



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales Colombianos

Diana Carolina Rueda Dimate

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias – Departamento de Geociencias
Maestría en Ciencias – Meteorología
Bogotá, Colombia
2014

Caracterización de la corriente en chorro de bajo nivel de los Llanos Orientales Colombianos

Diana Carolina Rueda Dimate

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias - Meteorología

Director:

Ph.D. Ciencias Físico Matemáticas, Gerardo de Jesús Montoya Gaviria

Codirector:

Ph.D. Hidroecología, Germán Poveda Jaramillo

Línea de Investigación:

Meteorología Aeronáutica

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias – Departamento de Geociencias
Maestría en Ciencias – Meteorología
Bogotá, Colombia

2014

*“El primer pastel siempre sale quemado...”
Es solo con esfuerzo y mucha perseverancia
que logramos alcanzar lo que nos
proponemos en el nivel que deseamos.*

Agradecimientos

Por apoyar este proyecto en dedicación, tiempo y conocimientos, brindo mis más sinceros agradecimientos:

Al Doctor Gerardo de Jesús Montoya Gaviria, por aportar invaluable conocimientos sobre la meteorología y modelación numérica que permitieron ampliar la visión de la atmósfera.

Al Doctor Germán Poveda Jaramillo, por compartir su amplia experiencia en la investigación de estos fenómenos meteorológicos.

A la Universidad Nacional de Colombia, y a cada uno de los docentes, que participaron en este proceso formativo quienes forjaron en mí el conocimiento en ciencias meteorológicas, desde cada una de sus áreas.

A la Fuerza Aérea Colombiana por brindarme esta única oportunidad de poder participar de este Postgrado, complementando mis conocimientos aeronáuticos con las ciencias meteorológicas, permitiendo por medio de la investigación brindar herramientas que incrementen la seguridad operacional.

A mi hermano Oscar David por apoyarme desde el principio, con sus buenos consejos, lógica, e invaluable conocimientos, en cada una de las etapas de desarrollo de este proceso.

Resumen

Mediante datos derivados de re análisis de ERA – INTERIM en la serie de tiempo de 1983 – 2013, se analizan el viento y humedad para el sector de influencia de una corriente en chorro de bajo nivel en los llanos orientales de Colombia. Se determina la variabilidad interanual, interanual y estacional del fenómeno, así como la variabilidad del ciclo diurno. Estos resultados son comparados con información de estaciones meteorológicas convencionales localizadas en el sector provista por el IDEAM, información METAR disponible de algunos aeródromos localizados en el sector, y los datos provistos por los sondeos realizados por la Fuerza Aérea Colombiana, como parte de la serie de experimentos liderados por PACSONET en la campaña realizada entre 2005 y 2006 en la región. De esta manera es posible determinar con gran detalle el comportamiento climatológico de esta corriente y complementar información valiosa para su aplicación en diferentes campos del conocimiento. También se documenta un fenómeno poco detallado en el sector que tiene gran influencia atmosférica sobre el norte de Brasil.

Palabras clave: Reanálisis, Corriente en chorro de bajo nivel.

Abstract

Using data derived from reanalysis ERA - INTERIM in the time series of 1983 - 2013, wind and humidity are analyzed to the area of influence of a low level jet stream in the eastern plains of Colombia. The intra-annual, annual and seasonal variability of the phenomenon as well as the variability of the diurnal cycle is determined. These results are compared with data from conventional meteorological stations located in the sector provided by the IDEAM, METAR information available from some aerodromes located in the sector, and the Upper air data provided by pilot ballon soundings conducted by the Colombian Air Force, as part of series Experiments led by PACSONET in the campaign between 2005 and 2006 in the region. This makes it possible to determine in great detail the climatic behavior of this current and valuable information to supplement its application in different fields of knowledge. Is documented this little detail phenomenon who has great influence on atmospheric northern Brazil.

Keywords: Reanalysis, Low level jet stream.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XIV
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XV
Introducción.....	17
1. Antecedentes y Justificación	19
1.1 Planteamiento del problema	22
1.2 Objetivos.....	<u>2422</u>
1.2.1 Objetivo General	<u>2422</u>
1.2.2 Objetivos específicos	<u>2423</u>
2. Marco teórico.....	25
2.1 Características del área de estudio.....	25
2.1.1 Geomorfología	25
2.1.2 Principales sistemas geográficos	27
2.1.3 Recuro hídrico.....	30
2.2 Vientos Alisios	31
2.3 Corrientes en chorro de bajo nivel	31
2.3.1 Mecanismos de formación.....	32
2.3.2 Corrientes en Chorro de Bajo Nivel que tienen influencia sobre Colombia	33
3. Metodología y Datos Usados.....	37
3.1 Selección del área de estudio	38
3.2 Análisis de datos observados	38
3.3 Reanálisis ERA INTERIM	43
4. Resultados.....	47
4.1 Localización de la corriente en chorro de bajo nivel.....	47
5. Conclusiones y recomendaciones.....	<u>6967</u>
5.1 Conclusiones	<u>6967</u>
5.2 Recomendaciones.....	<u>7167</u>
A. Anexo: Nombrar el anexo A de acuerdo con su contenido;	<u>Error! Marcador no definido.69</u>
B. Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido;	<u>Error! Marcador no definido.73</u>

Bibliografía 737

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Corrientes en chorro de bajo nivel observadas en todos los continentes. Gráfica tomada de Stensrud (1996), (1)	1924
Figura 2-1: Ubicación de los principales sistemas geográficos de la región de estudio. . Imagen tomada de Microsoft Corporation.....	2729
Tabla 3-1: Estaciones Meteorológicas con reportes METAR utilizadas para el estudio	3944
Figura 3-1: Distribución geográfica de las estaciones analizadas para realizar la variación diurna del viento con base a reportes horarios METAR. Elaboración propia sobre Sistema de Información geográfica tomada de Google Earth.....	3944
Figura 4-1: Líneas de corriente del promedio Interanual de velocidad del viento en la serie 1983-2013.	5153
Figura 4-2: Localización del núcleo de la corriente en chorro de bajo nivel en un corte de vertical realizado en 5.5° de latitud N para el mes de febrero. Período de registro: 1983-2013.	5456
Figura 4-3: Promedio Interanual de Advección de Humedad Integrada, Serie 1983-2013. (Kg·Kg ⁻¹ ·m·s ⁻¹)	5658
Figura 4-4: Variabilidad del ciclo diurno en el Promedio trimestral de la Componente zonal del viento (-u). Lanzamientos realizados en la Base Aérea Luis Arturo Rodríguez Meneses (SKUA), durante los lanzamientos realizados a las 12:00 UTC (izquierda), y a las 22:00 UTC (derecha) Serie 2005-2006. (Velocidad, m·s ⁻¹ , Altura, m).	5860
Figura 4-5: Variabilidad del ciclo diurno en el Promedio trimestral de la Componente zonal del viento (-u). Lanzamientos realizados en la Base Aérea Luis F. Gómez Niño (SKAP), durante los lanzamientos realizados a las 12:00 UTC (izquierda), y a las 22:00 UTC (derecha). (Velocidad, m·s ⁻¹ , Altura, m).....	5964
Figura 4-6: Variabilidad del ciclo diurno de la velocidad promedio del viento de estaciones ubicadas dentro del área de estudio, basado en los reportes horarios METAR disponibles en a) Base Aérea Luis F. Gómez Niño y b) Base Aérea Luis Arturo Rodríguez Meneses, Serie 2008-2013, (Velocidad Promedio en KT, Hora UTC).	6062
Figura 4-7: Variabilidad del ciclo diurno de la velocidad promedio del viento realizado con reanálisis de ERA INTERIM del área de estudio, para el nivel de 850 hPa a) 00:00 z, b) 06:00 z, c) 12:00 z, d) 18:00 z, Serie 2008-2013, Corte 850 hPa, (Velocidad Promedio en m·s ⁻¹).	6466
Figura 4-8: Promedio mensual de la velocidad del viento para las estaciones seleccionadas del IDEAM, Serie 1983 – 2013. (Velocidad Promedio en m·s ⁻¹).....	6668
Figura 4-9: Promedio mensual de la precipitación para las estaciones seleccionadas del IDEAM, Serie 1983 – 2013. (Valores de precipitación promedio en milímetros).	6769

Lista de tablas

Pág.

Tabla 3-1: Estaciones Meteorológicas con reportes METAR utilizadas para el estudio ...	41
Tabla 3-2: Metadatos de Estaciones Meteorológicas utilizadas dentro del área de estudio con porcentajes de datos faltantes menores al 20%, para el periodo de estudio.	43

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m ²	$\iint dx dy$
a	Coeficiente	1	Tabla 3-1
g	Aceleración de la gravedad	$\frac{m}{s^2}$	$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$
L	Longitud	m	DF
T	Temperatura	K	DF
t	tiempo	s	DF
V	Volumen	m ³	$\int dr^3$
\vec{u}	Velocidad	$\frac{m}{s}$	$\frac{dr}{dt}, r \frac{dv}{dt}, \frac{dz}{dt}$
Z	Factor de gases reales	1	$\frac{pv}{RT}$

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ϕ_v	Flujo volumétrico	$\frac{m^3}{s}$	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$

Subíndices

Subíndice	Término
0	Estado de referencia

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

Abreviatura	Término
ECMWF	European Centre for Medium- Range Weather Forecasts
ERA INTERIM	ECMWF Re-Análisis Provisional
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
METAR	Meteorological Aerodrome Report
PACS- SONET	Pan American Climate Studies Sounding Network

Introducción

Alrededor y al interior de Colombia circulan tres corrientes atmosféricas superficiales de vientos en chorro: del Chocó (Poveda y Mesa, 1999; 2000), del Caribe (Poveda y Mesa, 1999; Amador y Magaña, 1999), y de los llanos orientales (Montoya et al, 2004). Las corrientes en chorro se caracterizan por presentar Vientos concentrados en una extensión específica, con velocidades entre los 20 y 30 KT (10 y 15 ms^{-1}), ubicados en y por debajo del nivel de 850 hPa, se conocen como corrientes en chorro de bajo nivel. Estas corrientes son generadas por diferentes factores como por ejemplo, un fuerte gradiente horizontal de temperatura. Se generan entonces rápidos e importantes transportes de humedad, a lo largo de su eje, generando precipitaciones en la región de salida.

La definición original se relaciona con las características de mesoescala de los flujos de bajo nivel (Bonner 1968), este nombre se ha extendido para identificar, desde una amplia perspectiva, los corredores de humedad que existen, por ejemplo, al este de la cadena montañosa de los Andes, resultado de la interacción de los vientos cuando se encuentran con las montañas.

Una de las primeras caracterizaciones de corrientes en chorro de bajo nivel fue dada por **Hastenrath** (1991, p. 132):

Hastenrath, S., 1991. *Climate Dynamics of the Tropics*, Kluwer, Dordrecht, 488 pp.

