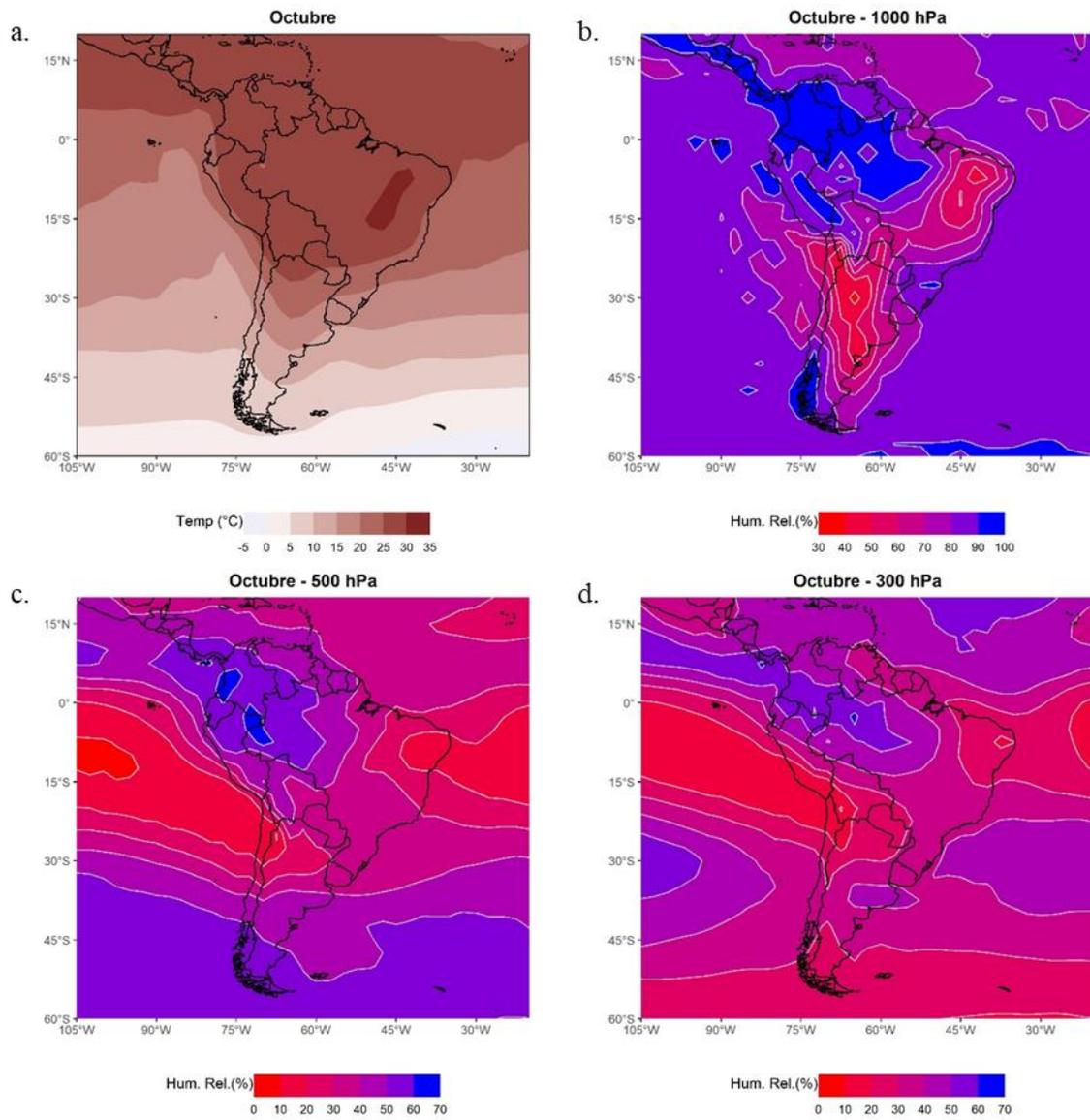


Figura 51. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de octubre en el periodo 2002 – 2018.

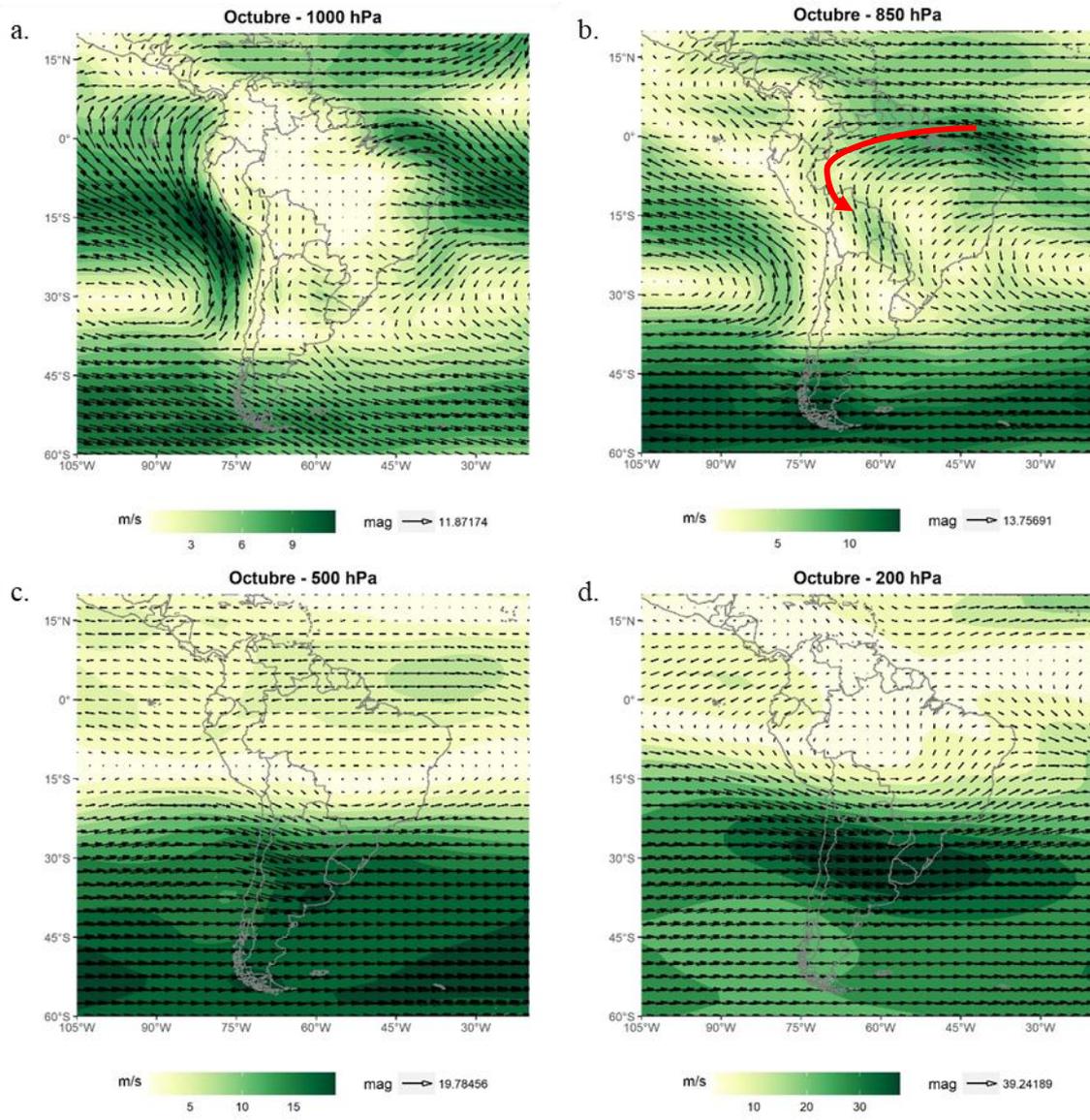


Figura 52. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de octubre en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).

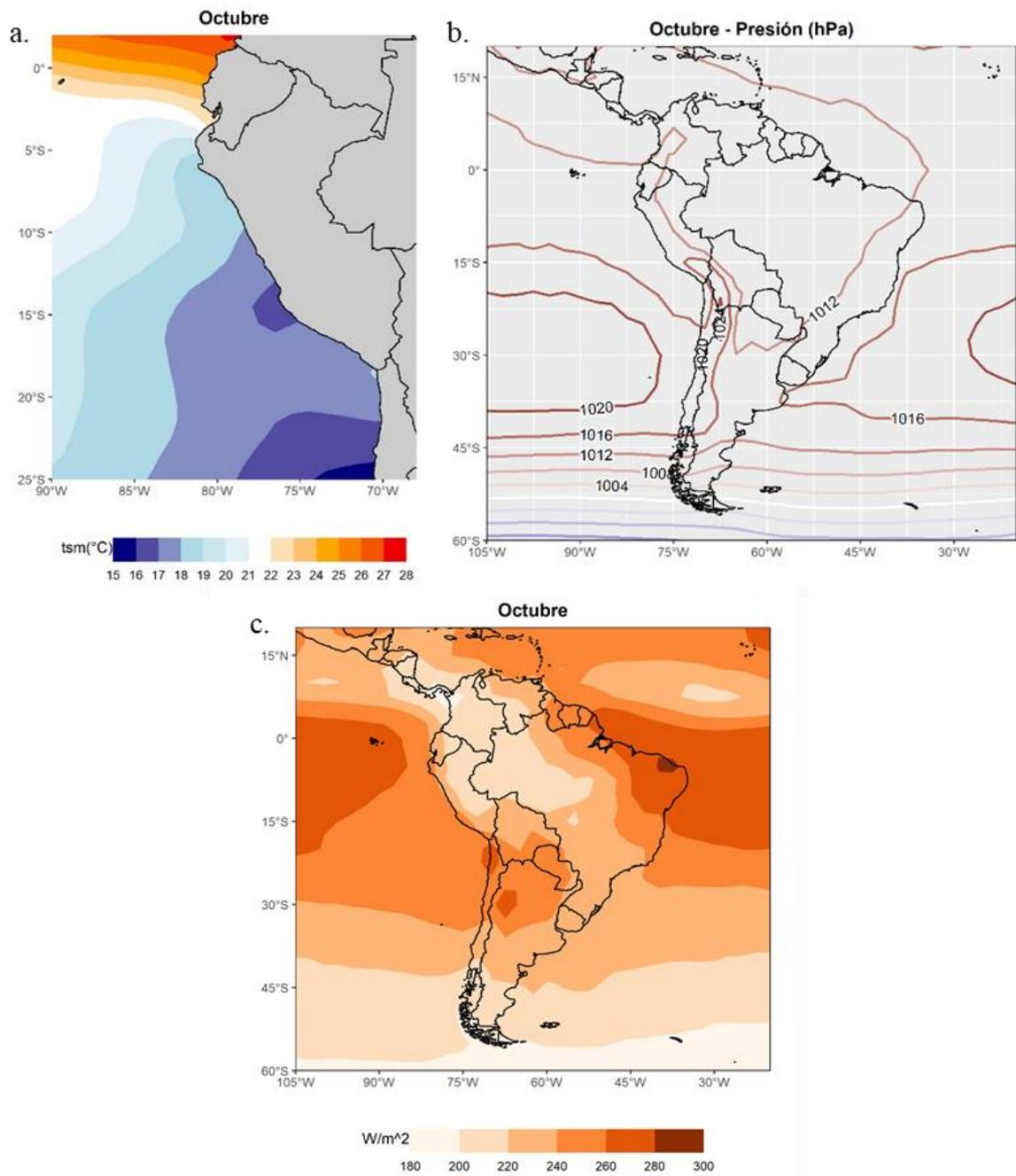


Figura 53. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de octubre en el periodo 2002 – 2018.

En el mes de noviembre, en la Figura 54a se observa que la temperatura promedio del aire se mantiene superior a 25°C en la cuenca amazónica y en otras partes del continente. Esto hace indicar que sigue estando la iniciativa para que se desarrollen las nubes por diversos mecanismos. A nivel de superficie (Figura 54b), se observa que la humedad relativa promedio empieza a incrementarse tanto en la cuenca amazónica como en otros países que poseen la Amazonia, principalmente Brasil; esto permitirá que empiece a incrementar la frecuencia de desarrollo de las nubes tanto en la Selva y Sierra del Perú, por convección y ascenso orográfico, respectivamente. Por otro lado, se observa que prevalece una masa de aire seco cálida entre Argentina y Chile, y en el Noreste de Brasil. En niveles medios (Figura 54c), se observa que la masa de aire con humedad que entro por Colombia ya se ubica en la cuenca amazónica entre Brasil, Perú y Colombia, lo que permitirá en cierta forma que se pueda formar nubes o favorezca el crecimiento de las mismas en este nivel tanto en la Selva y Sierra del Perú. También se observa el ingreso de una masa de aire seco proveniente del Pacífico Central hacia el continente con dirección del Noroeste y que se desplaza un poco hacia el sur con respecto al mes anterior. Esto no permite el desarrollo de nubes en el Sur de Perú en este nivel. En niveles altos (Figura 54d), se observa el mismo comportamiento que en niveles medios; la presencia de una masa de aire con humedad (mayor a 60%) en la cuenca amazónica que puede favorecer el desarrollo de las nubes por convección o su posible crecimiento en la Selva, así como, el desarrollo de estas mismas por ascenso orográfico en la Sierra. También se observa una masa de aire seco que proviene del Pacífico Central con dirección del Noroeste y, además, tiene un pequeño desplazamiento hacia el Sur con respecto al mes anterior. Esto no permitirá la formación o crecimiento de las nubes en el Sur de Perú.