Una caracterización más rigurosa de chorros de bajo nivel fue dada por **Stensrud** (1996):
Stensrud, D. J., Importance of low-level jets to climate: A review, *J. Climate*, 9, 1698-1711, 1996.

A través de técnicas de modelación de los vientos, utilizadas para el pronóstico meteorológico en Colombia, se evidencia la existencia de una corriente en chorro de bajo nivel sobre la Región Orinoquia. Esta ha sido identificada por algunos autores, los cuáles reconocen la importancia de ahondar en su conocimiento, su interacción con otros

sistemas, con el fin de entender los ciclos meteorológicos e hidrológicos en el país. (Poveda y Mesa, 1999); (Montoya y otros 2001).

El objetivo de este trabajo es el de caracterizar puntualmente la corriente en chorro de bajo nivel de los Llanos Orientales Colombianos, determinando su influencia y periodicidad en la meteorología nacional en la escala de tiempo anual y en el ciclo diurno. De esta manera se realizará un importante aporte que ampliará el espectro de conocimiento sobre el comportamiento atmosférico en esta región del país, incrementando las herramientas para la acertada toma de decisiones, tanto para el pronóstico como en diferentes sectores adicionales a la meteorología, como la industria aeronáutica, entre otros.

Dado que este fenómeno se encuentra localizado en un sector del país con gran limitación en la generación de datos con fines meteorológicos, fue requerido derivar datos de viento y humedad del reanálisis de ERA INTERIM, (con una resolución de 0.125°), datos de estaciones meteorológicas disponibles y METAR (Meteorological Aerodrome Report) de algunos aeródromos localizados en el área de influencia, con el fin de poder determinar la variabilidad espacio temporal del fenómeno en la serie desde 1983 a 2013.

También se analizaron los datos de los sondeos realizados por la Fuerza Aérea Colombiana en la región de actividad del Chorro en el marco de las campañas lideradas por PACSONET entre el 2005 y 2006. Se seleccionaron dos estaciones localizadas en el área de interés, con el fin de tener un punto de comparación de datos reales en altura.

1. Antecedentes y Justificación

Diferentes corrientes en chorro de bajo nivel han sido observadas en todos los continentes, como lo muestra Stensrud, (1996), en la Figura 1-1. En Suramérica, se han realizado estudios sobre la intensificación de los vientos alisios en algunas temporadas del año (invierno boreal), sobre el norte de Suramérica, generando lo que fue denominado por algunos autores como la “Corriente de los Andes Orientales (CAO)”. (Montoya, Pelkowsky, Eslava, 2001).

Con otros enfoques esta corriente también ha sido mencionada por diferentes autores, encontrando influencias importantes en la modelación de precipitaciones sobre las regiones estudiadas (e.g., Stensrud 1996; Douglas et al. 2000; Paegle 2000; Douglas et al. 1998; Marengo et al. 2002; Virji, 1981, 1982).

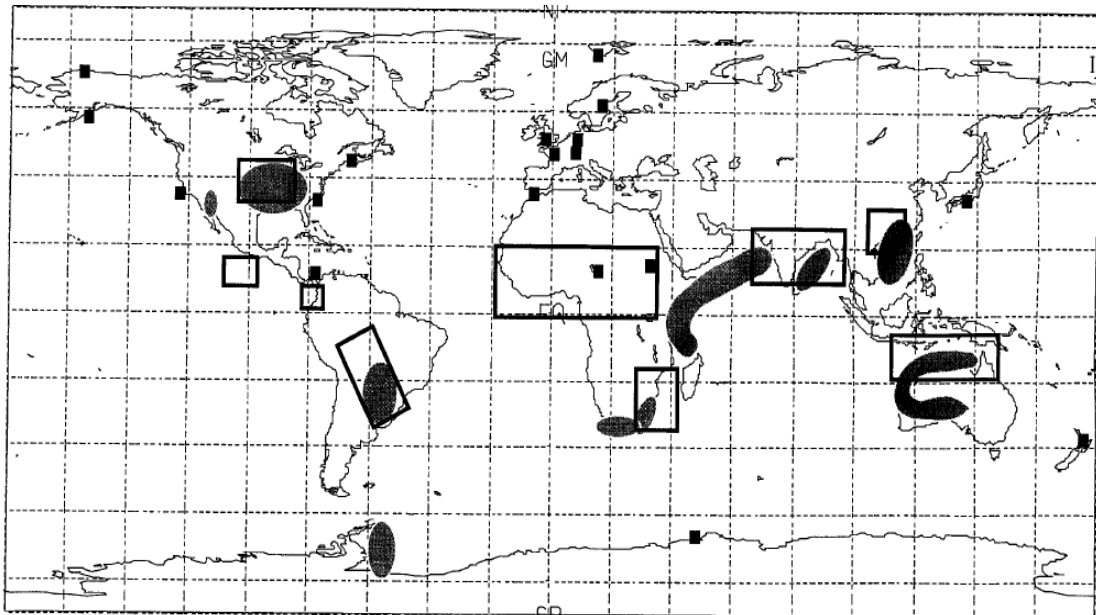


Figura 1-1: Corrientes en chorro de bajo nivel observadas en todos los continentes. Gráfica tomada de Stensrud (1996), (1)

Entre los años 2002 y 2006, liderado por la NOAA, a través de su proyecto de investigación PACSONET (Panamerican Climate Studies Sounding Network), se realizaron varios estudios sobre corrientes de bajo nivel, con importantes resultados para

Suramérica, como el SALLJEX (South American Low Level Jet Experiment), en el 2002 y 2003, y el Experimento del jet de bajo nivel de los Llanos Orientales Venezolanos, 2005.

Este último permitió la caracterización de la corriente en chorro de bajo nivel de los Llanos Orientales Venezolanos, a través de la medición de vientos en altura con una red de estaciones de sondeo, observaciones en superficie, análisis de imágenes satelitales y reanálisis de la región de interés. Este estudio estableció los meses de mayor intensidad de esta corriente en chorro de bajo nivel sobre el territorio venezolano (Torrealba y Amador, 2010).

Este estudio plantea que durante el mes de febrero, (época seca), se presentan las máximas velocidades del viento zonal, en especial para la estación de San Fernando de Apure, con velocidades entre los 10 y 15 ms⁻¹, y los mínimos durante el mes de agosto, como resultado entre otros de los análisis de los resultados de los globos pilotos lanzados entre el 2001 y el 2003.

Es interesante que se mencione en este estudio el comportamiento de la corriente en Chorro de Bajo Nivel en los Llanos Venezolanos, de una manera casi constante en los meses entre noviembre y abril, lo cual contrasta con los estudios de la Corriente en Chorro del Occidente de Colombia o el Chorro del Chocó, realizados por Rueda, O y Poveda, G 2006, en el que se presenta de una manera marcada en el ciclo anual, las mayores velocidades del viento en 80°O, a partir de los meses de junio, julio y agosto, con máximas en el mes de octubre y velocidades mínimas en los meses de enero, febrero y marzo.

En algunas imágenes satelitales es posible evidenciar la presencia de nubes de tipo estrato cúmulos, estrato fractus y cúmulo fractus, que se mueven rápidamente hacia el Oriente y luego hacia el Suroriente antes de ingresar al territorio colombiano, antes del amanecer y en las primeras horas de la mañana, aspecto característico de las corrientes en chorro de bajo nivel (Stensrud, 1996). Véase la Figura 1-2.

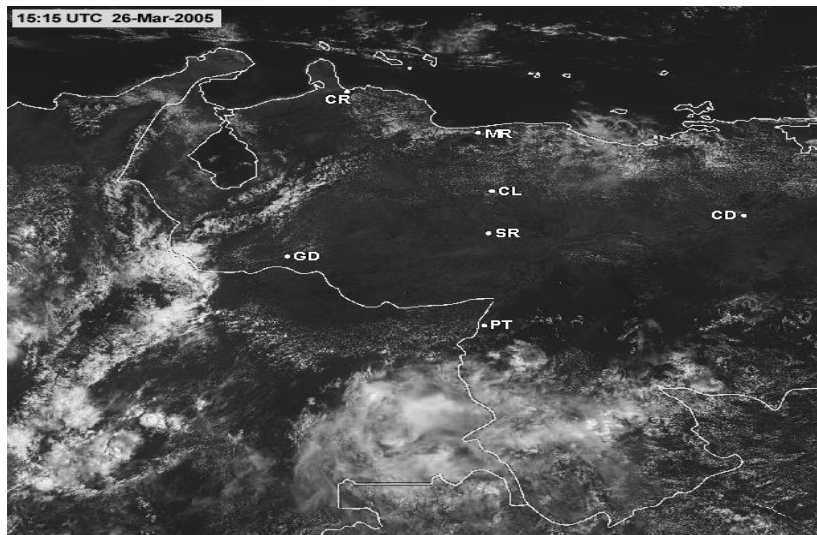


Figura 1-2: Imagen visual “Experimento del jet de bajo nivel en los Llanos Venezolanos 2005” PACSONET. Fuente: NOAA –PACSONET 2005.

Este tipo de patrón ha sido identificado por diferentes centros de pronóstico a nivel nacional como lo son el IDEAM, y el CEMEOP (Centro de Meteorología Operacional de la Fuerza Aérea Colombiana), identificando vientos de velocidades superiores a los 10 kt, (5 ms^{-1}) en un corredor sobre los Llanos Orientales Colombianos, sin poder identificar sus características principales, debido a que a pesar de haber sido nombrada por algunos autores, (Poveda, Mesa, 1999; Montoya, Pelkowsky, Eslava, 2001), se desconocen patrones de su variabilidad en distintas escalas de tiempo, en particular del ciclo diurno, así como su definición espacial y comportamiento general sobre la región.

Otros autores han identifican como Río Aéreo del Este de los Andes, al segmento filamentososo preferencial desde el norte de Sur América y hasta la cuenca del Río de la Plata, que tiene grandes vías de flujo de humedad, que son coincidentes en una porción con la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales en su paso por el territorio colombiano. El concepto de Río Aéreo es analizado a través de diferentes autores, e indica que se encuentra activo durante todo el año, aunque transporta las mayores cantidades de humedad durante el verano austral, asociada con vientos alisios mas intensos, desde el norte del Atlántico Tropical, y el vapor de agua evapotranspirado de la Amazonía. (Poveda et al. 2014).

Dadas las ventajas que plantearía su entendimiento y caracterización para varios sectores, entre ellos el aeronáutico, se plantean entonces los siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el patrón de variabilidad anual y del ciclo diurno que presenta este fenómeno?
- ¿Cuál es la distribución espacio temporal de la corriente en chorro de bajo nivel de los Llanos Venezolanos sobre los vientos en la Orinoquia Colombiana?

1.1 Planteamiento del problema

La corriente en chorro de bajo nivel de los Llanos Venezolanos presenta su mayor intensidad entre los meses de noviembre y abril (Torrealba, Amador, 2009, 2010). Otro tipo de corrientes ubicadas al noreste de Suramérica ha sido identificadas por algunos autores, como por ejemplo la denominada “Corriente de los Andes Orientales”, CAO, (Montoya, Pelkowsky, Eslava, 2001), como producto de la intensificación de los vientos alisios en el invierno boreal. Esta corriente se presenta durante los meses de noviembre y abril, y se extiende hacia el Sur del continente, con velocidades máximas de 10 a 12 m/s.

Otros autores identifican una corriente en chorro de bajo nivel ubicada entre los 700 a 600 hPa conocida también como la corriente en chorro del este, (Poveda, Mesa, 1999), cuyo origen se genera en el Océano Atlántico, en el oeste de África y que alcanza velocidades entre los 10 y 12 m/s, en su núcleo, cuando ingresa a Suramérica por el noreste disminuye su velocidad hasta los 10 m/s, en capas inferiores (600-700 hPa y hasta los 850 hPa), desde el mes de septiembre y hasta febrero. Presenta su mayor intensidad entre los meses de marzo, abril y mayo (10 m/s), y su menor intensidad entre septiembre octubre y noviembre (6 m/s). Esta corriente tiene un marcado ciclo anual inverso con respecto a los trimestres de máxima y mínima presentados por la corriente en chorro del CHOCÓ, y continua su trayectoria incluso hasta llegar a mar abierto sobre el Océano Pacífico Oriental.

Algunos de los mecanismos físicos que modulan el ciclo hidrológico durante las fases del ENSO en Colombia y el Norte de Suramérica, precisamente son el debilitamiento de la corriente en Chorro de Bajo Superficial del Oeste que penetra a Colombia desde el Océano Pacífico (también conocida como la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del CHOCO), y el debilitamiento de la Corriente en Chorro Ecuatorial de los 700hPa, (Poveda, Mesa, 1999). Sistemas como la CAO pueden tener además profundas consecuencias sobre ciclos hidrológicos como el de la Amazonía, debido a que son un eficiente mecanismo de transporte de humedad, polen polvo y otras partículas desde la costa occidental africana hasta el Caribe y norte de Suramérica.

A pesar de que la CAO es analizada para la región de Suramérica que abarca desde el noreste del continente y hasta la Cuenca del Río de la plata bordeando el este de los Andes, la región de análisis es muy amplia y no se permite identificar características espacio temporales con un mayor nivel de detalle para la región de los Llanos Orientales de Colombia.

Dada la importancia e impacto sobre la hidroclimatología colombiana de estos sistemas, (Corrientes en Chorro de Bajo Nivel), y en razón a que no existe una caracterización que permitan identificar la variabilidad anual y del ciclo diurno con una mejor resolución, surge la necesidad de realizar la caracterización de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel observada sobre los Llanos Orientales Colombianos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar la corriente en chorro de los Llanos Orientales Colombianos, estableciendo el patrón de variabilidad del ciclo diurno en la región, en el periodo 1983 - 2013.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar y describir el comportamiento de los vientos en superficie sobre la Orinoquia Colombiana, a través de datos derivados del Reanálisis de ERA-INTERIM en el período 1983-2013, así como de estaciones meteorológicas, datos METAR y de sondeos en el área de influencia, en las escalas de tiempo mensual y del ciclo diurno..
- Determinar la influencia de la corriente en chorro de los Llanos Venezolanos sobre la Región Orinoquia para el período de estudio.
- Describir la influencia regional de este fenómeno en la precipitación.
- Implementar técnicas para lectura y visualización de los datos de viento utilizados para el propósito de la tesis.

2. Marco teórico

2.1 Características del área de estudio

El interés en el estudio de la comunidad científica europea en la cuenca del Río Orinoco tiene sus orígenes registrados desde el 1741, en la obra del eclesiástico Juan Rivero, “Historia de las misiones en los llanos del Casanare y de los ríos Orinoco y Meta”, y la del sacerdote Jesuita José Gumilla, “El Orinoco Ilustrado”, en las cuáles realizan una exaltación que rescata el criterio de Cristóbal Colón sobre la región como el paraíso terrenal .y la compara como una fértil y amena isla.

Luego con las expediciones de Alejandro Humbolt y el francés Aimé Bonpland, 300 años después de la llegada de Colón a la desembocadura del río Orinoco, permitieron resolver el misterio sobre la conexión del Orinoco y el Amazonas a través del canal de Casiquiare, realizando aportes significativos a los mapas del nuevo mundo, y dando herramientas de conocimiento para ampliar el conocimiento sobre nuevas y exóticas especies de plantas y animales.

Adicional, las terminaciones de la cordillera de los Andes sobre los Estados de Táchira, Mérida y Trujillo, con elevaciones cercanas a los 5000 msl, forman un canal que en su continuación hacia la cordillera oriental colombiana, conducen los vientos hacia el centro del país.

Se crea entonces un forzamiento orográfico, que dependiendo de la intensidad de los vientos, la época del año, y la disponibilidad de humedad, pueden influir en la formación de la corriente en chorro de bajo nivel sobre los Llanos Orientales Colombianos.

2.1.1 Geomorfología

La región Nororiental de Suramérica se encuentra ubicada sobre una de las placas más antiguas del continente que se ha mantenido sin modificaciones desde el periodo

Mioceno Medio, (entre 23 y 8 millones de años). Para esa época los antiguos ríos Orinoco y Amazonas juntaban sus aguas, que luego corrían hacia el norte para desembocar en el Mar Caribe. Luego surge la cordillera de los Andes por un choque con la placa oceánica del Pacífico.

De esta manera se forma la Cordillera Central en el periodo Paleozoico a partir de un movimiento de la corteza terrestre del Escudo Guyanés. La cordillera Oriental se formó en el periodo Terciario Superior cuando un movimiento continental hacia el occidente hizo que el Escudo Guyanés ejerciera presión sobre la cordillera.

Procesos evolutivos posteriores como los glaseales, afectaron geomorfológicamente las selvas amazónicas y de la Orinoquía siendo reemplazadas en los periodos secos por sabanas y aún desiertos, y en los periodos húmedos, como el actual, se expanden y solo quedan sectores áridos en algunos valles debido a la influencia de los vientos alisios, que producen una inversión térmica.

▪ **Geomorfología de la Región Orinoquía**

En razón a la estructura geológica, el bioclima, la pendiente y las herencias geomorfológicas y el uso dado por el ser humano condicionan y generan sistemas morfogénicos que permiten clasificar el dominio orinques con una temperatura igual o mayor a los 25 °C y con precipitaciones que varían de 1.500 a 2.500 mm/año. Su régimen de precipitación es monomodal estacional con un periodo fuerte de lluvia seguido de una extensa sequía, lo que favoreció la consolidación de una cobertura vegetal dominante de sabana herbácea y sabana arbolada.

Los tipos de relieve dominantes para la región de la Orinoquía, de acuerdo a la clasificación realizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, contemplan el lomerío fluviogravitacional, entre los ríos Vichada y Guaviare, el valle aluvial, entre los ríos Meta y Vichada, las planicies aluvial, en algunos sectores entre el río Guaviare y el río Inírida, y las planicies eólicas, principalmente en el sector de los ríos Arauca, Casanare y Meta.

Este último tipo de relieve, las planicies eólicas, son consideradas como llanuras aluviales de desborde, cubiertas por limos y arenas finas desplazadas por la acción de los vientos alisios desde las cordilleras, en un periodo geológico donde el clima reinante era más secos que el actual. Este relieve incluye dunas sobresalientes sobre la llanura, cubierta por poca vegetación recientemente.

2.1.2 Principales sistemas geográficos

Los principales sistemas de relieve geográfico que consolidan el paisaje de la región de estudio son: de este a oeste y de norte a sur, el denominado Escudo o Macizo Guyanés, (posicionado en Guyana Francesa, Surinam, el norte de Brasil, Guyana, centro y sur de Venezuela y el este de Colombia); y la bifurcación oriental de la cordillera de los Andes, (que ocupa territorio colombiano y venezolano). Figura 2-1.



Figura 2-1:Ubicación de los principales sistemas geográficos de la región de estudio. . Imagen tomada de Microsoft Corporation.

▪ **El Macizo Guayanés**

Sus límites son el río Orinoco al norte y al oeste, y la selva Amazónica al sur. Tiene una forma irregular muy resistente a la erosión, desde el punto de vista geológico. Esta cobertura sufrió un levantamiento y plegamiento casi desde el mismo momento de formación del planeta Tierra, lo cual ha originado unas mesetas muy elevadas y de pendientes verticales, denominadas tepuyes, un término de origen indígena (de la lengua pemón) que significa montaña, que pueden alcanzar los 2270 metros en Venezuela.

Se distingue porque aquí se encuentra la caída de agua más alta del mundo: el Salto Ángel, de 979 m. Los ríos de la zona a medida que el macizo ascendía, fueron erosionando y profundizando sus cauces hasta formar verdaderos cañones por los que corren en la actualidad.

En estas mesetas predominan las sabanas y los bosques en galería a lo largo de los ríos. Hacia el este, donde la altura es menor, se desarrollan selvas tropicales y manglares sobre las costas del Atlántico. En algunos sectores las rocas están cubiertas de sedimentos que contienen importantes depósitos de minerales, entre ellos hierro y la bauxita, que se explotan con gran intensidad. Es una de las regiones con gran biodiversidad del mundo. La Guayana cuenta con más de 2200 especies de vertebrados. El escudo guayanés está cubierto por una amplia masa forestal tropical inalterada.

Su extensión en Venezuela es de unos 430.000 kilómetros cuadrados, ello equivale decir, casi la mitad del territorio nacional, (45%). En su basamento se encuentran rocas ígneas (granito, cuarzo, etc.) y metamórficas (esquisto, gneis) que se datan del periodo Precámbrico antes de que se iniciara la era Paleozoica.

Se le reconoce como un espacio con suelos tropicales pobres y con una alta fragilidad económica que limita su explotación. Tradicionalmente es conocido como una región de actividad agrícola y ganadera en pequeñas escalas¹.

▪ **Cordillera Oriental**

1. Hammond, David S. (ed.) (2005) *Tropical Rainforests of the Guianan Shield* CABI Publishing, Wallingford, UK, ISBN

Comprende la bifurcación oriental de la cordillera de los Andes, que es la cadena montañosa más importante de Sur América y atraviesa Argentina, Chile, Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia y parte de Venezuela.

Gradualmente se separa de la cordillera de los Andes en el Nudo de Almaguer o Macizo Colombiano en el departamento del Cauca hasta la Serranía del perijá en La Guajira, creando la cuenca del río más importante de Colombia, el Magdalena.

Durante su sección en territorio colombiano se destacan, el Altiplano Cundi-boyacense, los picos de la Fragua, el cerro Miraflores, el Nevado de Sumapaz (3.820 m) y los páramos de Chingaza (3.950 m), y Pisba (3.900 m); su máxima altura corresponde a la Sierra Nevada del Cocuy (5.380 m). En los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander esta cordillera adquiere su mayor anchura con 300 km.