En la Figura 55b se observa que el viento, en niveles bajos, proveniente de la cuenca amazónica hacia la Selva de Perú empieza a aumentar su velocidad y esta advectando humedad y temperatura permitiendo se desarrollen las nubes por convección, y el cambio en su dirección hacia el Sureste es debido al bloqueo de los Andes y provoca la formación de nubes por ascenso orográfico en la Sierra de Perú. Este suceso en el viento viene a ser SALLJ. En niveles medios (Figura 55c), se observa que la circulación antihoraria del viento visto anteriormente se desvaneció. Por lo que no hay una distribución de humedad y la atmosfera queda estable, lo que no permitirá o influirá en la formación de nubes principalmente en el Sur de Perú debido a la presencia de masa de aire seco. En niveles altos (Figura 55d), se observa en el centro del continente (entre Bolivia y Brasil), una circulación antihoraria del viento que hace referencia a AB. Esta circulación aún no genera mucha

influencia por el norte de su centro; en cambio por el sur, se observó que la Corriente en Chorro Subtropical se desplaza al sur por la presencia de esta circulación, y genera advección de masa de aire seco del Pacífico al continente, lo que no permitirá el desarrollo o crecimiento de nubes en el Sur de Perú.

En la costa de Perú, se observa que la temperatura superficial promedio del mar es entre 19 – 22°C en el todo el litoral (Figura 56a). Este incremento de la temperatura del mar se da progresivamente lo cual indica una disminución en la formación de nubes, pero aún se mantiene el enfriamiento del mar. El APS se desplaza hacia el sur (Figura 56b), pero su influencia en el viento, a nivel de superficie, permite la advección de aire seco y cálido del Norte de Chile hacia el Noroeste (Figura 55a). Al pasar por una superficie fría permitirá que el aire se enfría y se condense permitiendo que se forme una cobertura nubosa.

Se observa que los valores de Radiación de onda larga en la cuenca amazónica están disminuyendo, y están por debajo de 220 W/m² (ver Figura 56c). Esto indica que la formación de nubes se está dando de forma regular en esta parte del continente debido al incremento de la humedad; además, al impedir la salida de esta radiación muestra que es un buen indicador para señalar la existencia de una cobertura nubosa. El ZCIT se desplaza hacia el sur con respecto al mes anterior (Figura 55a). Esto favorece a que la formación de nubes se incremente en esta zona del continente por los bajos valores de Radiación de onda larga, lo que indica la presencia de cobertura nubosa.

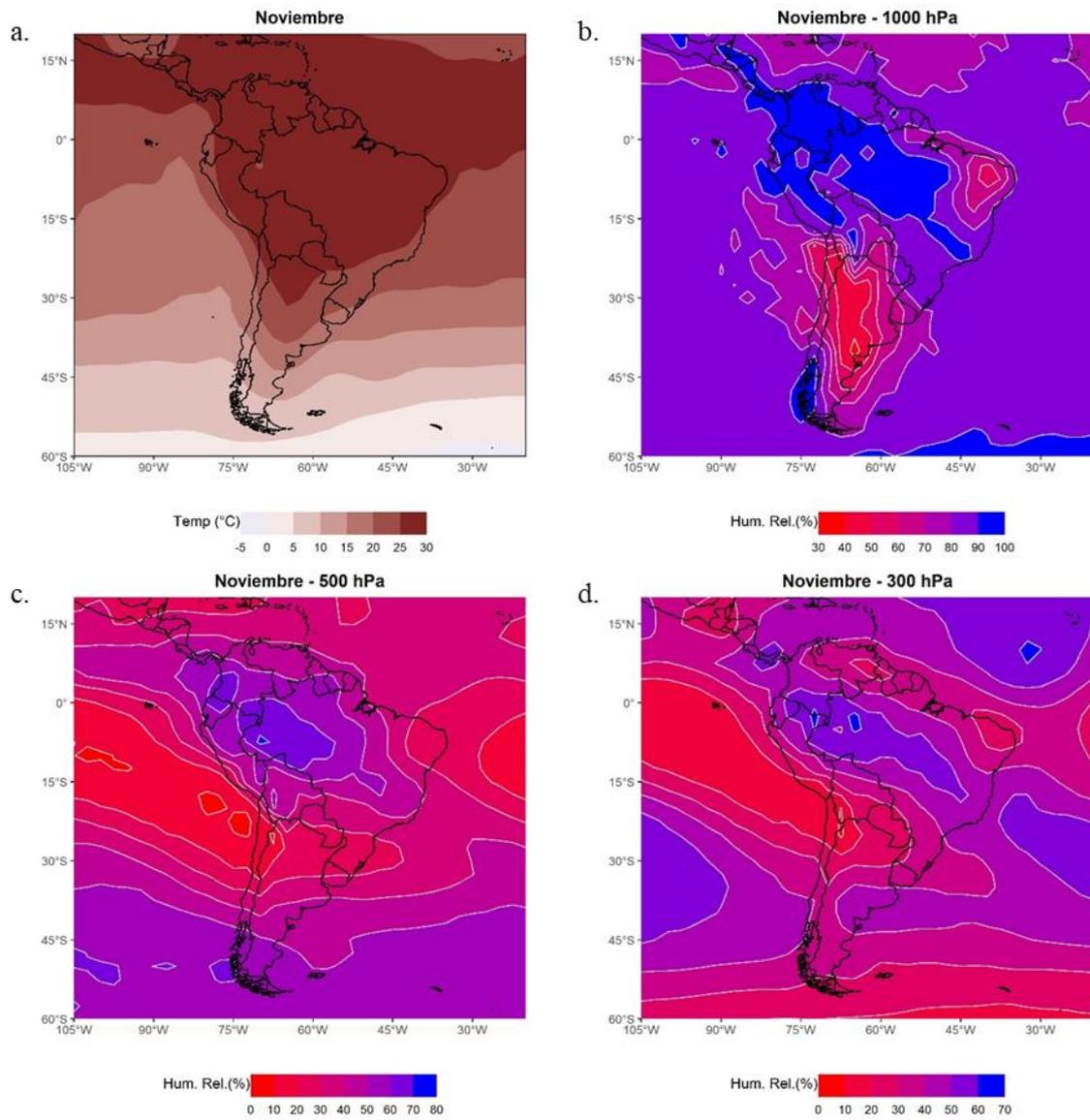


Figura 54. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de noviembre en el periodo 2002 – 2018.

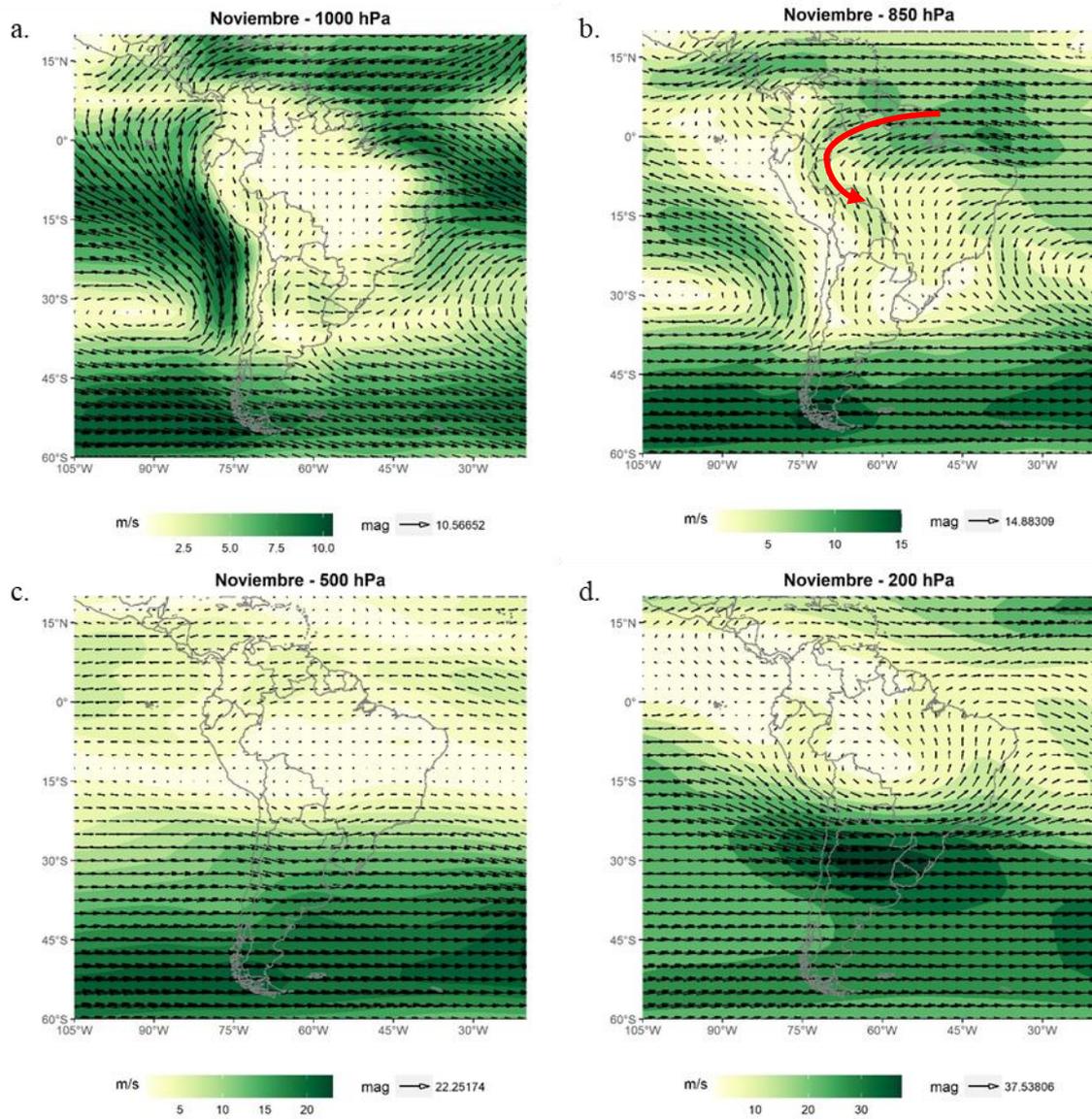


Figura 55. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de noviembre en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).

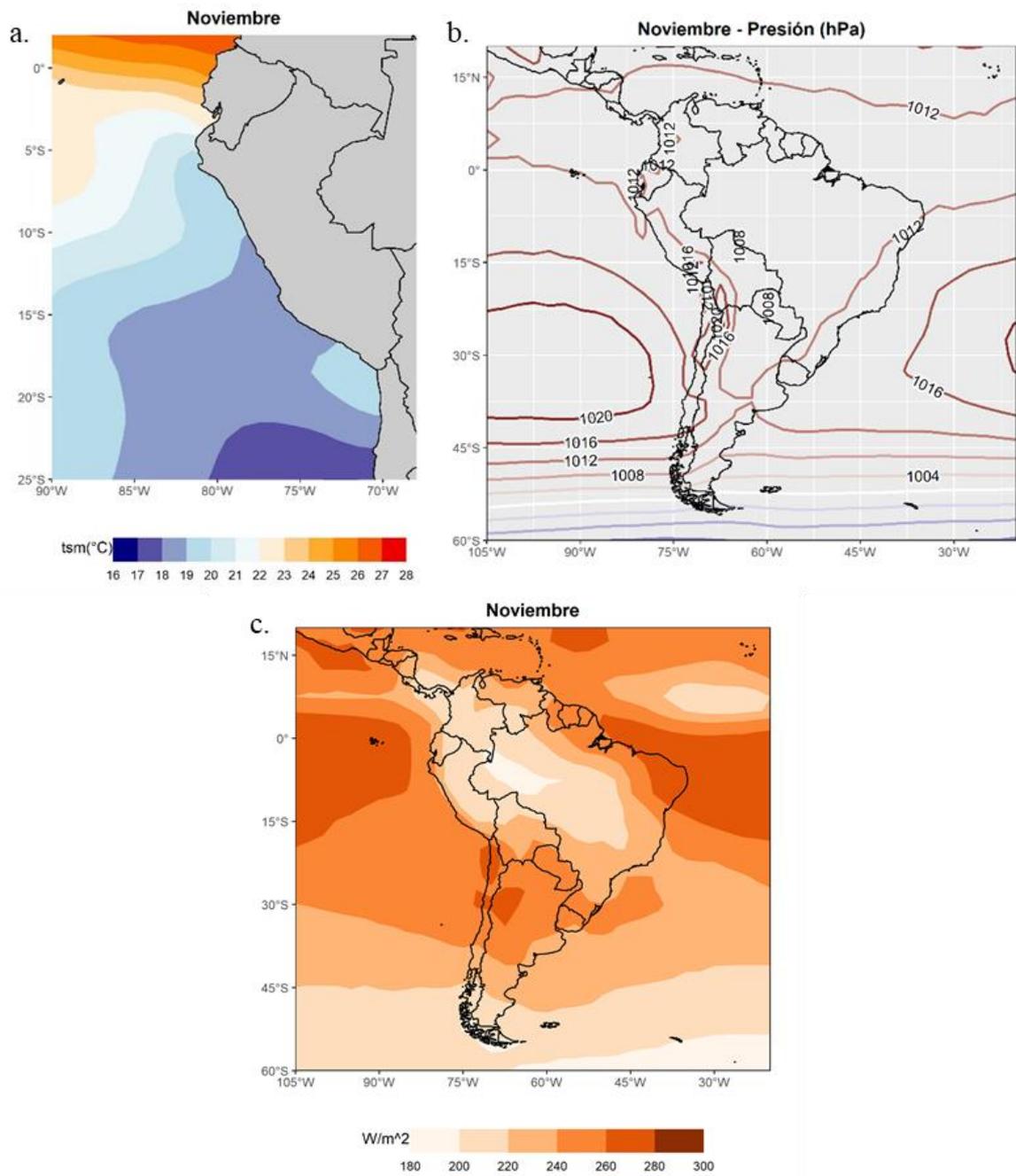


Figura 56. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de noviembre en el periodo 2002 – 2018.