En el departamento de Norte de Santander en el Nudo de Santurbán, se subdivide en dos brazos; el oriental penetra el territorio venezolano donde adquiere el nombre de Cordillera de Mérida, y el occidental que da origen a las Serranías de Los Motilones y Perijá, como límite natural entre Colombia y Venezuela.

La cordillera de Mérida es la cadena montañosa de mayor altura en Venezuela teniendo como su máximo punto el pico Bolívar 4978,4 msnm. Junto con la serranía de Perijá conforman el ramal venezolano de la cordillera de Los Andes. Está compuesta por diversas serranías siendo las más conocidas la sierra Nevada de Mérida y la sierra La Culata, ambas localizadas en la zona media de la cordillera dentro del estado Mérida.

La cordillera Oriental es la de mayor amplitud climática y variedad geográfica; presenta paisajes de sabana llanera, bosques húmedos, zonas áridas de vegetación xerófila, litoral lacustre, y páramos de nieves perpetuas que convergen a lo largo y ancho de la geografía, como el Pico Bolívar en Venezuela, o el Nevado del Cocuy.

En las zonas de Piedemonte, y a medida que se encuentra más alejado de la Cordillera, el paisaje es relativamente más árido y seco en la mayoría del año, y frecuentemente inundado en los meses invernales.

La parte septentrional de esta cordillera posee salida al mar a través del Lago de Maracaibo, Venezuela, utilizando el Puerto de La Ceiba en el Estado Trujillo; sin embargo, su mayor enlace con el exterior se da en la frontera internacional del Estado Táchira con la República de Colombia a través de las aduanas terrestres de San Antonio y Ureña.

2.1.3 Recuro hídrico

La Región de la Orinoquía es denominada de esta manera porque su principal afluente hídrico es el Río Orinoco, uno de los más antiguos, caudalosos y largos del mundo. De acuerdo a la clasificación realizada por el IGAC, fue clasificada como la vertiente del Orinoco, siendo la más grande de Colombia con un área de 347.678 km² equivalente al 30% del territorio nacional.

Incluye grandes ríos de los cuáles su nacimiento principal se origina en la cordillera Oriental, como el Orinoco, el Guaviare, el Meta y el Inírida, y otros de menor longitud, como el Tomo y el Vichada, luego de descender a la llanura se desplazan y generan amplias zonas de inundación.

Por lo general los ríos de esta región presentan sus menores caudales de diciembre a marzo, y entre junio y agosto los máximos del año. En Puerto Carreño (Vichada), el río Meta registra su menor caudal en febrero, (1.057 m³ s⁻¹), y el mayor en julio (9.635 m³ s⁻¹).

Por su parte, el caudal del río Guaviare en enero es de 791 m³ s⁻¹, y alcanza los 5.115 m³ s⁻¹ en julio. El menos caudaloso, en Nunchía (Casanare), es el río Cravo Sur, con menos de 70 m³ s⁻¹ de enero a marzo y 459 m³ s⁻¹ en julio. El área de los Llanos Orientales Colombianos recibe una gran influencia de la formación geológica de Venezuela, ya que se encuentran en uno de los bloques continentales más antiguos de la tierra, el Macizo Guayanés, zona de alta influencia de los vientos alisios. Esta condición geográfica afecta directamente los cambios de velocidad y dirección, hacia el territorio nacional.

2.2 Vientos Alisios

La zona ecuatorial genera una destacada importancia, ya que se constituye en el motor climático planetario al recibir directamente la energía del sol. Por diferentes mecanismos físicos y dinámicos se generan diferentes sistemas de circulación atmosférica, transportando esta energía a todo el planeta y modulando los sistemas climáticos en una escala espacio temporal más pequeña para las diferentes regiones.

Además de presentar una importancia significativa en la historia de la humanidad, (Montoya, Pelkowsky & Eslava, 2001), los vientos alisios, como consecuencia de la circulación atmosférica, (nacen en las altas subtropicales y fluyen hacia el Ecuador), revisten de gran importancia en los trópicos, ya que su interacción con otros sistemas modula el clima para muchas regiones, en especial para nuestro país por la formación de la Zona de Confluencia Intertropical.

En Colombia, los vientos alisios influyen una fuerte influencia sobre las regiones planas del país, como la llanura del Caribe y la Orinoquía, en donde se observan circulaciones definidas en el transcurso del año. En estas regiones donde los alisios actúan con fuerza se presenta una sola temporada de lluvias y una seca.

Cuando los alisios se intensifican, en especial para el Invierno Boreal, dan lugar a diferentes corrientes en chorro de bajo nivel, que afectan las condiciones meteorológicas en Colombia, como la del mar Caribe, (Pacheco, & León, 2003), la Corriente de los Andes Orientales, CAO, (Montoya, Pelkowsky & Eslava, 2001).

2.3 Corrientes en chorro de bajo nivel

Desde hace varias décadas, corredores definidos de viento con velocidades entre los 6 y 7 Kt, en el núcleo y alturas de 1.5 km, han llamado la atención de diferentes investigadores, como por ejemplo, la corriente en chorro de niveles bajos en el África Oriental Ecuatorial, (Findlater 1969), descubierta a mediados de los años sesenta, acompañada de una fuerte cizalladura vertical y horizontal (Hastenrath, 1991); a partir de este hecho, se ha observado que en varias regiones tropicales se presenta este tipo de sistema que tienen un carácter estacional marcado (Pacheco, & León, 2003).

Durante el invierno boreal, cuando la Zona de Confluencia Inter-tropical (ZCIT) se encuentra en su posición más al sur, los vientos Alisios del Noreste en el Caribe se intensifican, generando corrientes definidas en los niveles bajos de la atmósfera, como la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe, (Amador & Magaña, 1999; Pacheco, & León, 2003), denominada por Poveda & Mesa (1999;2000) como el Chorro de San Andrés, localizada entre los 10 y 15 grados de latitud norte con vientos entre los 10 y 15 $m^3 s^{-1}$, los cuales alteran significativamente las condiciones de tiempo en el Caribe Suroccidental.

Dentro de las características particulares de las corrientes en chorro de bajo nivel, se encuentra la amplia línea de cortante vertical, sobre y debajo del nivel de la corriente en chorro, y a ambos lados con amplitudes que pueden alcanzar los 200 a 300 km. Lo más interesante de las corrientes en chorro se relaciona con el transporte de humedad, y su influencia en las precipitaciones.

2.3.1 Mecanismos de formación

Existen diferentes mecanismos de formación de las corrientes en chorro, entre las que se encuentran la oscilación inercial, baroclinidad superficial, forzamiento del terreno, el desplazamiento vertical de la parcela, entre otros que son explicados en Stensrud (1996), y Blackadar (1957).

Este último en especial plantea en su teoría el ciclo de la corriente en chorro de bajo nivel como una oscilación inercial que se basa en el retraso a velocidades de aire subgeostrófico de la tropósfera baja, debido a la mezcla vertical turbulenta durante el día.

Uno de los mecanismos analizado por Holton (1967), describe la naturaleza de la corriente en chorro de bajo nivel como una respuesta a la calefacción diurna y enfriamiento de terreno en pendiente, que se traduce en una variación periódica en el viento térmico y una consecuente oscilación del viento geostrófico de superficie.

Este mecanismo no hace ninguna apelación a las variaciones en la mezcla turbulenta y tiene la ventaja de explicar porqué la corriente en chorro tiende a ubicarse sobre Grandes Llanuras, que la teoría Blackadar no aborda.

2.3.2 Corrientes en Chorro de Bajo Nivel que tienen influencia sobre Colombia

Diferentes autores han identificado una corriente de vientos ubicada en los niveles bajos de la atmósfera sobre el norte de Suramérica. Esta corriente puede estar asociada con los alisios del noreste que marcan una gran influencia sobre esta región. (Montoya, Pelkowsky, Eslava, 2001). Estos autores denominan la Corriente de los Andes Orientales (CAO), a la corriente generada por la influencia de los alisios del noreste sobre este sector y la analizan teóricamente a través de la relación del viento y la presión para latitudes bajas, generado en la alta del Atlántico norte y una baja presión desarrollada sobre el continente americano durante el invierno boreal, en la Cuenca del Río de la Plata. Esta corriente se presenta durante los meses de noviembre y abril, y se extiende hacia el Sur del continente, con velocidades máximas de 10 a 12 m/s.

Evidencian que debido a que los vientos son un eficiente mecanismo de transporte de humedad, polen polvo y otras partículas desde la costa occidental africana hasta el Caribe y norte de Suramérica, su persistencia y la existencia de la CAO, durante el invierno boreal, puede tener profundas consecuencias en la modulación del ciclo hidrológico de la Amazonía y en la formación de su flora y fauna, así como su influencia en el transporte de humedad para la alimentación de los ríos amazónicos.

La Corriente en Chorro del Chocó, (Chorro del Oeste de Colombia), ha sido analizada en diferentes estudios, y es un importante fundamento para explicar los records mundiales de precipitación sobre el Pacífico oriental, ya que tiene un significativo transporte de humedad ($3.800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). (RUEDA, O. & G. Poveda. 2006). Presenta un ciclo anual muy fuerte, intensificándose desde mayo, hasta alcanzar un máximo en octubre – noviembre (Poveda y Mesa, 1999), y disminuyendo hasta alcanzar sus valores mínimos entre los meses de febrero y marzo. La advección de humedad, la humedad específica y la

componente zonal de la velocidad del viento son analizadas por los autores, y presentan los máximos valores para las variables analizadas durante trimestre mencionado.

Esta corriente cumple con los rasgos principales para ser clasificada como corriente en chorro de bajo nivel, como se observa en la clasificación realizada por Poveda y Mesa (2000), en base a los criterios de Stesrud, (1996).

Uno de los más recientes trabajos presentados por Poveda et al. (2014), trata sobre los regímenes de precipitaciones estacionales a lo largo de las vías de las corrientes de bajo nivel y ríos aéreos de Sudamericana, este tema además de presentar interesantes argumentos, identifican dos de las corrientes en chorro de bajo nivel que transportan grandes cantidades de humedad y convergen sobre el Pacífico Oriental, (Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe, o de San Andrés, y la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Chocó), hace mención al Río Aéreo del Este de los Andes, un segmento filamentosos preferencial, que va desde el norte de Sur América hasta la cuenca del Río de la Plata. Este tiene grandes vías de flujo de humedad.

En este estudio, el concepto de Río Aéreo es analizado a través de diferentes autores, e indica que se encuentra activo durante todo el año, aunque transporta las mayores cantidades de humedad durante el verano austral, asociada con vientos alisios mas intensos, desde el norte del Atlántico Tropical, y el vapor de agua evapotranspirado de la Amazonía. (Poveda et al. 2014). Concepto que coincide con lo expuesto por Montoya, Pelkowsky, Eslava, (2001), sobre la CAO.