En el mes de diciembre, se observa en la Figura 57a, que la temperatura promedio del aire sigue siendo superior a 25°C en la cuenca amazónica, así como en la mayor parte del continente. Esto hace indicar que durante todo el año está la iniciativa para la formación de nubes, ya que es la única variable que no ha cambiado y se ha mantenido constante. A nivel de superficie (Figura 57b), se observa que la humedad relativa promedio en el continente se ha incrementado en la parte central y norte, principalmente en la cuenca amazónica. Esto significa que la frecuencia de formación de nubes se incrementa; por otro lado, se observa también una masa de aire seca en Chile y Argentina, y el Noreste de Brasil. En niveles Medios (Figura 57c), se observa que la masa de aire con humedad (mayor al 60%) que ingresó por Colombia se establece en la cuenca amazónica, límite entre Perú, Bolivia y Brasil. Esto hace indicar que favorece la formación de nubes o su crecimiento en este nivel; por otro lado, se observa un ingreso de masa de aire seca del Pacífico Central entrando al continente en dirección al Sureste, lo que provoca que la formación de nubes disminuya para el Sur de Perú; además que se desplaza hacia el sur. En niveles altos (Figura 57d), se observa el mismo comportamiento que se vio en niveles medios, la presencia de una masa de aire con húmeda (mayor al 60%) en la cuenca amazónica que favorece a la formación de nubes o al crecimiento de ellas en este nivel, también se observa que una masa de aire seca proveniente del Pacífico central entra al continente provocando que no haya formación de nubes o su crecimiento en el Sur del Perú.

Con respecto al viento, se observa que en niveles bajos (ver Figura 58b), el SALLJ se encuentra mejor definida y tiene la dirección de los Andes. Esta Corriente en Chorro advecta humedad de la cuenca amazónica hacia la Selva y Sierra del Perú permitiendo la formación de nubes por convección y ascenso orográfico, respectivamente, y se forme la cobertura nubosa. En niveles medios (Figura 58c), se observa que no hay una influencia del viento o una velocidad cerca de la cuenca amazónica que permita la advección de la humedad, por lo que, la masa de aire que se encontró (Figura 57c) en la cuenca amazónica puede permitir que se desarrolle las nubes o favorezca su crecimiento en ese mismo lugar; la masa de aire seca que se encontró al Sur de Perú no permite la formación de nubes ya que la velocidad del viento es muy baja y no permite el transporte. En niveles altos (Figura 58d), se observa la AB de circulación antihoraria que advecta aire húmedo de la cuenca amazónica hacia la Selva y Sierra de Perú y se formen las nubes por convección o por ascenso orográfico respectivamente. Además, se observa que la Corriente en Chorro Subtropical se desplaza

más al sur debido a la presencia de la Alta de Bolivia y que advecta masa de aire seco del Pacífico al continente, lo que provoca que no se formen nubes en el Sur del Perú.

Para la costa peruana, se observa que la temperatura superficial promedio del mar es entre 21 – 23°C en todo el litoral peruano (ver Figura 59a). Este aumento de la temperatura del mar indica que se está calentando y no se forme mucha cobertura nubosa, principalmente en el Sur y Centro del Perú. El APS se desplaza más al Sur (ver Figura 59b) con respecto al mes anterior, pero aún genera influencia en el viento advectando el aire seco y cálido del Norte de Chile hacia el Noroeste pasando por una superficie no tan fría pero que permite que el aire se enfríe y se condense formando así las nubes en esta zona sur del Perú. Para el norte se da todo lo contrario; al haber una alta temperatura del aire y alta temperatura superficial del mar hace que se forme una atmósfera estable y no se desarrolle la nubosidad cerca al litoral.

En la Figura 59c, se observa que los valores de radiación de onda larga son menores a 220 W/m². Estos bajos valores indican la presencia constante de nubes en la cuenca Amazónica que se forman por convección debido al incremento en los valores de la humedad relativa y a la alta temperatura del aire que se mantiene constante durante todo el año, resaltando la cobertura nubosa tanto en Perú como en continente. Además, el ZCIT se encuentra cerca de los 0° de latitud (Figura 58a), más al sur que el mes anterior. Esto también indica que, la cobertura nubosa aumenta en la cuenca amazónica, así como en la zona norte del Perú.

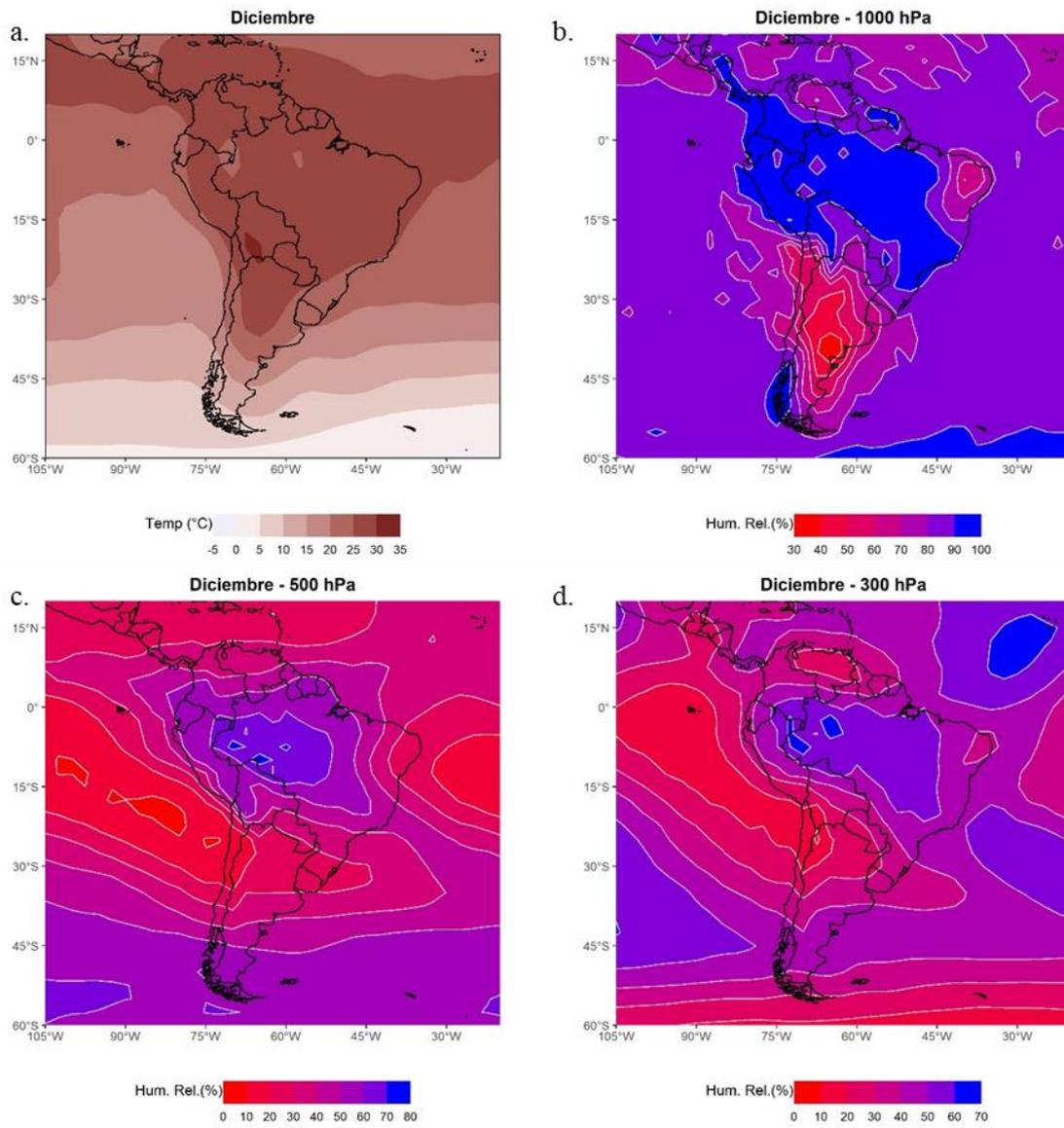


Figura 57. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura promedio del aire en superficie (a) y humedad relativa promedio en diferentes niveles (b, c y d) de la atmosfera para el mes de diciembre en el periodo 2002 – 2018.

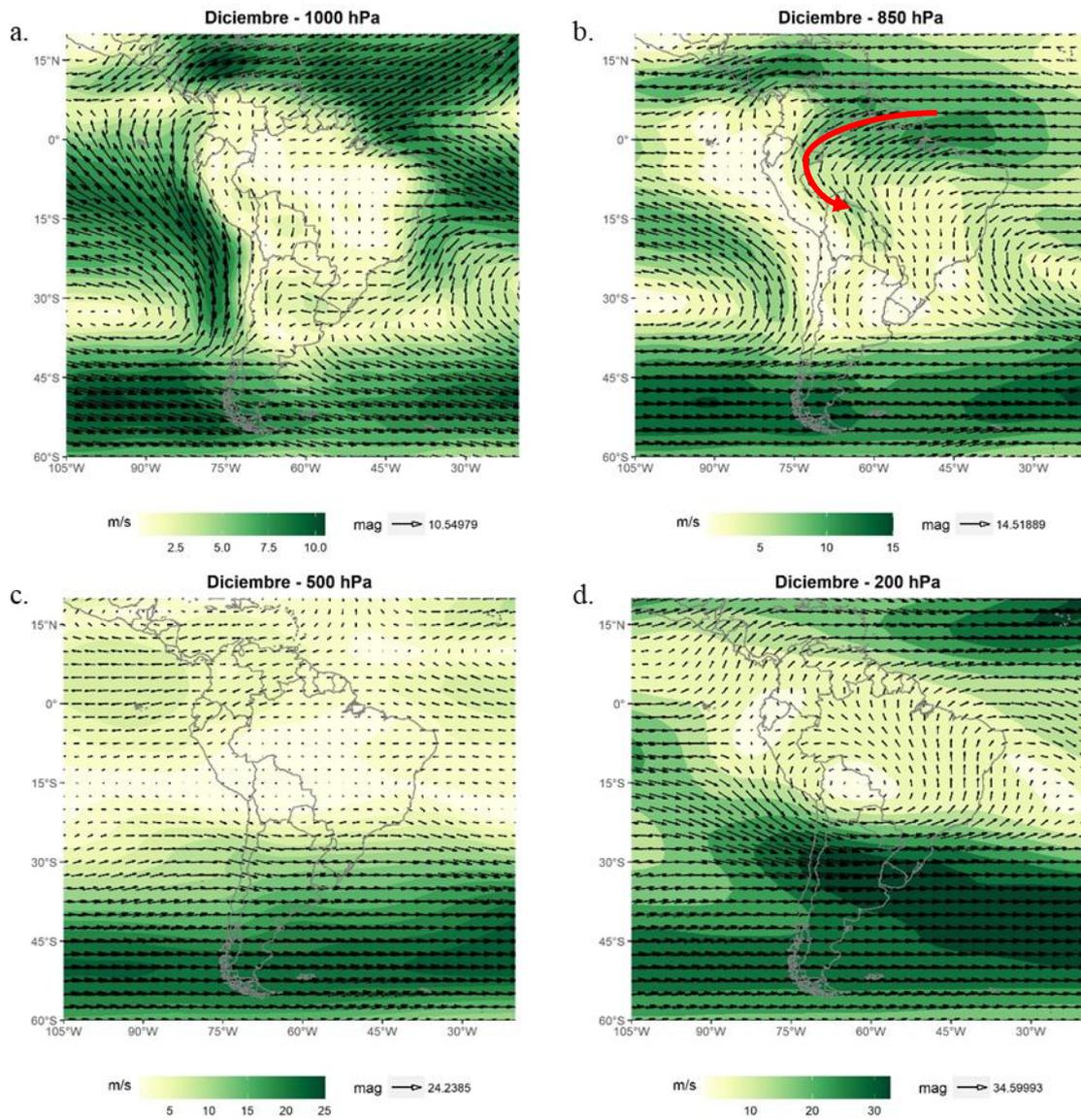


Figura 58. Mapas de reanálisis NCEP-NCAR de la dirección y velocidad promedio del viento en diferentes niveles de la atmósfera para el mes de diciembre en el periodo 2002 – 2018 (flecha roja es SALLJ).

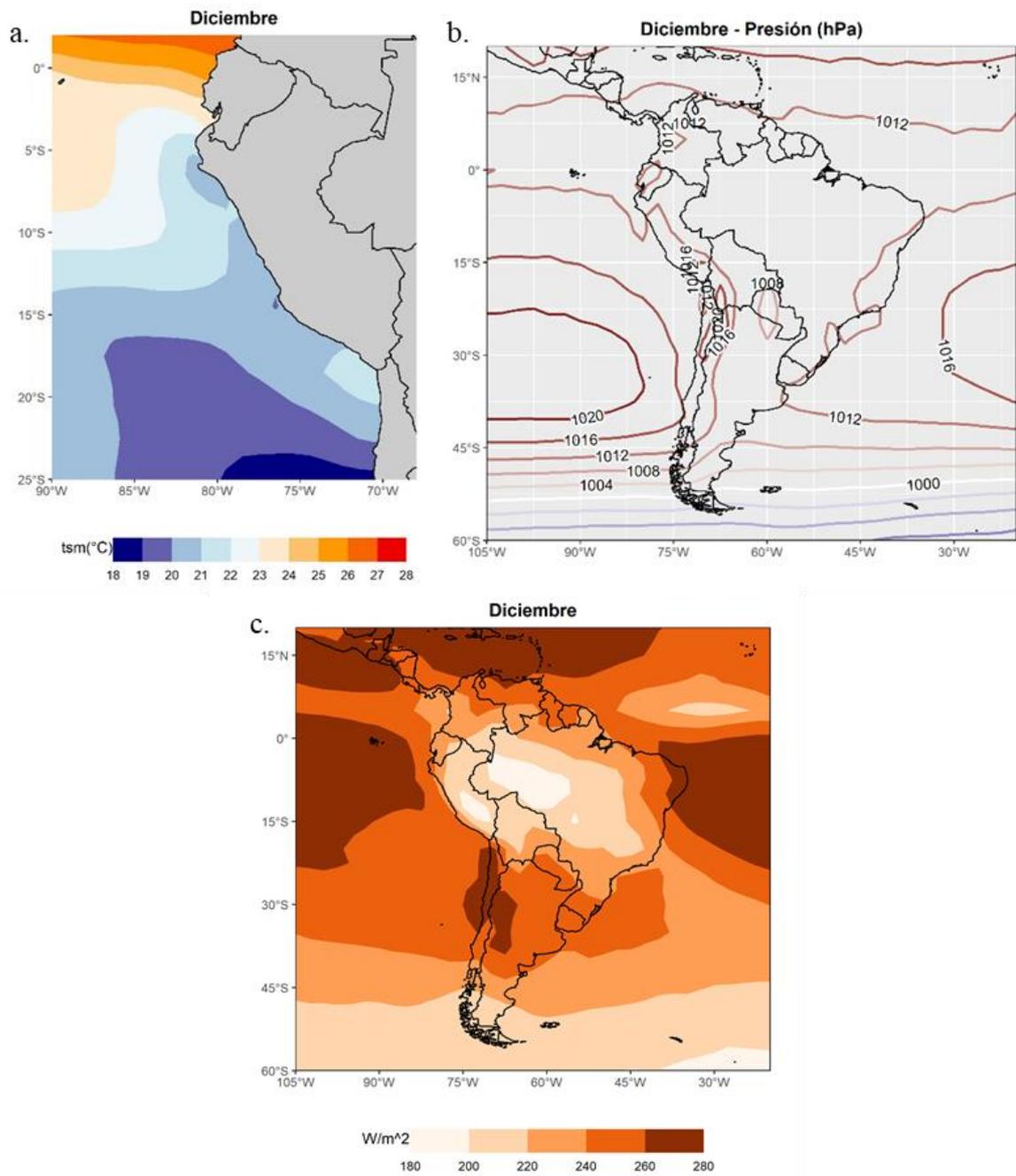


Figura 59. Mapas de reanalysis NCEP-NCAR de las variables: temperatura superficial promedio del mar (a), presión promedio reducido a nivel del mar (b) y Radiación de onda larga (c) para el mes de diciembre en el periodo 2002 – 2018.

4.3. Validar los resultados del producto Máscara de Nubes del sensor MODIS con datos reales de estaciones meteorológicas de superficie.

Se realizó el análisis comparativo entre los datos de cobertura nubosa promedio de cada mes en términos de cielo despejado registrado por estaciones meteorológicas aeronáuticas (10 puntos de observación) y datos extraídos de los productos del sensor MODIS que se encuentran en los satélites Terra y Aqua durante el periodo 2002-2018. En la tabla 6 se muestra los resultados de los parámetros estadísticos para cada estación meteorológica aeronáutica en dos horas diferentes.

Tabla 6: Parámetros estadísticos entre los datos de cobertura nubosa promedio del producto satelital y las estaciones meteorológicas aeronáuticas.

ESTACIONES	10 AM			1 PM		
	R	B	RMSE	R	B	RMSE
TUMBES	0.086	-32	34	0.440	-28	30
TALARA	0.499	-46	48	0.702	-24	26
CHICLAYO	0.170	-36	42	0.024	-34	39
JORGE CHAVEZ	0.906	-6	13	0.894	-5	15
AREQUIPA	0.875	-3	6	0.958	-8	14
AYACUCHO	0.944	0	7	0.911	2	10
CUZCO	0.943	-1	13	0.835	-11	17
JULIACA	0.959	0	7	0.860	-5	10
IQUITOS	0.803	-13	16	0.540	1	9
PUERTO MALDONADO	0.820	-13	15	0.865	-1	10

En la tabla 6 se observa que la correlación (R) entre los promedios de cobertura nubosa del satélite y de las estaciones aeronáuticas son diferentes en todo el Perú. En las estaciones de Tumbes, Talara y Chiclayo, que pertenecen a la zona norte de la Costa, los valores de correlación son bajos ($R < 0.8$) lo que indica que no hay una buena representación del satélite sobre la cobertura nubosa; además de subestimar demasiado la cobertura nubosa en términos de cielo despejado (valor de B negativo en ambas horas) y que el error ($RMSE > 0$) sea grande. Esto se debe a que la altitud de la Cordillera de los Andes en el norte del Perú permite que las nubes formadas en la Selva y Sierra Norte crucen por acción del viento, lo que provoca la existencia de cobertura nubosa; además, algunas de las imágenes de ambos satélites no llegaron a captar esta zona del Perú, lo que contribuyó a que los resultados estadísticos no sean favorables.

Las estaciones Jorge Chávez y Arequipa, que se ubican en la Costa Centro y Sur respectivamente, se observa que hay una alta correlación ($R > 0.8$) en ambas horas de observación. Además, la subestimación (B) que estima el producto satelital no es mucho, así como el error (RMSE) no es grande a comparación de la zona Norte de la Costa, por lo que indica una buena representación del producto satelital sobre la cobertura nubosa. Esto se debe a que la Cordillera de los Andes actúa como un muro para los flujos del viento de la cuenca Amazónica y que su formación de nubes depende del estado de la atmósfera, la temperatura del mar y del estado del APS.

Para las estaciones de Ayacucho, Cuzco y Juliaca, en la tabla 6, ubicados en la Sierra Sur, se observa que la correlación entre el producto satelital y la estación aeronáutica es alta ($R > 0.8$). Es casi perfecto ($B \approx 0$) la estimación que realiza el producto satelital en la mañana (10 am) para estas estaciones, con una subestimación muy baja en la estación Cuzco; en la tarde (1 pm), se observa sobreestimación ($B > 0$) para la estación de Ayacucho y subestimación ($B < 0$) para las estaciones de Cuzco y Juliaca. Los errores (RMSE), en ambas horas, no tienen un valor alto comparado con la zona norte de la Costa, lo que indica que no hay una mala representación del producto satelital. Esto se debe a la influencia de la humedad vista en la atmósfera, así como de la Cordillera, que en esta zona Sur es muy alta y que también tiene una modificación tipo llanura altiplánica.

Para las estaciones de Iquitos y Puerto Maldonado de la tabla 6, que se encuentran en la Selva, se observa que la correlación es alta entre ambos conjuntos de datos ($R > 0.8$), excepto a la 1 pm para Iquitos ($R < 0.8$). En la mañana (10 am) se observa que el bias (B) muestra una subestimación, en comparación con la tarde (1 pm) que muestra sobreestimación y subestimación respectivamente, pero tiene valores más cercanos al cero. Lo mismo sucede con el error (RMSE), se observa mayores valores en la mañana que en la tarde, pero no mayores a comparación de la zona norte de la Costa. Esto se debe a que, en la Selva se da la mayor frecuencia e intensidad para la formación de nubes por convección debido a las condiciones meteorológicas vistas anteriormente y que se ven favorecidas por pertenecer a la cuenca amazónica, pero que sí representan de forma correcta la cobertura nubosa promedio para cada mes en la Selva de Perú.

La Figura 60 muestra las mejores correlaciones que indica el producto satelital con dos estaciones meteorológicas aeronáuticas. Las tendencias de las otras estaciones restantes se pueden ver en el Anexo 4.

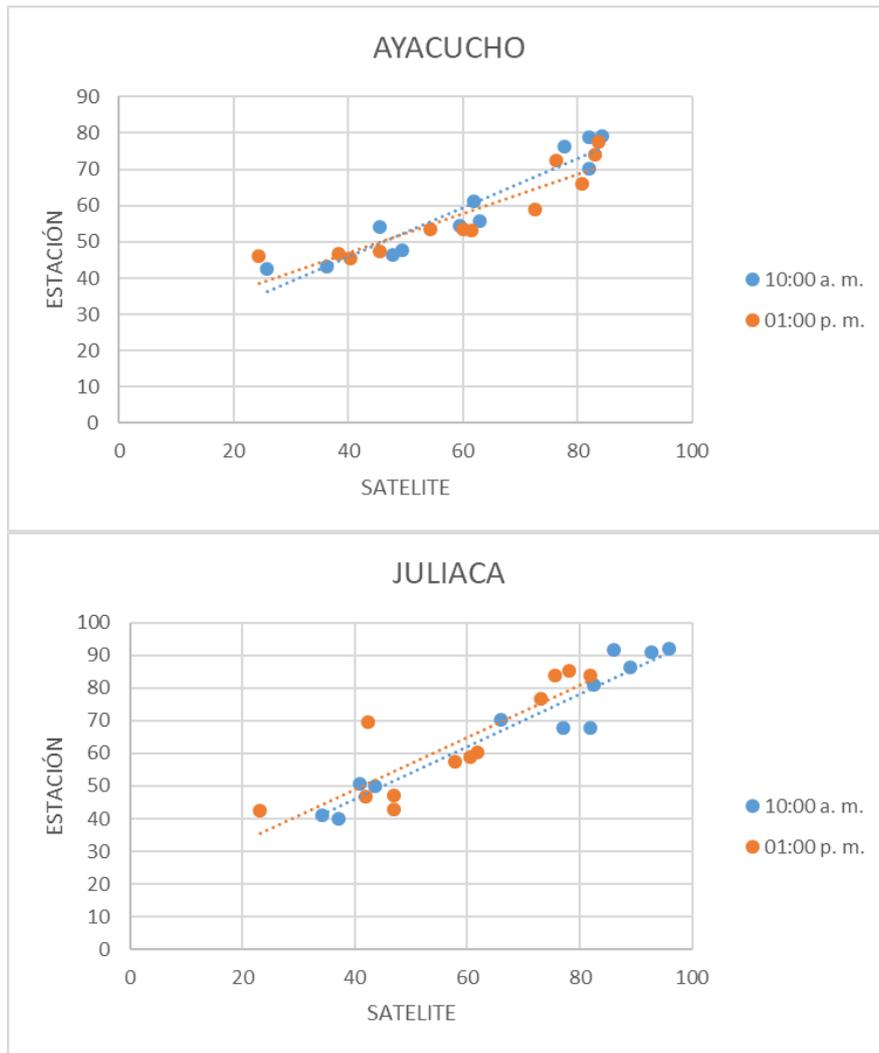


Figura 60. Correlaciones en dos estaciones aeronáuticas que mostraron mejores resultados estadísticos para el producto satelital.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones de acuerdo a los objetivos específicos planteados son:

La cobertura nubosa promedio en términos de cielo despejado estimado por el producto Máscara de nubes MODIS sí determina el comportamiento espacio-temporal que tiene esta variable en el territorio peruano en todos los meses. Se observó que la cobertura nubosa promedio muestra la variación que existe en las tres regiones naturales del Perú. Además, la presencia de la Cordillera de los Andes influye en la formación de nubes; encontrándose en el mes de febrero una probabilidad de cielo despejado por debajo del 14% en la Sierra y Selva, mientras que en el mes de junio se tiene una probabilidad de cielo despejado superior al 74% en la Sierra y Selva del Perú observado en los mapas.

Los sistemas meteorológicos que influyen en la cobertura nubosa en el Perú son diferentes en cada región del país. En la Sierra y Selva, son determinados por la presencia del SALLJ, AB y ZCIT, ya sea con mecanismos de ascenso orográfico o por convección respectivamente que favorecen la formación de nubes. Para la Costa, el APS determina la presencia de cobertura nubosa junto con la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico. La temperatura promedio del aire en la cuenca amazónica fue mayor a 25°C durante todos los meses, siendo éste un gatillador para la formación de nubes por convección junto con el aumento de la humedad relativa lo que provoca la cobertura nubosa. Además, las diferentes altitudes que posee la Cordillera de los Andes permiten que el viento transporte nubes a ciertas áreas de la Costa, lo que determina la presencia de cobertura nubosa en esta zona, principalmente en el norte del Perú.

Los resultados de los parámetros estadísticos para la Sierra y Selva del Perú indican que la correlación de Pearson entre el producto satelital y la cobertura nubosa de las estaciones meteorológicas es: $R > 0.80$, los valores del bias (B) se ubican alrededor de 0, indicando una estimación entre el producto satelital y la cobertura nubosa de las estaciones meteorológicas; los valores de RMSE entre el producto satelital y la cobertura nubosa de las estaciones meteorológicas son mayores que 0, indicando la no precisión de los resultados. Los resultados de los parámetros estadísticos para la zona centro y sur de la Costa son similares a la Sierra y Selva del Perú, sin embargo, la zona norte de la Costa indican que la correlación

de Pearson entre el producto satelital y la cobertura nubosa de las estaciones meteorológicas es: $R < 0.80$, los valores del bias (B) se ubican alejados del 0 indicando una subestimación entre el producto satelital y la cobertura nubosa de las estaciones meteorológicas; y los valores de RMSE entre el producto satelital y la cobertura nubosa de las estaciones meteorológicas son mayores que 0, indicando la no precisión de los resultados.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda, para determinar cobertura nubosa promedio, utilizar satélites geoestacionarios que puedan ser de acceso libre, ya que su resolución temporal es más baja a comparación de los satélites polares y permitiría describir mejor la variabilidad de la nubosidad en el transcurso de los meses, así como en todo el Perú.

Los datos de cobertura nubosa de este producto satelital pueden ser comparados con los resultados de los modelos numéricos de análisis que muestren datos de cobertura nubosa también, así permite saber que otras herramientas como los modelos numéricos atmosféricos ayuden a determinar la cobertura nubosa en una zona.

Usar más estaciones meteorológicas aeronáuticas, lo que permitirá conocer mejor cómo es el estado de la cobertura nubosa en su zona en diferentes tiempos, ya que generalmente, son las únicas que registran esta variable en el Perú.