Los vientos fuertes de niveles bajos presentados en la Cuenca del Mar Caribe, también han sido estudiados por diferentes autores, quienes los presentan como la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe, y son coincidentes en resaltar el significativo transporte de humedad que se mantiene casi durante todo el año, [(Cook & Vizy, 2009), (Pacheco, L. & G. León. 2003)], .Esta corriente presenta altos valores integrados de advección de humedad, que son transportados hacia Centro América, afectando la península de la Guajira y el Archipiélago de San Andres, Povidencia y Santa Catalina, en Colombia específicamente.

Las altas correlaciones presentadas por Cook & Vizy, 2009, entre las anomalías mensuales del viento zonal, y las anomalías de precipitación, para los 12 ° - 15°N, y los

70° -75°O, denotando que una fuerte correlación para los meses entre mayo y octubre en los transportes de humedad.

Finalmente, otra de las Corrientes en Chorro de Bajo Nivel, analizadas que afecta entre muchos otros componentes la hidroclimatología colombiana, es precisamente la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Venezolanos. (Torrealba & Amador, 2010). Esta corriente muestra valores medios de 11 m/s durante el verano austral (noviembre – abril), en 925 hPa, su núcleo se encuentra entre los 67.65°O y 7.5°N, en una región denominada como el corazón de los Llanos Venezolanos.

Este estudio derivado entre otros, de las observaciones realizadas por PAC-SONET, (2001-2006), presenta esta corriente con un marcado ciclo diurno con máximos a las 12:00UTC, y vientos relativamente débiles a las 21:00UTC, manifestando fuertes cambios en la cortante vertical del viento entre enero y marzo. Denotan una extensión zonal y meridional de 1500 y 500 km respectivamente. Su ciclo anual se encuentra bien definido y presenta un máximo para el mes de febrero (estación seca).y un mínimo para el mes de agosto. (estación húmeda).

La advección de humedad asociada con la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Venezolanos, inicia su ingreso a territorio colombiano a partir del mes de noviembre, y hasta el mes de marzo, lapso en el cuál empiezan a descender los valores del transporte de humedad presentado por la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del CHOCÓ.

Las interacciones presentadas por las diferentes corrientes en chorro de bajo nivel, en referencia al significativo transporte de humedad hacia el territorio colombiano, constituyen un importante mecanismos que impacta directamente la hidroclimatología de la región.

3. Metodología y Datos Usados

El presente estudio se realizó con los datos disponibles de estaciones meteorológicas del IDEAM, reportes METAR (son reportes generados por los observadores aeronáuticos de los aeropuertos con una periodicidad de horaria o cada media hora dependiendo del aeródromo), de siete de los aeropuertos de la región de estudio, sondeos de dos de las estaciones de lanzamiento ubicadas en el sector en el marco del proyecto de la NOAA PACSONET, (pueden ser descargados desde el portal web: <http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/web/ARCHIVED/pacsdata.shtml>), entre los años 2002 y 2006. También se realizó a través del análisis de datos de reanálisis de ERA INTERIM, (obtenidos en el portal: <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>) entre enero de 1983 y diciembre de 2013. La alta resolución del Reanálisis ERA-I (0.125°, 13.8 km), suple la deficiencia en la obtención de series de datos observados tanto en superficie, como en altura (Sondeos) de la Región Orinoquia del país. El análisis de los datos se hizo mediante el lenguaje de programación NCL (NCAR Command Language).

La mayoría de estudios existentes sobre corrientes en chorro de bajo nivel, utilizan análisis sobre datos modelados por reanálisis; sin embargo, su resolución es de 1°, lo cual dificulta la precisión de los resultados esperados.

Los datos modelados con base al reanálisis fueron comparados con las observaciones de las variables de viento obtenidas en 3 estaciones sinópticas ubicadas en la región de estudio, con el fin de tener un punto de comparación real de la variabilidad mensual del viento en superficie en relación con el comportamiento del chorro. Así mismo, se analizarán los sondeos disponibles de las estaciones de Marandúa, y Apiay.

De esta manera a través de técnicas gráficas y estadísticas fue posible determinar la variabilidad espacio temporal del fenómeno en los llanos orientales colombianos y su comportamiento e influencia en las condiciones atmosféricas del sector.

3.1 Selección del área de estudio

Los llanos orientales colombianos, se encuentra ubicada entre los 2° y 7° Norte, y los 68° y 74° Oeste, descartando la zona montañosa que corresponde al brazo oriental de la Cordillera de los Andes. Comprenden una extensión de los 285.437 km² y se encuentran clasificados dentro de la Región Orinoquía.

Para el análisis de la corriente en chorro de bajo nivel de los llanos orientales, fue establecido un dominio comprendido entre los 15°N y 10°S, y los 65°W y 85°W. De esta manera fue posible observar y analizar los sistemas externos que influyen directamente la formación y movimiento de esta corriente y su desarrollo en esta región de la geografía nacional y su posible continuación hacia el sur del continente.

Para dar tratamiento a los datos de re análisis derivados de ERA INTERIM, en el lapso de 1983 y 2013, para el área escogida, se partió del criterio de que este tipo de corrientes se presentan entre los niveles de 925 hPa y 850 hPa, (Stensrud, 1996; Hanstenrath, 1991), así que se seleccionó el nivel de 850 hPa. Esto sumado a que se observó el núcleo en este nivel, por medio de los cortes verticales como se describirá más adelante.

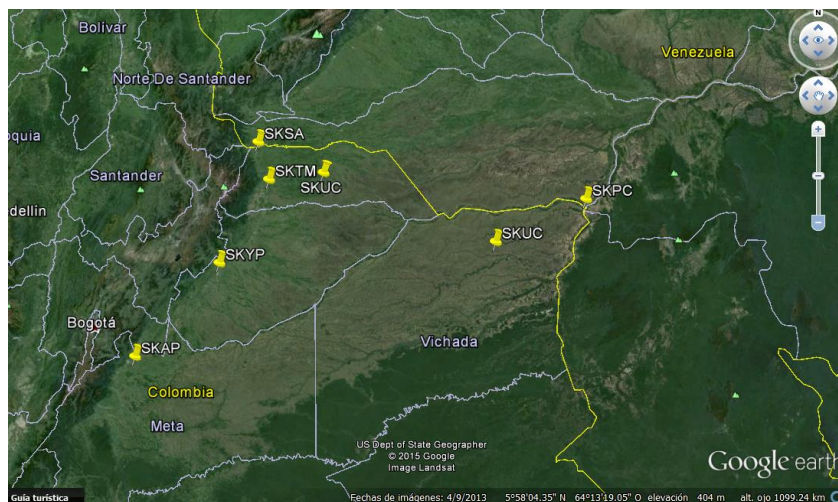
3.2 Análisis de datos observados

▪ Datos obtenidos de reportes METAR

Para la obtención de datos horarios de dirección y velocidad del viento, al principio de este estudio, fueron seleccionados 7 aeródromos ubicados dentro de la región de estudio, en los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y Vichada. De acuerdo al AIP (Aeronautical Information Publication), establecida por la Aerocivil para estos aeródromos, se contempla horarios de funcionamiento que no contemplan los reportes nocturnos como se especifica en la siguiente tabla. Los aeródromos militares (Base Aérea German Olano, Vichada y Base Aérea Luis F. Gómez Niño, Meta), cuentan con operación y reporte METAR 24 horas, como se observa en la tabla 1-1.

Tabla 3-1: Estaciones Meteorológicas con reportes METAR utilizadas para el estudio

	Nombre, (Código IATA)	Ubicación		Elevación(m)	Serie de tiempo disponible	Horario de reporte (UTC)
1	Aeropuerto Santiago Pérez Quiroz, (SKUC)	Arauca, Arauca	07°04'07"N 70°44'12"W	128	2008-2013	1200-0200
2	Base Aérea Luis Fernando Gómez Niño, (SKAP)	Apiay, Meta	04°04'33"N 73°33'45"W	417	2008-2013	0000-2300
3	Base Aérea Luis Arturo Rodríguez Meneses, (SKUA)	Marandúa, Vichada	05°31'28"N 68°41'08"W	87	2008-2013	0000-2300
4	Aeropuerto Germán Olano, (SKPC)	Puerto Carreño, Vichada	06°11'05"N 67°29'35"W	50	2008-2013	1000-2300
5	Aeropuerto Los Colonizadores, (SKSA)	Saravena, Arauca	06°57'17"N 71°51'37"W	148	2009-2013	1000-2300
6	Aeropuerto Gabriel Vargas Santos, (SKTM)	Tame, Arauca	06°27'04"N 71°44'35"W	350	2009-2013	1000-2300
7	Aeropuerto el Alcaraván, (SKYP)	Yopal, Casanare	05°19'08"N 72°23'02"W	325	2010-2013	1000-0300

**Figura 3-24:** Distribución geográfica de las estaciones analizadas para realizar la variación diurna del viento con base a reportes horarios METAR. Elaboración propia sobre Sistema de Información geográfica tomada de Google Earth.

La selección de datos provenientes de los reportes horarios METAR de las estaciones anteriores se realizó considerando las estaciones con un número de observaciones superiores al 85%, en el lapso 2008 a 2013, (a partir del 2008 se tienen reportes oficiales de las estaciones de este sector). Se descartaron inicialmente las estaciones de los Aeropuertos Santiago Pérez Quiroz, Arauca, el Alcaraván de Yopal, Germán Olano, Puerto Carreño, Los Colonizadores, Saravena, y Gabriel Vargas Santos, debido a que se encontró un faltante de datos superior al 30%, sobre el horario autorizado de reportes.

Finalmente sólo quedaron 2 estaciones para el análisis, correspondiente a las bases aéreas Luis Fernando Gómez Niño, (SKAP) y Luis Arturo Rodríguez Meneses, (SKUA), con porcentajes totales de datos superiores al 85%.

Se realizaron pruebas de calidad consistentes en la búsqueda de errores tipográficos en la digitación del METAR, así como de los valores inferiores a 0 KT. Finalmente se buscaron los valores de velocidades de viento con una desviación estándar superior a 4, lo que obligó a la verificación de la correspondencia sobre el mes y año en que se generó con algún evento especial (como el ENSO).

▪ **Datos de precipitación del IDEAM**

Luego de evaluar el sector de mayor influencia de la corriente en la corriente en chorro, fue solicitado al IDEAM, (por medio del convenio de cooperación existente entre la Fuerza Aérea Colombiana y esa entidad), los datos mensuales de precipitación, dirección y velocidad del viento, de las estaciones Climatológicas, Ordinarias, Principales, Sinópticas Principales y Pluviométricas del lapso estudiado, (1983-2013).

Los datos obtenidos se sometieron a un proceso de depuración, que consistió en:

- Selección preliminar: de las 30 estaciones solicitadas, sólo se obtuvo información de 3 de ellas para velocidad y dirección del viento; (Aeropuerto de Arauca, El Yopal y Puerto Carreño), y 10 estaciones de precipitación.