Analizar con más detalle cómo es la variación de la cobertura nubosa en los departamentos del Perú, ya sea a nivel macro o de manera individual, lo que permitirá saber cuáles son los procesos meteorológicos locales que promueven su aumento o disminución.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Ackerman, S. & Frey, R. (2015). *MODIS Atmosphere L2 Cloud Mask Product (35_L2)*. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Fligh Center, USA.
- Ackerman, S. (Ed.). (2010). *Discriminating Clear – Sky from Cloud with MODIS. Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35)*. Wisconsin. EE.UU.
- Ancapichún, S. & Garcés-Vargas, J. (2015). *Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile*. *Ciencias Marinas*, 41(1), 1-20. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v41i1.2338>
- Armitage, R. P., Alberto Ramirez, F., Mark Danson, F., & Ogunbadewa, E. Y. (2013). *Probability cloud-free observation conditions across Great Britain estimated using MODIS cloud mask*. *Remote Sensing Letters*, 4(5), 427-435. <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2012.744486>
- Barreto, C. W. (2016). *Comportamiento de la Alta de Bolivia hacia finales del siglo XXI bajo el escenario de emisión RCP8.5* [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3109>
- Castillo, F. (2018). *Olas de Calor en la Amazonia Peruana*. [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3392>
- Díez, J. (2006). *Fundamentos de la Programación. Modulo I. Tema 2: ¿Cómo se representan los datos en un ordenador?*. Recuperado de: <http://www.tel.uva.es/personales/josdie/fprog/>
- Frey, R. A., Ackerman, S. A., Liu, Y., Strabala, K. I., Zhang, H., Key, J. R., & Wang, X. (2008, Julio). *Cloud Detection with MODIS. Part I: Improvements in the MODIS Cloud Mask for Collection 5*. *Revista de Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(7), 1057-1072. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1052>.

- Lenters, J. D., & Cook, K. H. (s. f.). *Maintance of the Bolivian High: Topography or Diabatic Heating?*. Cornell University. Recuperado de http://www.geo.cornell.edu/geology/eos/atmos2/bolivian_high.html
- León, F. & Quirantes, J. (2004). *Observación e Identificación de nubes*. España. Fundación Española para la ciencia y la Tecnología. pp 96 – 113.
- Mas, J. F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Mendonça, M. (2017). Monzon Sudamericano: La Integración de la circulación amazónica y altiplánica y las variables climáticas del altiplano andino chileno. *Dialogo Andino*, (54), 21-30.
- Météo-France Stock. (1990). *LA METEO DE A A Z. France*. pp 43 – 51.
- NASA. (2006, febrero). Atmosphere Discipline Team Imager Products. EE. UU. Recuperado de: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products>
- NASA. (2006). *MODAPS Services*. EE.UU. Recuperado de: <https://modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/nomenclature.html>
- NASA. (2008). *MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. EE.UU. Recuperado de <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- Olcina, J. (2013). *Clasificación de las nubes: De Lamarck y Howard al Atlas Internacional de Nubes*. Universidad de Alicante.
- Paccini, L. (2016). *Patrones de Circulación Atmosférica Intraestacional de Macroescala en Bajos Niveles Asociados a lluvias en la Cuenca Amazónica* [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2015>
- Pidwirny, M. (2006). *Cloud Formation Processes. Fundamentals of Physical Geography*. Recuperado de <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8e.html>
- Plácido, M. (2017). *Factores que definen el clima en el Perú*. Instituto Tecnológico Pesquero. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34066.25280>
- Qu, J., Gao, W., Kafakos, M., Murphy, R. & Salomonson, V. (2006). *Earth Science Satellite Remote Sensing*. New York. EE.UU. Editorial Springer.

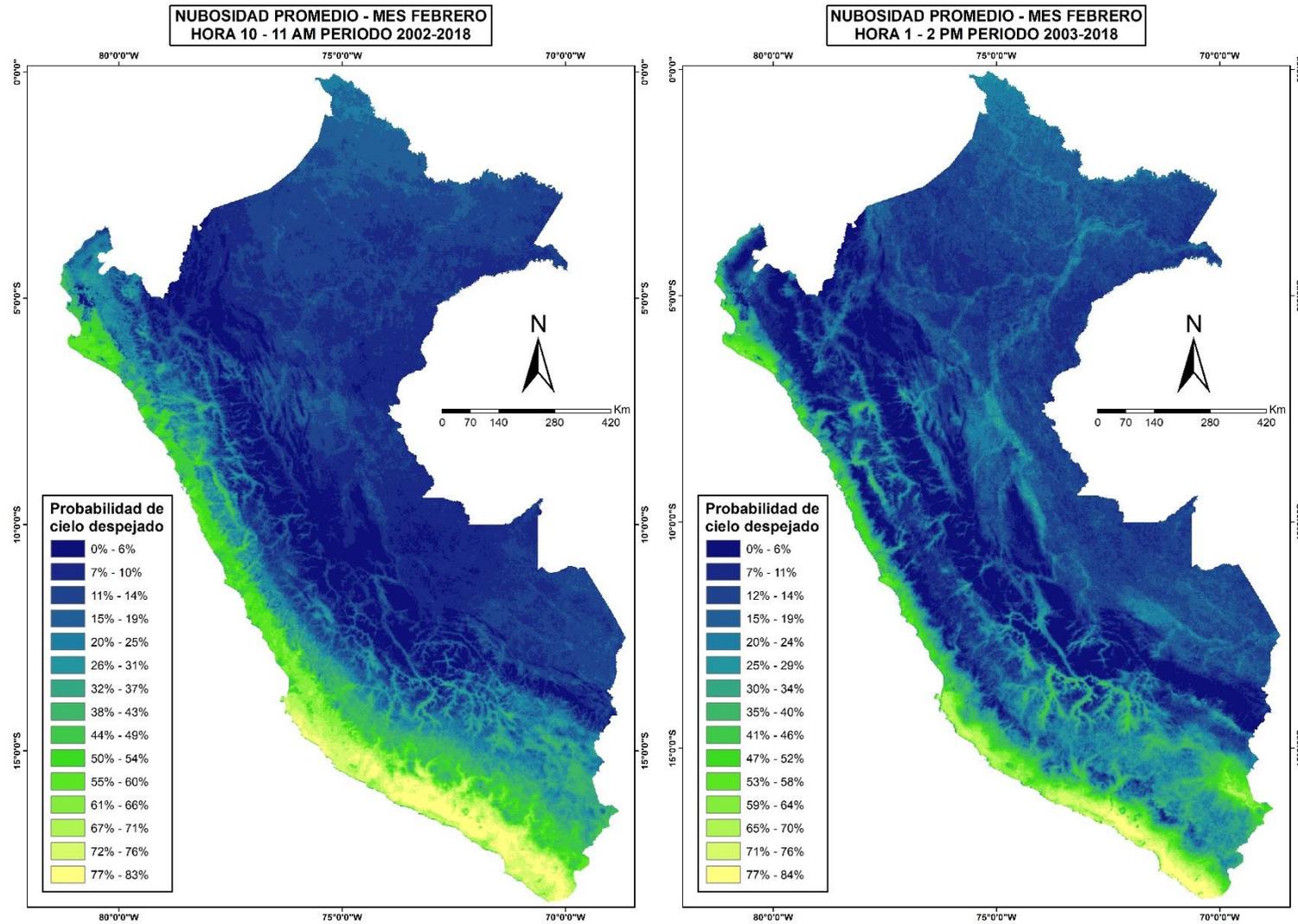
- Quispe, K.D.R. (2017). *Patrones sinópticos de una DANA asociados a la ocurrencia de nevadas en la sierra central y sierra sur del Perú* [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina. Repositorio Institucional UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3632>
- Rivadeneria, S. (2019). *Corrección de estimaciones de precipitación por satélite GPM-IMERG usando Técnica de Mezcla sobre las cuencas Chillón, Rímac, y Lurín* [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4075>
- Rodriguez, O, & Arredondo, H. (2005). *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de Ingeniería Civil*. (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Rosen, J. & Egger, A. (2016). *Factors that Control Regional Climate*. Visionlearning. Vol. EAS-3(6).
- Skybrary, (2018, 10 de octubre). *Inter Tropical Convergence Zone (ITCZ)*. RMetS. [https://www.skybrary.aero/index.php/Inter_Tropical_Convergence_Zone_\(ITCZ\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Inter_Tropical_Convergence_Zone_(ITCZ))
- Strabala, K. (2008). *MODIS Cloud Mask User's Guide*. Recuperado de https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/ModAtmo/CMUSERSGUIDE_0.pdf
- The HDF Group. (2017). *HDF User's Guide*. Recuperado de <https://portal.hdfgroup.org/display/HDF4/HDF4>
- Villela, R. (2017). *The South Atlantic Convergence Zone: A Critical View and Overview*. Instituto Geologico de Sao Paulo. 38(2). 1-19. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20170006>
- Wilks, D. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Editorial Elsevier. EE.UU.
- Yan, Y. (s. f.). *Intertropical Convergence Zone (ITCZ)*. Springer. Doi: https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_110.

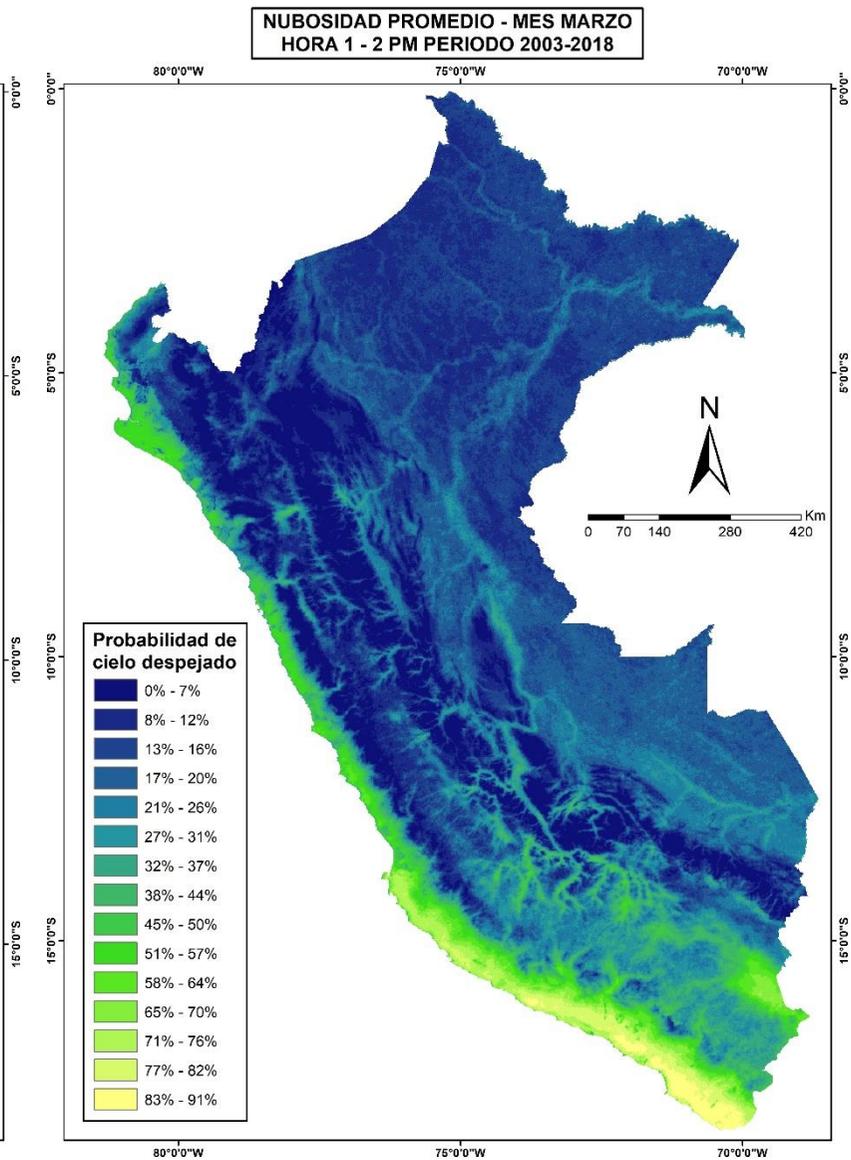
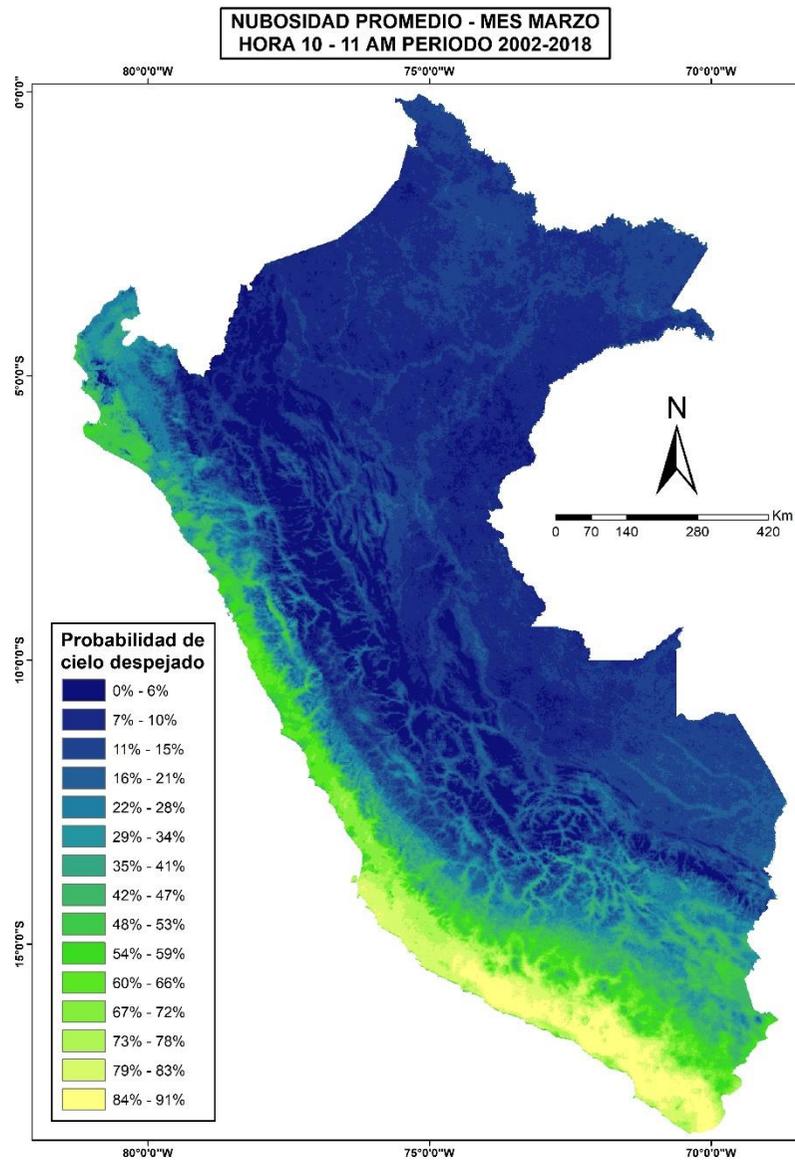
VIII. ANEXOS