Detección de vacíos en las series de datos del periodo 1983-2013 de las estaciones con información de precipitación: una vez organizada la información procedente del IDEAM, se revisó la cantidad de datos existentes para el periodo 1983-2013, encontrándose que para la precipitación se descartaron 20 estaciones ya que no contenían datos para 1983-2013 (8 estaciones), o poseían datos faltantes mayores al 20% para el mismo periodo (12 estaciones). En total quedaron 10 estaciones, distribuidas así: 1 en Meta, 2 en Vichada, 4 en Arauca y 3 en Casanare.

De los datos de velocidad y dirección del viento se descartó el Aeropuerto de Yopal, ya que se evidenció un porcentaje de 38% de datos faltantes, quedando en total 2 estaciones, distribuidas así: 1 en Vichada, 1 en Arauca.

Tabla 3-2: Metadatos de Estaciones Meteorológicas utilizadas dentro del área de estudio con porcentajes de datos faltantes menores al 20%, para el periodo de estudio.

Código	Tipo	Nombre	Ubicación		Elevación (m)
37055010	Sinóptica Principal	Aeropuerto Arauca	Arauca	07°04'N 70°44'W	128
36025010	Climatológica Ordinaria	Tame	Arauca	06°27' 71°44'W	350
37045010	Climatológica Ordinaria	Saravena	Arauca	06°56'N 71°53'W	148
35230010	Pluviométrica	San Luis de Palenque	Casanare	05°25' N 71°43' W	170
35230030	Pluviográfica	Tablón de Tamara	Casanare	05°44'N 72°06'W	350
35215010	Climatológica Principal	Aeropuerto Yopal	Casanare	05°19' N 72°23' W	325
37050050	Pluviométrica	Villanueva	Casanare	06°56' N 71°15' W	100
35120010	Pluviométrica	Puerto Gaitán	Meta	04°18' N 72°04' W	150
38015030	Sinóptica Principal	Aeropuerto Puerto Carreño	Vichada	06°10' N 67°29' W	50
33050020	Pluviométrica	La raya	Vichada	04°30' N 69°36' W	90

- Relleno de datos faltantes y control de calidad de la información: Para este procedimiento, se siguió la siguiente metodología:
- Detección de las estaciones con datos faltantes en la serie mensual. 1983-2013.
- Revisión de la correspondencia de la ubicación de la estación en los departamentos del país, ubicación en las coordenadas y en la elevación según el catálogo de estaciones del IDEAM.
- Selección de estaciones de referencia (que contengan series con al menos 30 años de datos).
- Filtrado de los datos: Se aplican filtros físicos y gruesos. Los filtros físicos consisten en la revisión de que las variables se encuentren en los rangos físicos razonables, por ejemplo, que no hayan valores de precipitación menores a 0mm, de temperaturas que se presentan en la zona. Por su parte, los filtros gruesos se utilizan en toda la serie de datos con el fin de encontrar valores atípicos (mayores a 3 o 4 desviaciones estándar) y verificando si realmente esos valores ocurrieron

(por efecto de un evento ENSO u otro factor) o si el dato registrado presenta fallas de digitación.

- Obtener la serie modelada con datos provenientes de ERA INTERIM, para el mismo lapso de tiempo, como patrón de comparación, del mismo punto en donde se encuentra la estación a completar.
- Relleno de series faltantes: Una vez obtenida esta serie, se procede al relleno de los datos faltantes de la estación. Para ello, se comparan la estación patrón con las estaciones a rellenar mediante el método de dobles masas. Y se ajusta una regresión lineal bajo la ecuación de la recta ($y = mx + b$), donde x es el dato de la estación patrón y y representa el dato a rellenar.
- **Datos de sondeos realizados por la Fuerza Aérea Colombiana en el marco del proyecto PACSONET 2005-2006**

Se obtuvieron los datos de sondeos que se realizaron en las campañas lideradas por Michael Douglas del Laboratorio Nacional de Tormentas Severas (NSSL), que hace parte de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), durante el 2005-2006, del proyecto PACSONET (Pan American Climate Studies Sounding Network).

Estos lanzamientos fueron realizados en Colombia desde los aeródromos de Cartagena, Barranquilla, la Escuela Militar de Aviación en Cali, las Bases Aéreas de la Fuerza Aérea Colombiana de Palanquero, Tres Esquinas, Marandúa y Apiay, siendo estas dos últimas las seleccionadas para el análisis ya que se encontraban dentro del área de estudio. Su periodo de lanzamiento exacto comprende las fechas entre el 8 de septiembre de 2005, a 29 de noviembre de 2006, con dos lanzamientos por día uno a las 1200Z y el otro a las 2200Z.

Se realizó entonces un análisis inicial de los datos, encontrando un total de datos correspondiente al 92% para la Base Aérea de Apiay y del 88% de datos para la base Aérea de Marandúa en el Vichada.

Posteriormente fue evaluada la calidad de los datos, sin encontrar errores de digitación o con valores superiores a 4 desviaciones estándar. De esta manera se procedió a realizar el análisis de perfiles verticales para este estudio.

Al final solamente dos estaciones de la región seleccionada cuentan con la mejor calidad de datos observados de reportes horarios METAR, datos de precipitación y sondeos que pueden ser comparados entre sí para el análisis. (Base Aérea Luis f. Gómez Niño, Apiay y la Base Aérea Luis Arturo Rodríguez Meneses, Marandúa).

Esta es una de las razones por las cuales se dificultan los análisis de los vientos en esta región del país, ya que la inexistencia de datos observados obliga a ejecutar técnicas de modelado para suplir esta deficiencia.

3.3 Reanálisis ERA INTERIM

Esta herramienta desarrollada por el ECMWF (European Centre for Medium – Range Weather Forecasts), es un reanálisis global de la atmósfera que cubre un periodo de datos desde 1979 (originalmente, ERA-Interim (ECMWF Re-Análisis) corrió a partir de 1989, pero la extensión de 10 años para 1979-1988 se produjo en 2011), y continuando en tiempo real, con actualizaciones mensuales. Las referencias, manuales de uso y datos pueden ser descargados desde su portal web (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>) luego de efectuar el registro.

El proyecto ERA-Interim se inició en 2006 para proporcionar un puente entre el reanálisis del ECMWF anterior, ERA-40 (1957-2002), y la siguiente generación de reanálisis previsto por el ECMWF. Los principales objetivos del proyecto eran mejorar en ciertos aspectos clave de la ERA-40, como la representación del ciclo hidrológico, la calidad de la circulación estratosférica, y el manejo de los prejuicios y los cambios en el sistema de observación. Estos objetivos se han alcanzado en gran parte como resultado de una combinación de factores, incluyendo muchas mejoras al modelo, (uso de análisis variacional de 4 dimensiones, análisis de humedad, uso de corrección del sesgo variacional para los datos de satélite, y otras mejoras en el manejo de datos.

El sistema de modelo atmosférico y de reanálisis ERA-Interim utiliza el ciclo 31r2 del Sistema Integrado de ECMWF Pronóstico, que fue presentado operacionalmente en septiembre de 2006, configurado para la siguiente resolución espacial:

- 60 niveles en la vertical, con el nivel superior en 0.1 hPa.
- Representación esférica armónica T255 para los campos dinámicos básicos.

- Malla gaussiana reducida aproximadamente uniforme a 79 kilómetros espaciamento para otros campos de puntos de rejilla de la superficie.
- Modelo atmosférico acoplado a un modelo de onda del océano de 30 frecuencias de onda y 24 direcciones de onda en los nodos de su rejilla latitud longitud reducida $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$.

La asimilación de datos ERA-Interim y pronóstico de los paquetes produce cuatro análisis diarios, (en 00, 06, 12 y 18 UTC); y dos pronósticos a 10 días por día, inicializados en los análisis de las 00 y 12 UTC.

El análisis producido a las 00 UTC en un día determinado implica observaciones tomadas entre 15 UTC del día anterior y 03 UTC del día de hoy; el análisis a las 12 UTC implica observaciones entre 03 UTC y 15 UTC.

Los campos del modelo atmosférico se archivan ya sea en la resolución espectral T255 completo o en el N128 correspondiente a una reducción de la malla gaussiana, dependiendo de su representación básica en el modelo. Los campos del modelo de onda acoplado del océano se guardan en su cuadrícula latitud / longitud reducida de $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$, (Dee, et al, 2011).

La rejilla de Gauss N128 es simétrica respecto al ecuador, con una separación norte-sur, que es uniforme en latitud, con una separación de aproximadamente de 0.703125° . Hay 128 puntos alineados a lo largo del meridiano de Greenwich desde el ecuador a los polos. El número de puntos en la dirección este-oeste varía con la latitud, con espaciado de la cuadrícula uniforme a lo largo de una determinada línea de latitud. Esta separación es 0.703125° en la mayor parte de las zonas tropicales.

Los paquetes de datos iniciales utilizados por ERA INTERIM, comprenden observaciones de estaciones de superficie, datos de radio sondeo, datos de algunos satélites entre otros, que pasan por un filtro de calidad en el que se le aplican pruebas estadísticas antes de ser ingresados en el sistema. (Bálsamo et al, 2015)

ERA INTERIM cuenta con 60 niveles de datos de viento superiores, 37 niveles de presión, asumiendo la presión en superficie como 1013, 25 hPa, y 15/16 niveles isentrópicos. Permite realizar el análisis de datos de manera mensual, diaria, cada 6 horas, por niveles de presión, y de diferentes variables océano – atmosféricas, como son descritas en C. ALBERGEL, et al, 2013.

Para la realización de este estudio se utilizó el reanálisis realizado en la serie 1983-2013, para el dominio entre 15°N y 10°S, y 55°W y 85°W, en las componentes del viento u y v, la humedad específica, para los niveles de presión 850 hPa y 925 hPa. Para los cálculos de humedad integrada en la columna vertical se utilizaron los niveles de 1000, 850, 700, 500, 300, 250, 200, 150, 100, 70 y 50 hPa.

4. Resultados

4.1 Localización de la corriente en chorro de bajo nivel

4.1.1 Ciclo Anual

El dominio escogido para el análisis inicial de este fenómeno se ubica en el norte de Sur América, y permite el análisis de la trayectoria y posibles factores influyentes en su desarrollo, así como su injerencia en particular en el territorio colombiano. Inicialmente es importante realizar una revisión a los principales sistemas geográficos del sector, como se muestra en la Figura 4-1, que fueron descritos anteriormente para tener una ubicación geoespacial de la corriente en chorro de bajo nivel.

Gracias a la resolución escogida para el re análisis de los datos (0.125°), fue posible caracterizar detalladamente el fenómeno de estudio y observar una alta influencia de la corriente de los Llanos Colombo-Venezolanos de Sur América. La Figura 4-2 presenta el ciclo anual promedio de la velocidad de los vientos a la altura de los 850 hPa. Se observa que esta corriente tiene su origen en el centro de Venezuela, como se evidencia en Figura 4-2, así que coincide con ella en la época de mayor intensidad, durante el verano austral entre noviembre y abril, (Torrealba & Amador, 2010), siendo este el periodo de mayor influencia en el territorio colombiano, (Figura 4-2, k,l,a,b,c).