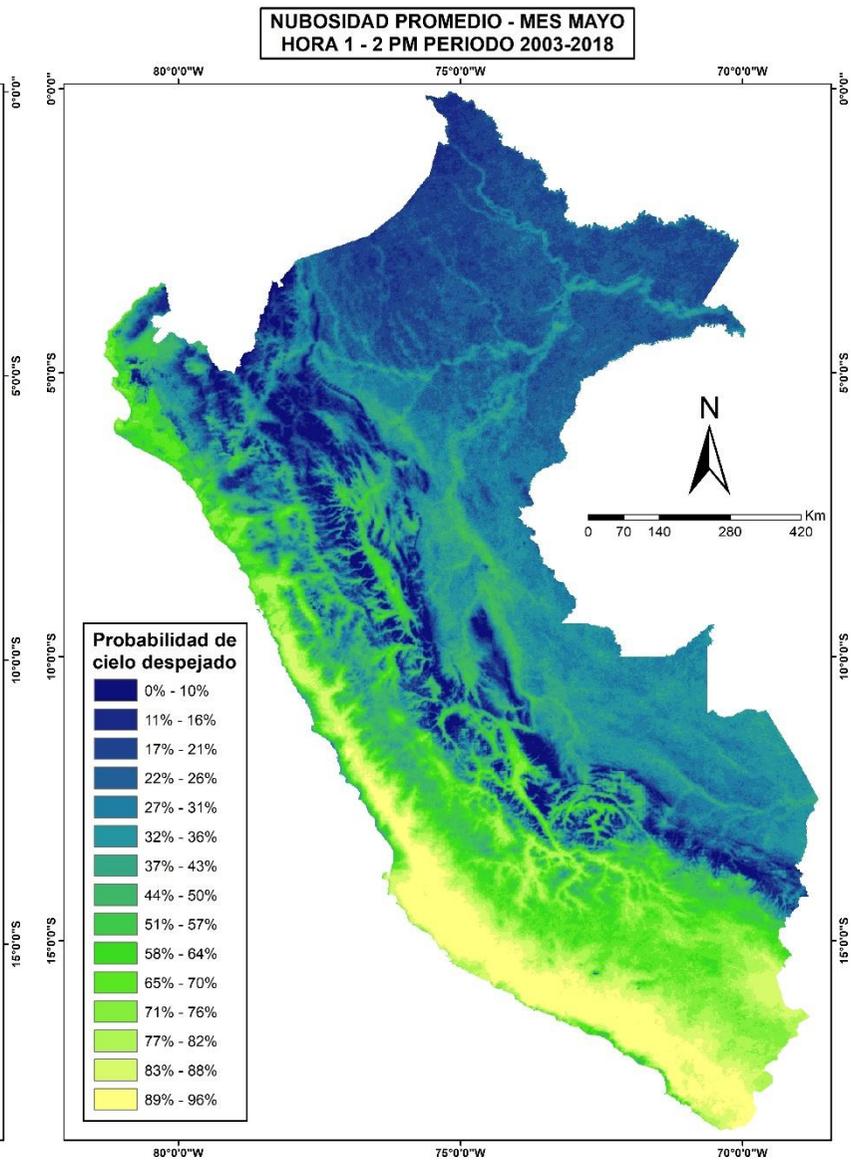
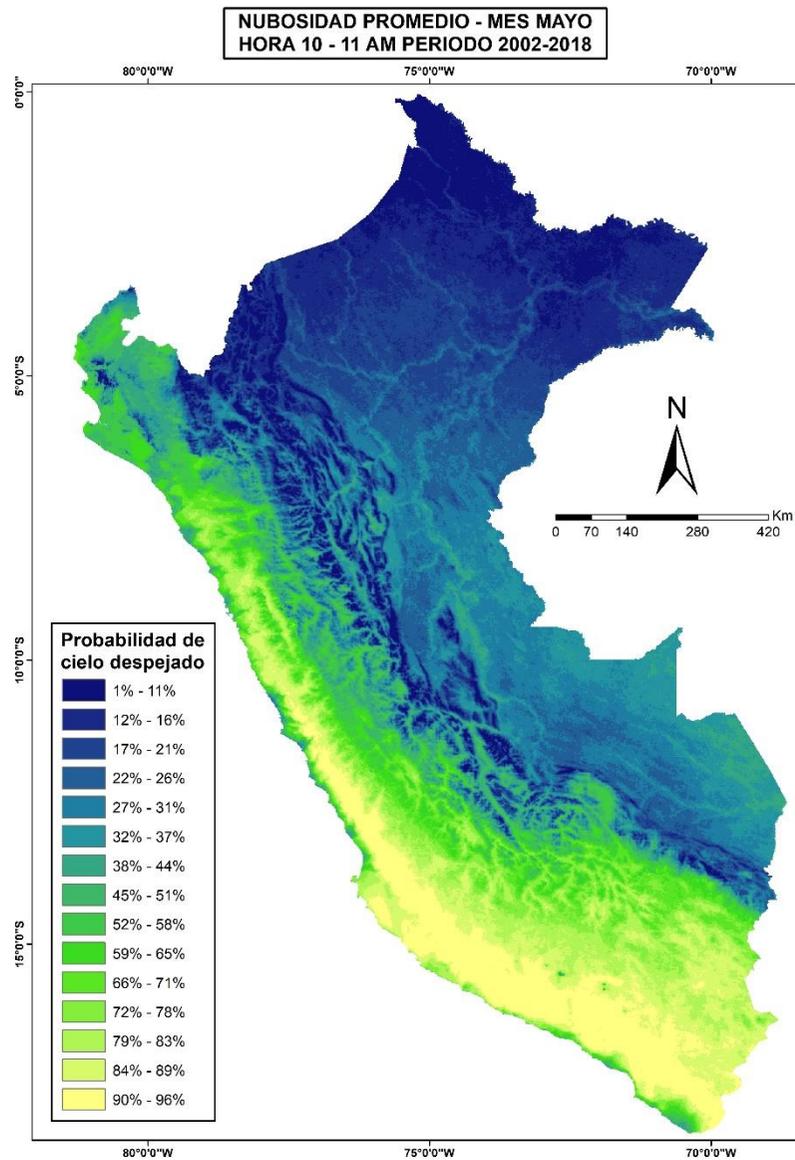
Anexo 1: Información de las estaciones meteorológicas aeronáuticas utilizadas.

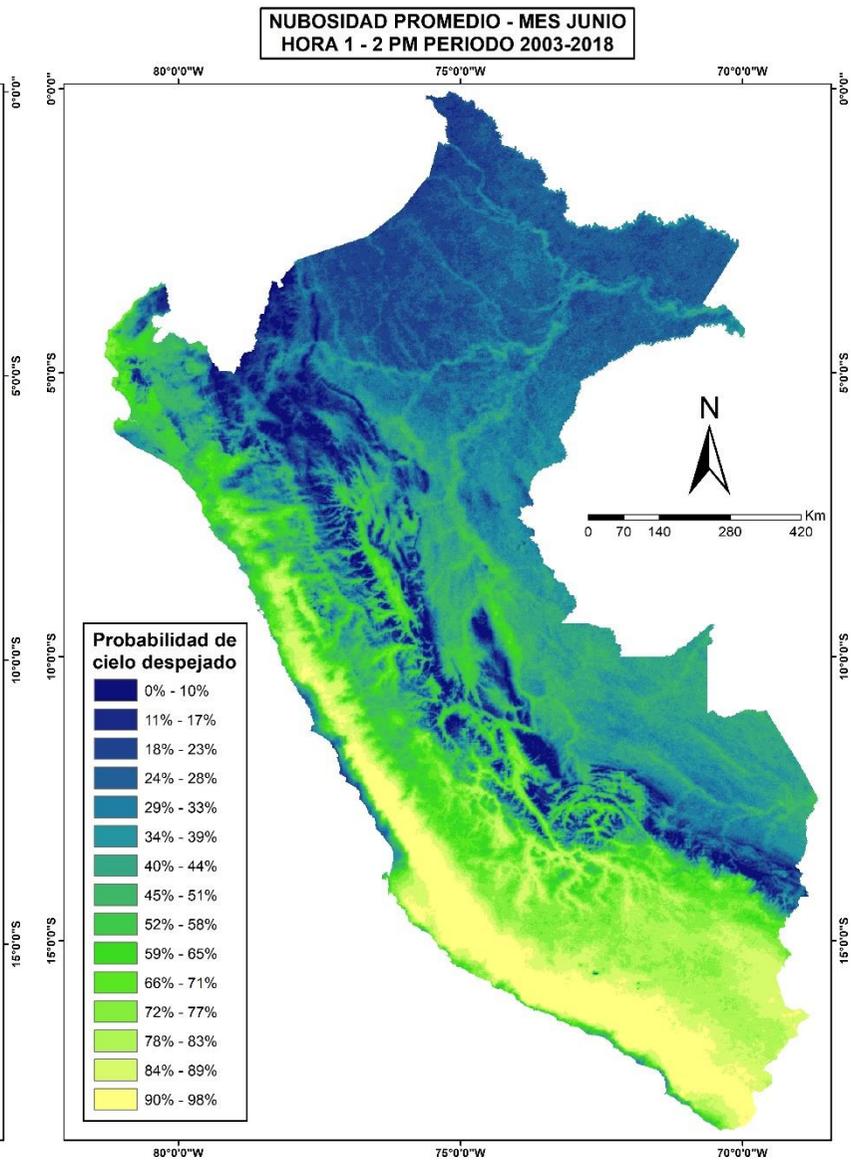
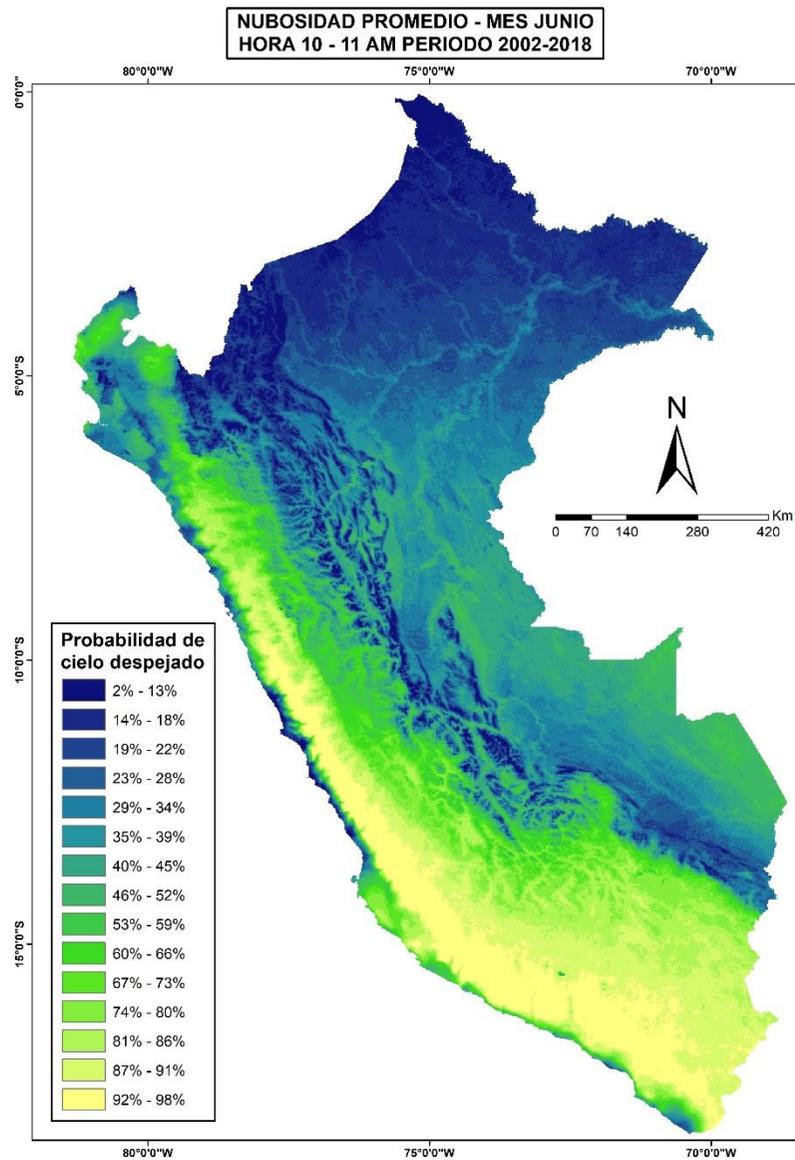
Código OACI	Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (msnm)
SPQU	Arequipa	-71.5706	-16.3406	2560
SPHO	Ayacucho	-74.2042	-13.1547	2745
SPHI	Chiclayo	-79.8281	-6.7872	30
SPZO	Cuzco	-71.9386	-13.5356	3310
SPQT	Iquitos	-73.3086	-3.7847	93
SPIM	Jorge Chávez	-77.1142	-12.0217	34
SPJL	Juliaca	-70.1578	-15.4667	3826
SPTU	Puerto Maldonado	-69.2286	-12.6136	200
SPYL	Talara	-81.2522	-4.5728	85
SPME	Tumbes	-80.3808	-3.5522	35