Trabajos como el de Poveda et al. (2014), sobre los regímenes de precipitaciones estacionales a lo largo de las vías de las corrientes de bajo nivel y ríos aéreos de Sudamericana, además de interesantes, identifican dos de las corrientes en chorro de bajo nivel que transportan grandes cantidades de humedad y convergen sobre el Pacífico Oriental, (Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe, o de San Andrés, y la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Chocó), contribuyendo significativamente al record mundial de precipitaciones en este sector.

También identifica como Río Aéreo del Este de los Andes, al segmento filamentososo preferencial desde el norte de Sur América y hasta la cuenca del Río de la Plata, tiene grandes vías de flujo de humedad, que son coincidentes en una porción con la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales en su paso por el territorio colombiano. En este estudio, el concepto de Río Aéreo es analizado a través de diferentes autores, e indica que se encuentra activo durante todo el año, aunque transporta las mayores cantidades de humedad durante el verano austral, asociada con vientos alisios mas intensos, desde el norte del Atlántico Tropical, y el vapor de agua evapotranspirado de la Amazonía. (Poveda et al. 2014).

La Figura 4-1 permite observar una corriente en chorro que penetra al continente suramericano por la Guyana Francesa, Surinam y continua por los estados del norte de Brasil Amapá, Pará y Roraima proveniente del Océano Atlántico, entre los 6° y 8° de latitud norte a finales del mes de octubre. Inicia su ascenso hasta alcanzar su punto más septentrional en marzo sobre la Península de Paria en Venezuela, cerca de la Isla de Trinidad y Tobago en 11°N.

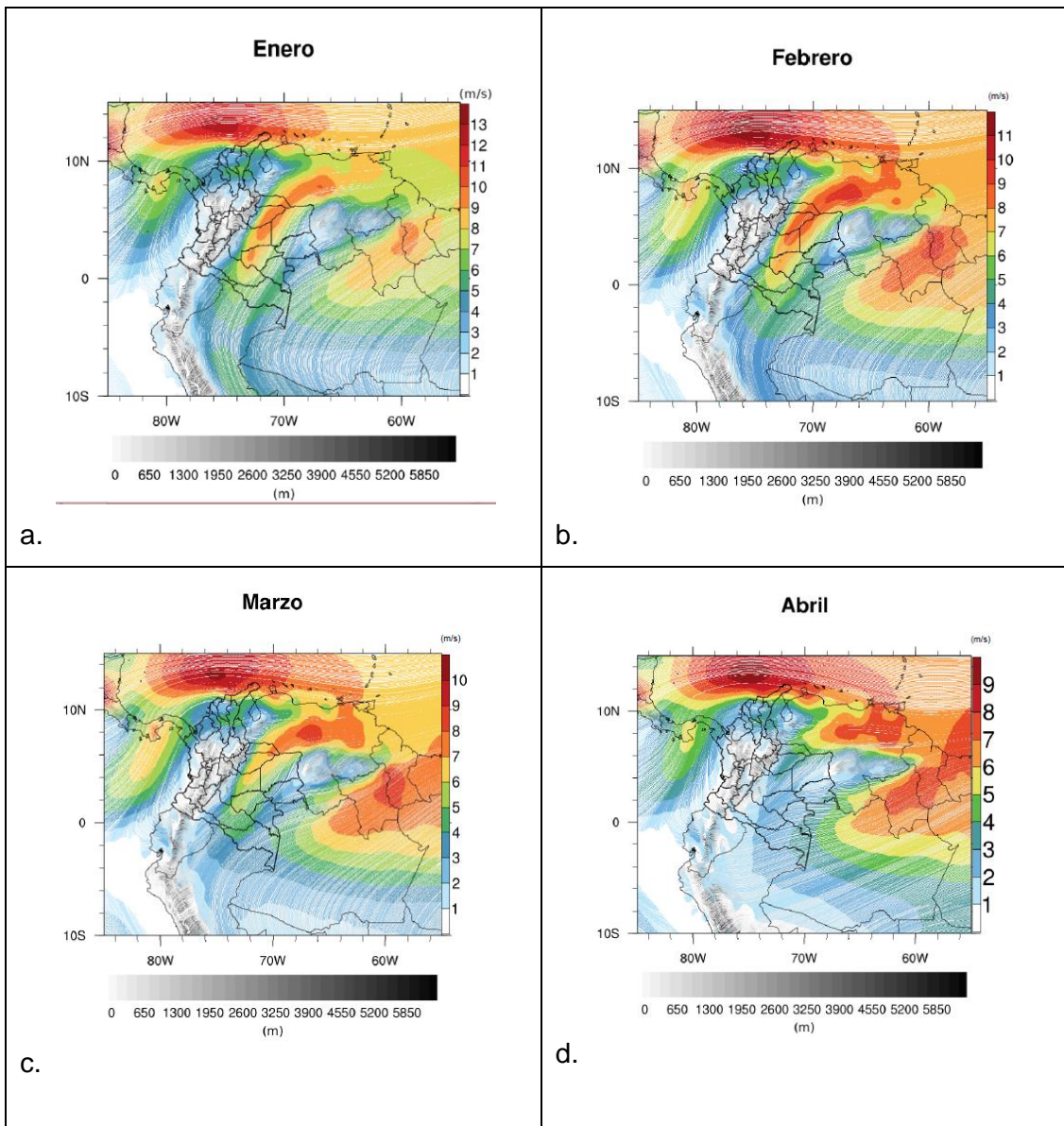
Se distingue una ramificación inicial sobre el macizo Guyanés, en donde el brazo sur continúa su recorrido hacia la cuenca del Río de la Plata, siguiendo la línea de la Cordillera de los Andes, como se observa en la Figura 4-2. Una descripción más detallada de esta corriente que fue denominada como la corriente en chorro de bajo nivel de Sur América fue tratada por Vera, Douglas, Emmanuel y otros en 2006, como resultado del proyecto PACSONET liderado por NOAA para el estudio de la corriente en chorro de bajo nivel de Sur América.

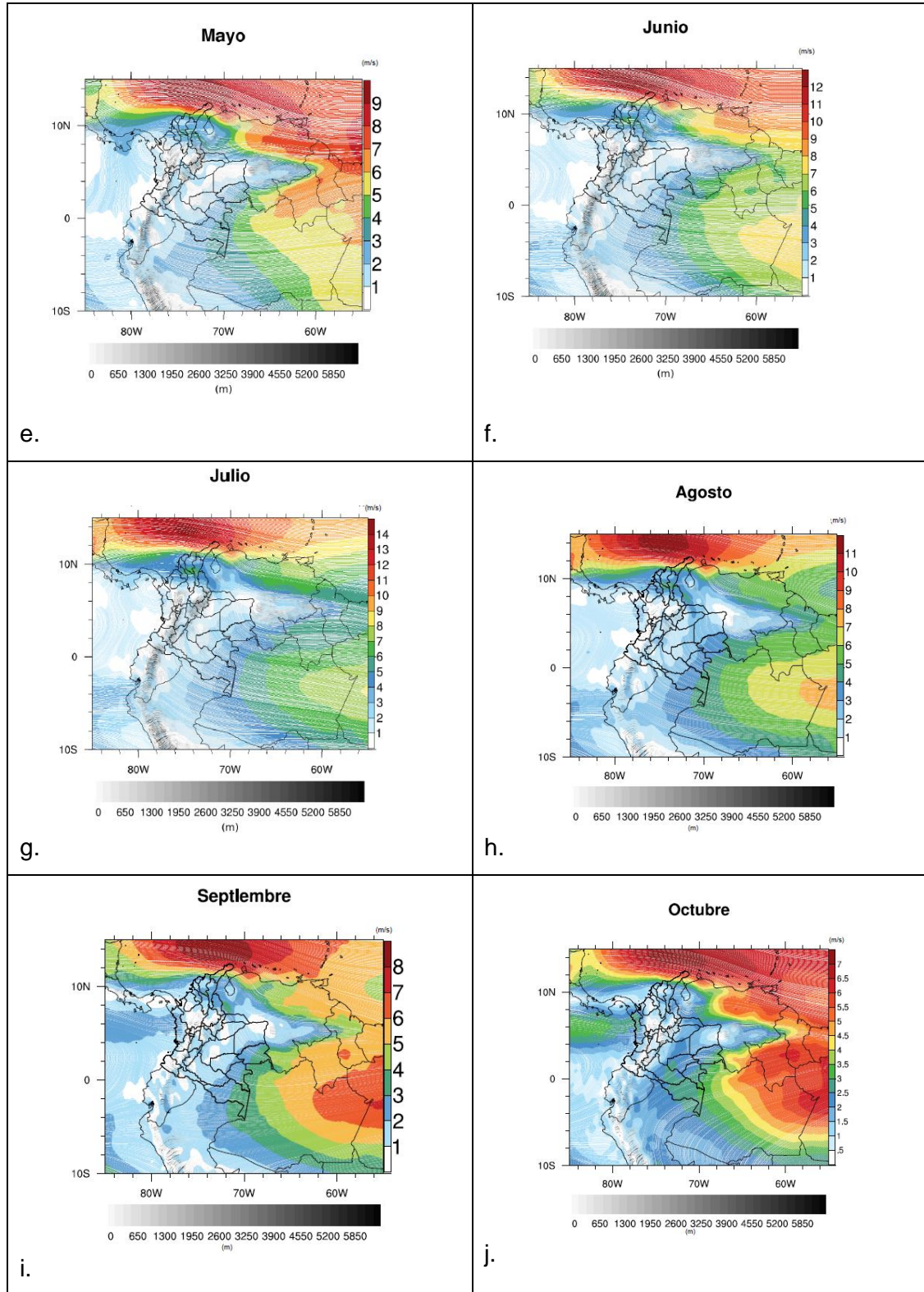
El brazo norte bordea el escudo guyanés, recorriendo las llanuras venezolanas hasta el Estado de Guárico en con una componente zonal bien marcada, a partir de este punto es notorio que el viento empieza a tomar dirección sur oriental, ingresando a territorio colombiano por el Departamentos de Arauca y Vichada, cruzando los llanos orientales colombianos. Atraviesa los Departamentos de Casanare y Meta, y disminuye su intensidad sobre el norte del Guaviare.

Es de resaltar que las velocidades máximas presentadas por esta corriente en su recorrido desde que toca territorio continental oscilan entre los 5 y 12 m/s, en particular durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, manteniendo las mismas

magnitudes sobre el territorio colombiano. Las velocidades mínimas del CAO se presentan en los meses de junio, julio y agosto, con magnitudes entre 0 y 3 m s^{-1} .