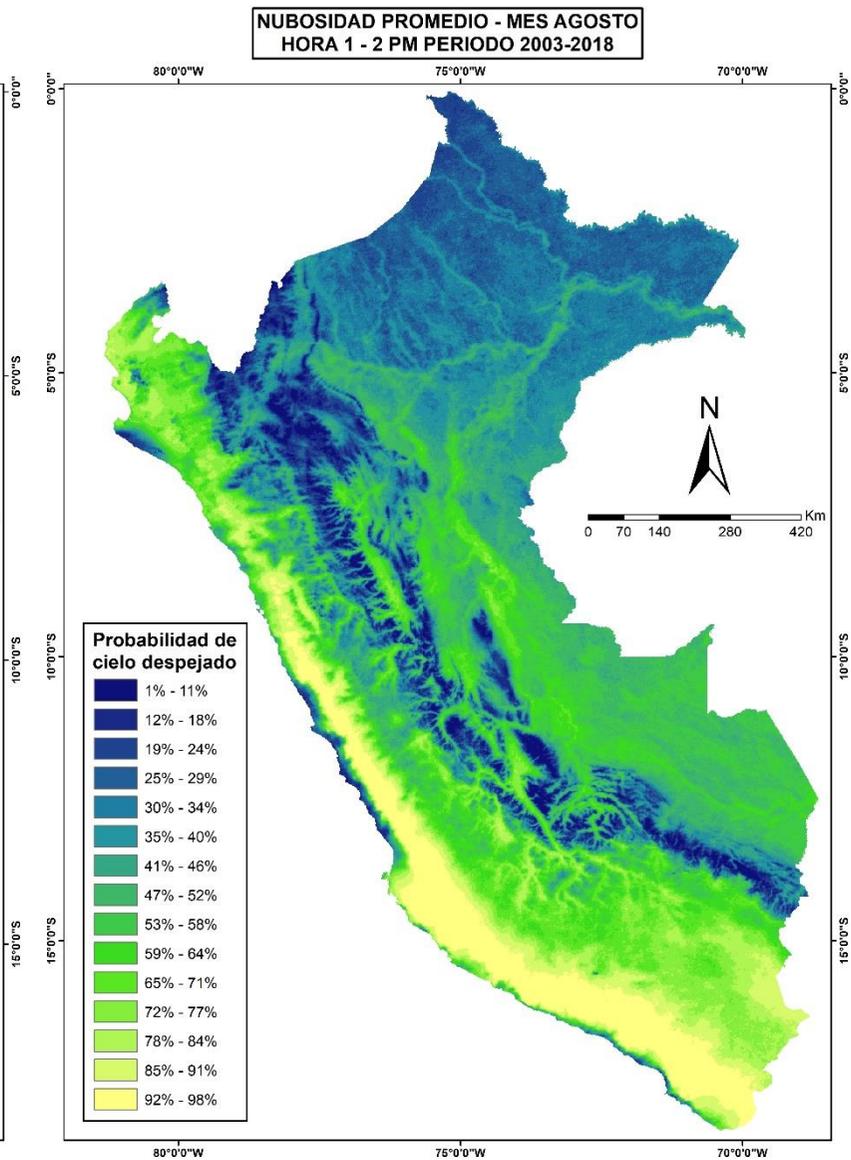
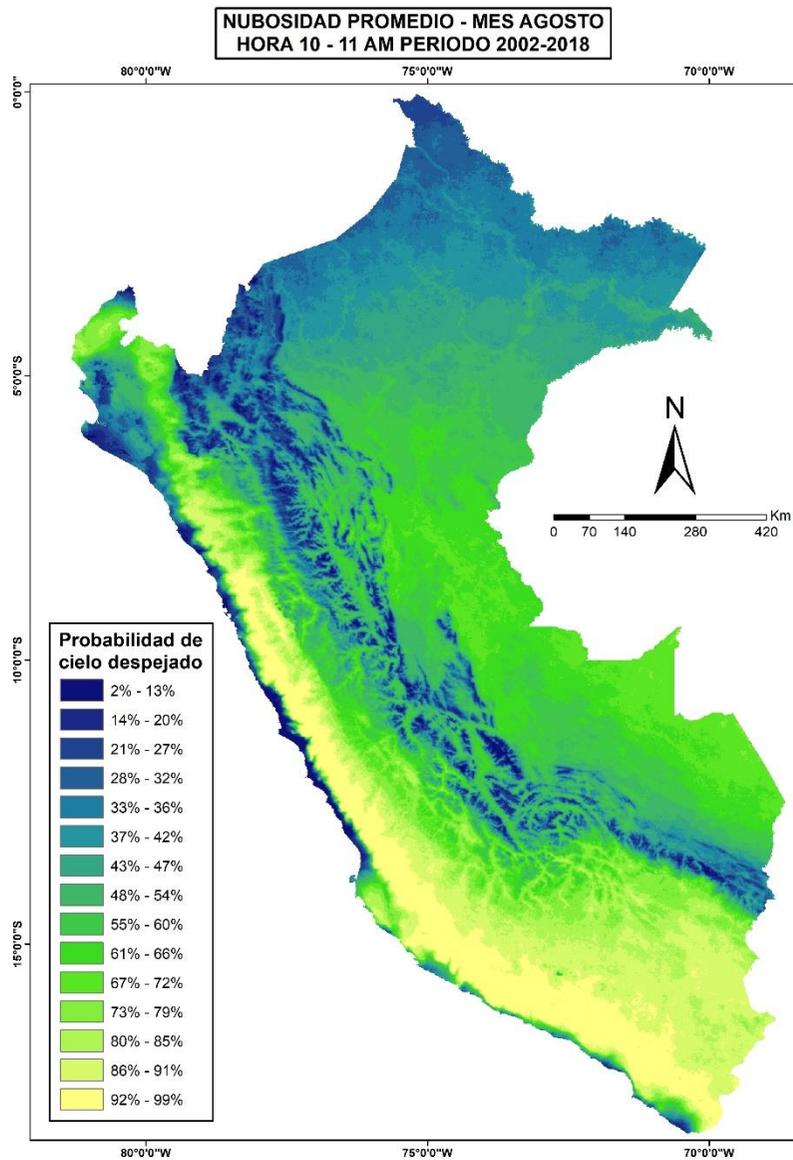
Anexo 2: Cobertura nubosa promedio para cada mes del año en los rangos horarios de 10 – 11 am y 1 – 2 pm para un periodo de años

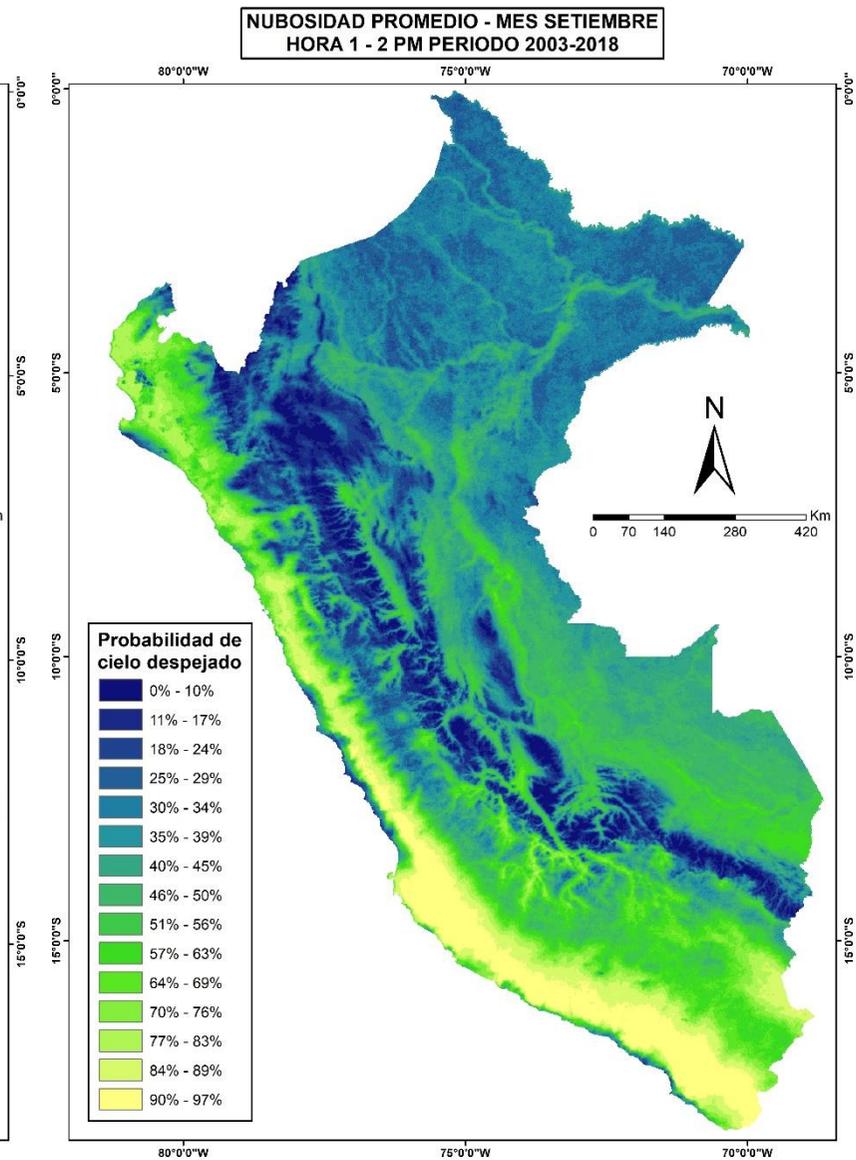
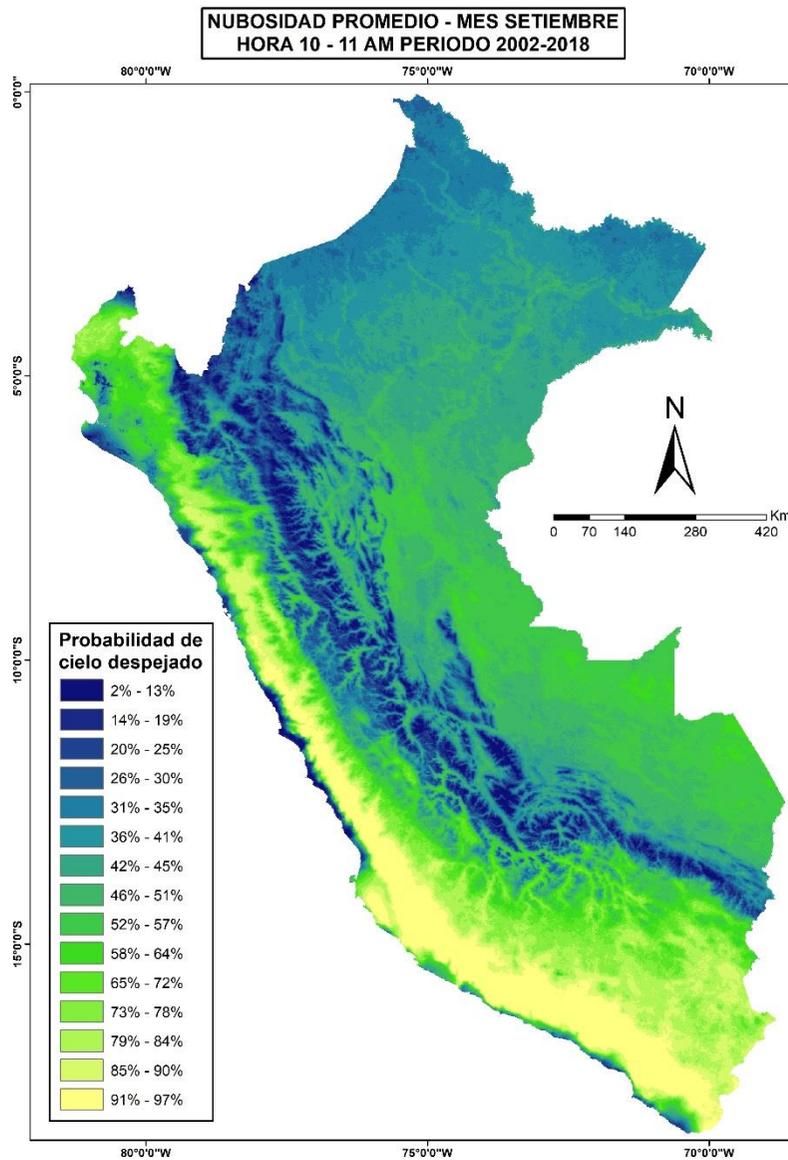


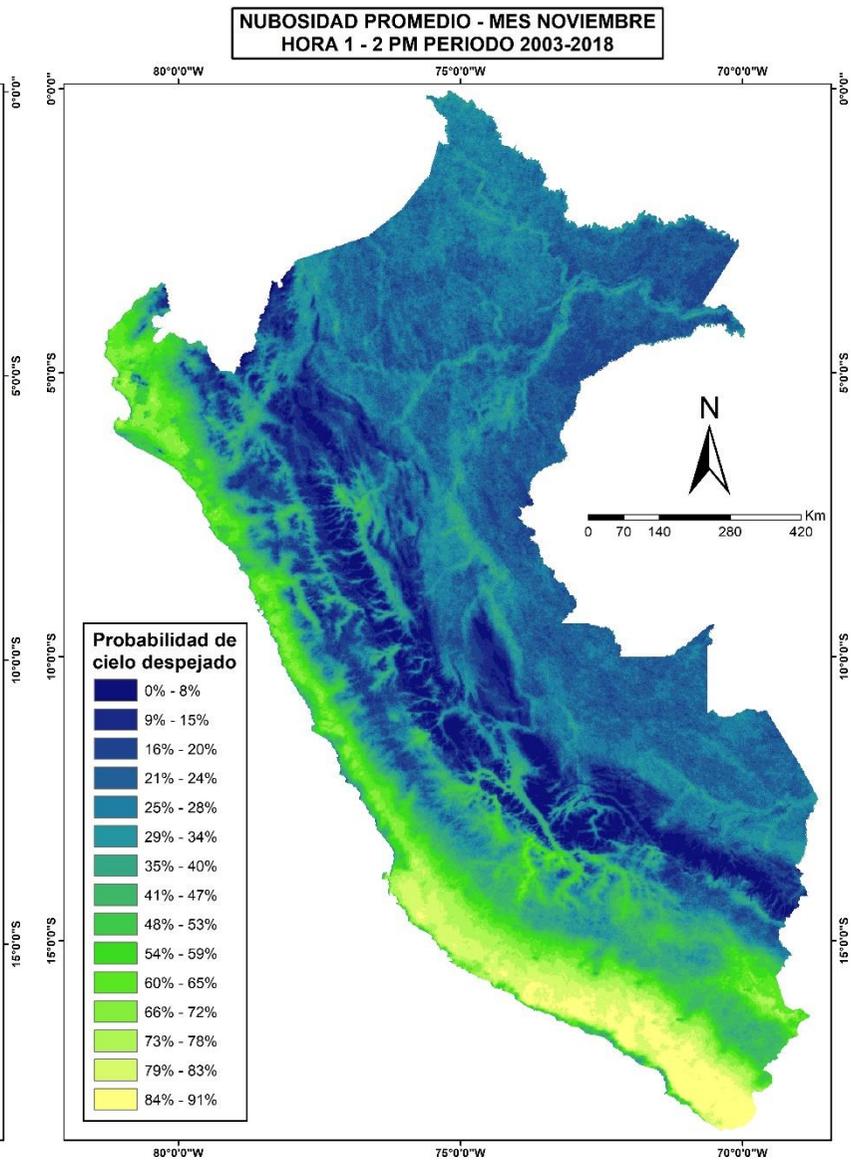
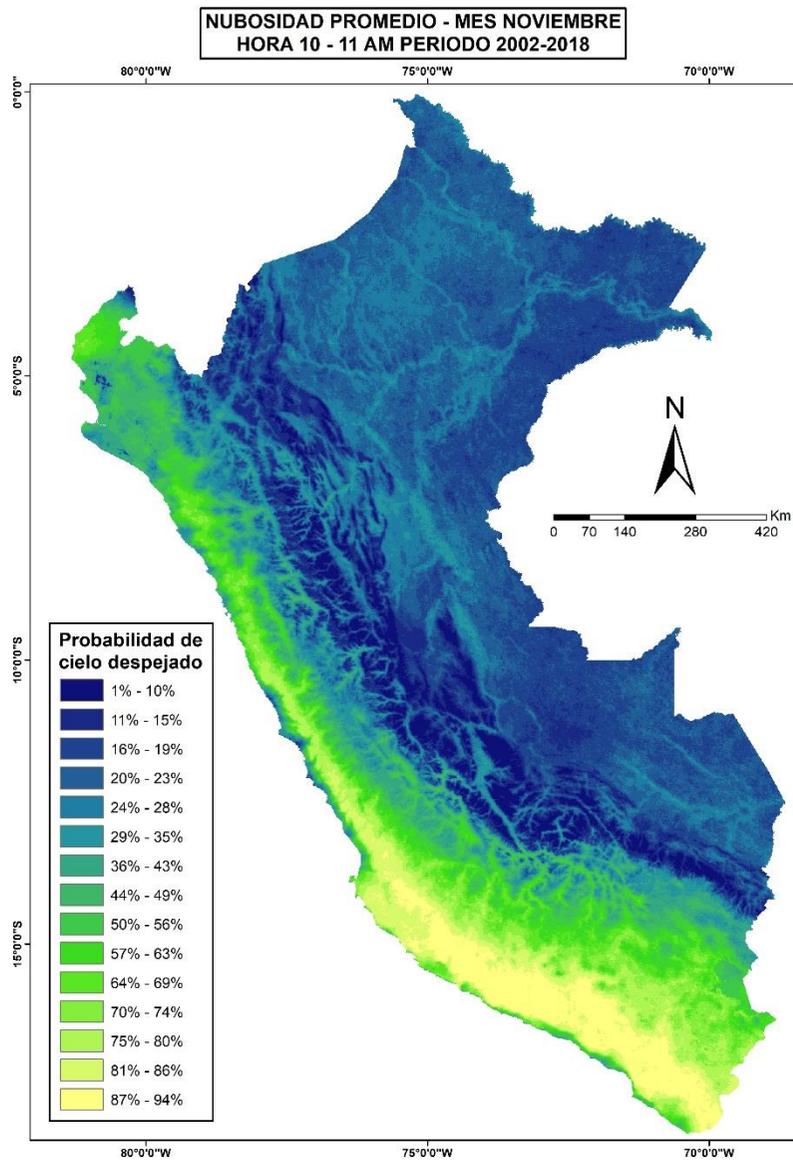


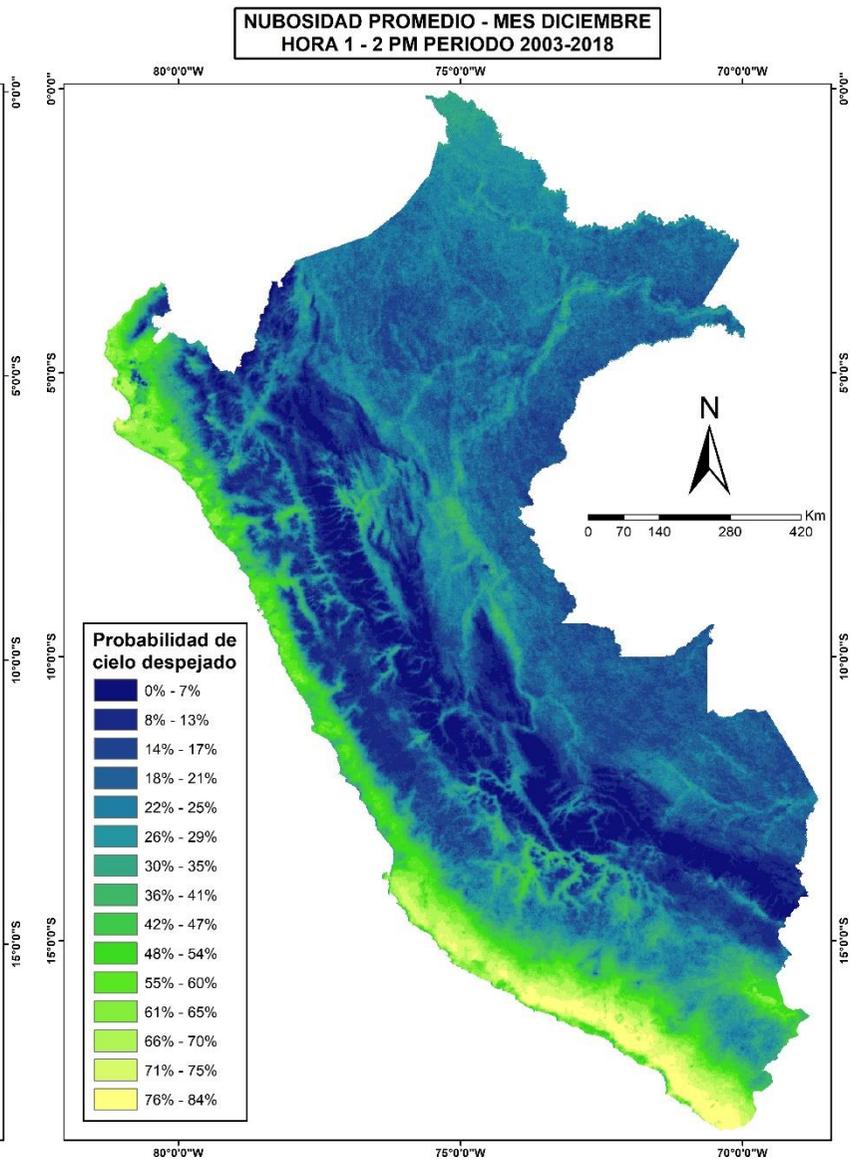
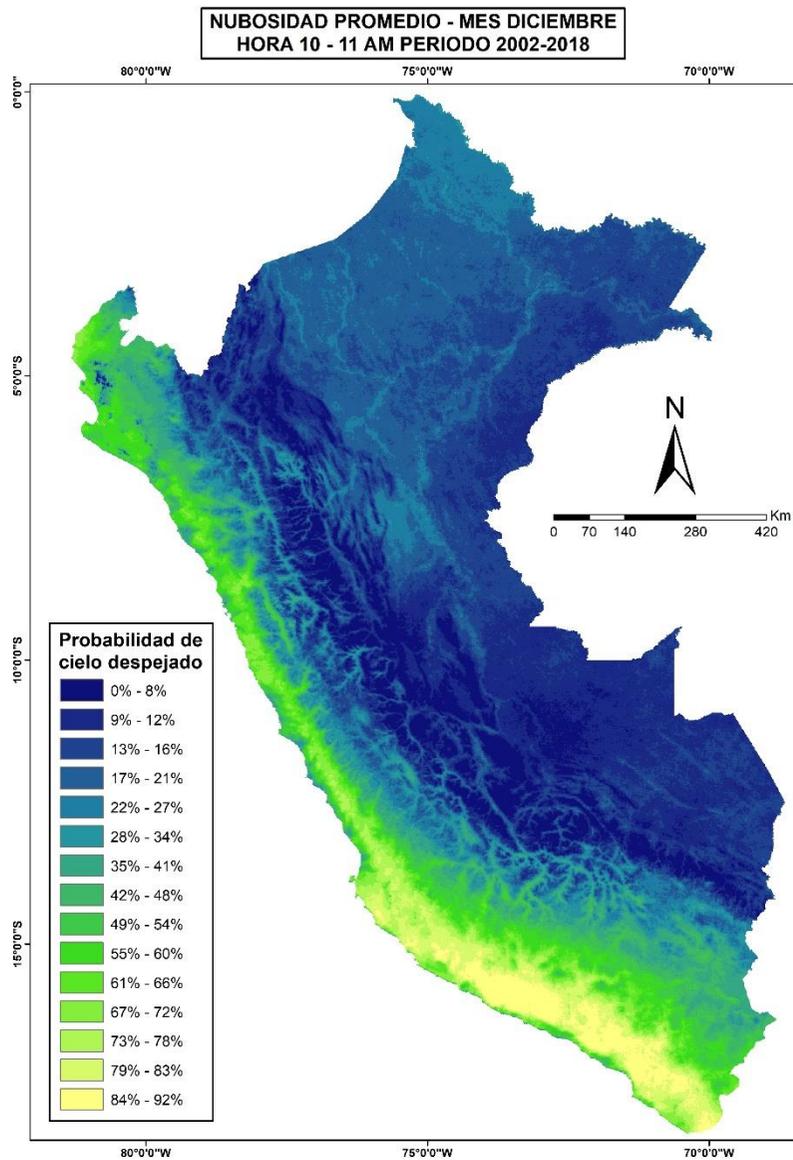












Anexo 3: Correlaciones de las otras estaciones meteorológicas aeronáuticas con el producto satelital.



● 10:00 a. m. ● 01:00 p. m.

Anexo 4: Código en lenguaje R para manipular la información del sensor MODIS

```
1  ## Conversion de un hdf a tiff para una imagen satelital MODIS M*D35_L2
2  library(gdalutils)
3
4  ## Ruta de ubicacion del archivo y colocación de la ruta de trabajo
5  setwd("E:/KEVIN_MODIS/data_modis/")
6
7  ##Creamos un archivo para guardar el nombre
8  archivo = "MOD35_L2.A2008027.1520.061.2017286235344.hdf" #Nombre del archivo con formato .hdf
9
10 ##visualizacion y seleccion de los SDSs del producto satelital
11 sds = get_subdatasets(archivo)[7]   #[7] pertenece al sds Cloud_mask del M*D35_L2
12 #print(sds)                          [18] pertenece al sds Quality_Assurance o QA (evaluacion de calidad)
13
14 #creacion del nombre del archivo .hdf transformado a .tif
15 terra_geo = "E:/KEVIN_MODIS/modis_proyec/terra.tif"
16
17 #creacion del nombre del archivo .tif con una sola banda
18 terra_band = "E:/KEVIN_MODIS/modis_proyec/terra_unabanda.tif" #nombre del archivo
19
20 #creacion del nombre del archivo que capta al Peru
21 terra_peru = "E:/KEVIN_MODIS/modis_proyec/terra_peru.tif"
22
23 - #####
24 #Comando utilizado para reproyectar y transformar de hdf a tif
25 gdalwarp(sds, dstfile = terra_geo, t_srs = "EPSG:4326", geoloc = T, r = "near")
26
27 #Comando utilizado para extraer una banda que posee la informacion
28 gdal_translate(terra_geo, dst_dataset = terra_band, b = 1, r = "nearest")
29
30 #Comando utilizado para delimitar solo al Peru
31 gdalwarp(terra_band, terra_peru, cutline="E:/KEVIN_MODIS/cuadro_extract/cuadro_peru.shp", crop_to_cutline=T)
```