La coincidencia de la aparición de este tipo de fenómenos para el verano austral puede ser resultado de que la circulación atmosférica en el hemisferio sur está influenciada por una mayor cantidad de energía proveniente del sol. De esta manera se observan las altas climatológicas fortalecidas y con mayor amplitud en el Atlántico Sur, mientras que la alta del Atlántico Norte por ejemplo presenta un debilitamiento dada su forma estrecha, y recargada un poco hacia el sur. Esta situación obliga a los vientos a recorrer caminos más cerrados y con mayores velocidades.





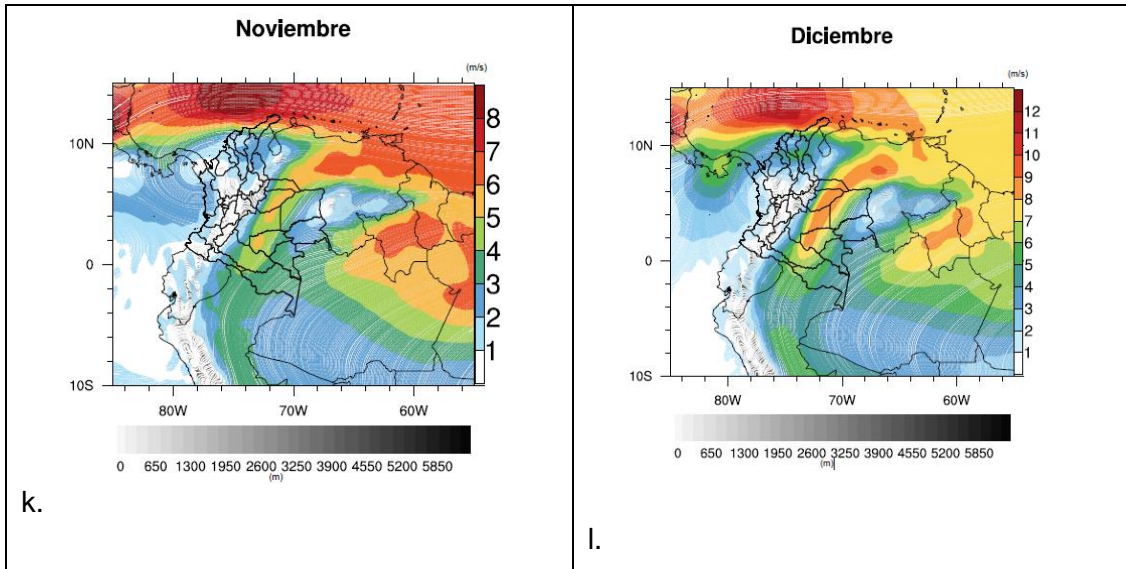


Figura 4-1: Líneas de corriente del promedio Interanual de velocidad del viento en la serie 1983-2013.

A partir del mes de abril y hasta el mes de noviembre se observan los menores valores de velocidad, coincidiendo también con los meses de inactividad expuestos por Amador y Torrealba, 2010, sobre territorio de los llanos orientales venezolanos.

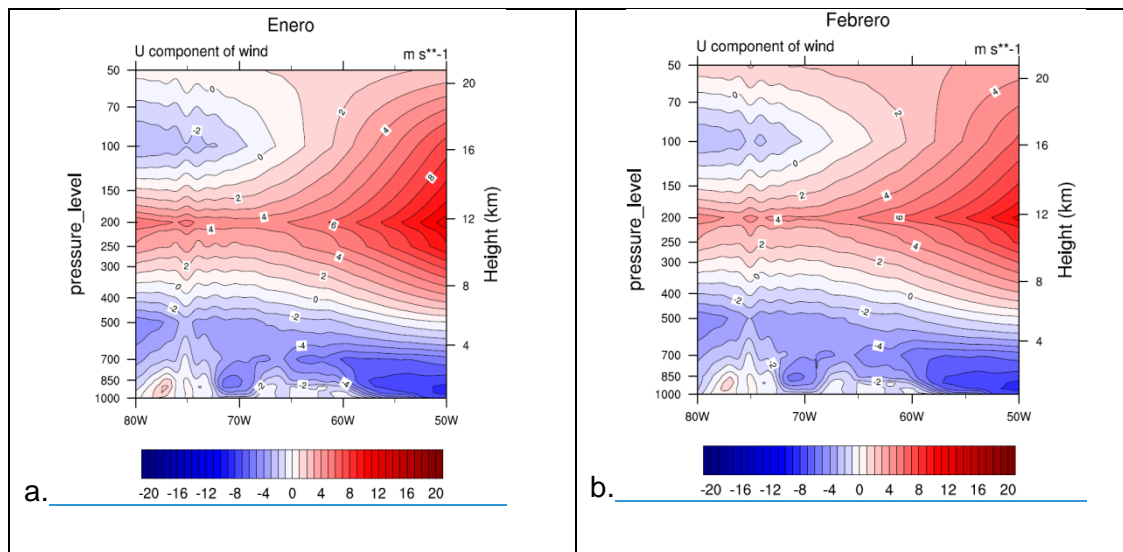
Con referencia a la Corriente de los Andes Orientales, (CAO) (Montoya, Pelkowsky, Eslava, 2001), es posible evidenciar que se presenta una alta influencia de los alisios del noreste durante la misma temporada que la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales, (a partir del mes de octubre hasta el mes de abril), relacionado con el sistema de baja presión sobre el continente suramericano, presentado por los autores sobre la Cuenca del Río de la Plata.

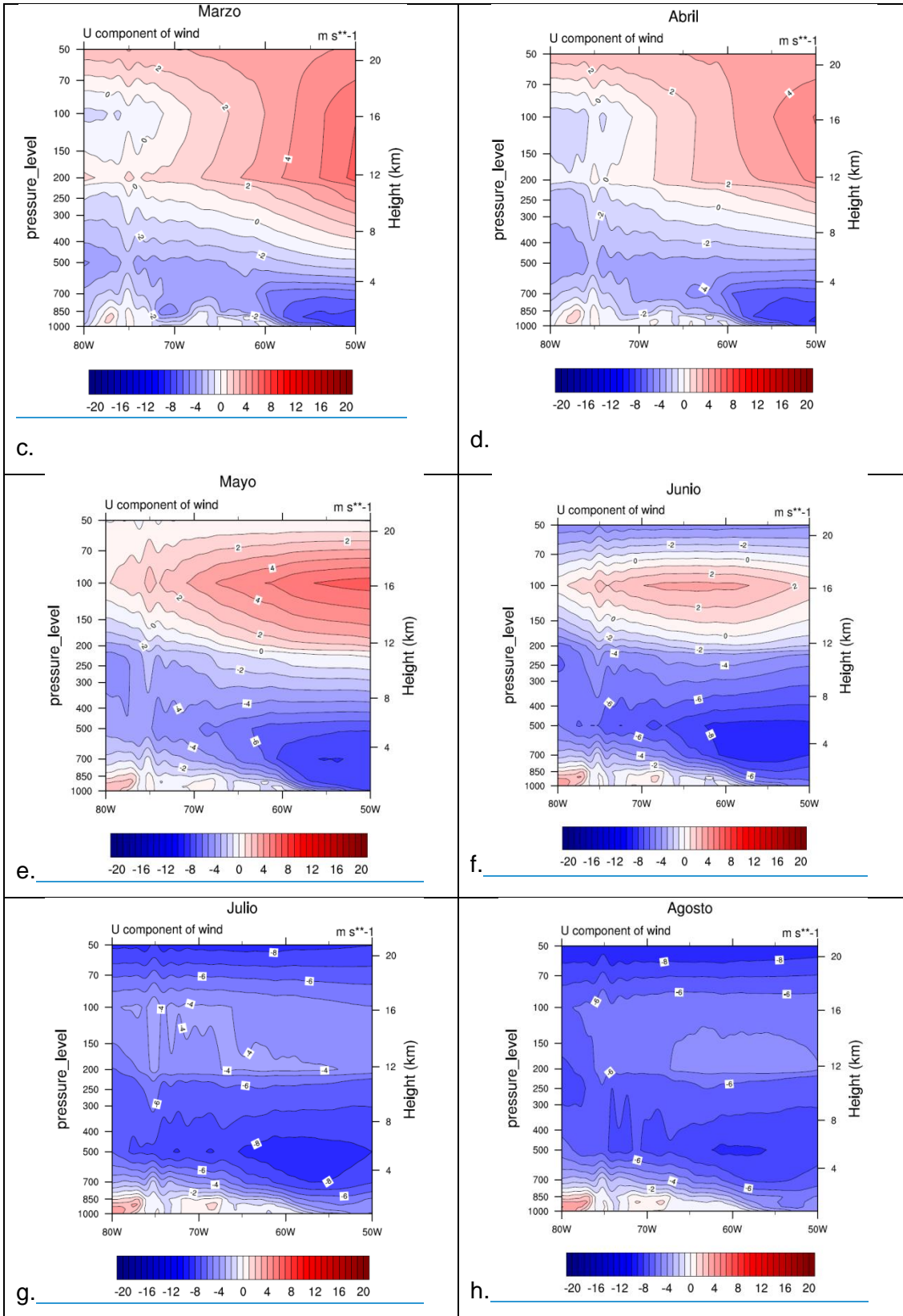
Sin embargo, a pesar de ser coincidentes en temporada se evidencia que la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales, se posiciona un poco más al norte de la CAO, y tiene su nacimiento extendiéndose desde el Atlántico, (Golfo de Paria), hacia el centro del territorio venezolano.

También es posible observar, gracias a la resolución del reanálisis de ERA INTERIM, como se presenta una división sobre el macizo guyanés, que muestra la continuación de dos brazos. Uno hacia el centro de Venezuela y posterior recorre los llanos orientales colombianos hacia el sur, y el otro que bordea el escudo por el sur y continúa hacia el norte del Brasil.

La Corriente en Chorro del Chocó, (Chorro del Oeste de Colombia), presenta un ciclo anual muy fuerte, intensificándose desde mayo, hasta alcanzar un máximo en octubre – noviembre (Poveda y Mesa, 1999). Justamente, de acuerdo a las gráficas de reanálisis, se puede observar que esta es la época en la que se presentan las mínimas velocidades del viento para la región de los Llanos Orientales Colombianos, y es importante mencionarlo para evidenciar la interacción de las Corrientes en Chorro de Bajo Nivel sobre territorio colombiano.

Con el propósito de ubicar el centro de la corriente se realizó el análisis del corte vertical, en los meses de mayor injerencia sobre el territorio colombiano, (entre noviembre y marzo), en la latitud de 5.5°N , (Figura 4-2 - a, b), en donde se observa que en los meses de enero y febrero, se presenta un núcleo significativo, entre las longitudes de 70° a 72° $^{\circ}\text{O}$, desde la superficie hasta 700 hPa, con un núcleo principal ubicado justamente en el nivel de 850 hPa. Lo anterior es coincidente con la clasificación para corrientes en chorro de bajo nivel de Bonner, Stensrud, ya que se ubica en un nivel bajo con una velocidad de 10 m/s, y en una franja significativa sobre el territorio, en este caso sobre un sector de los llanos orientales colombianos.





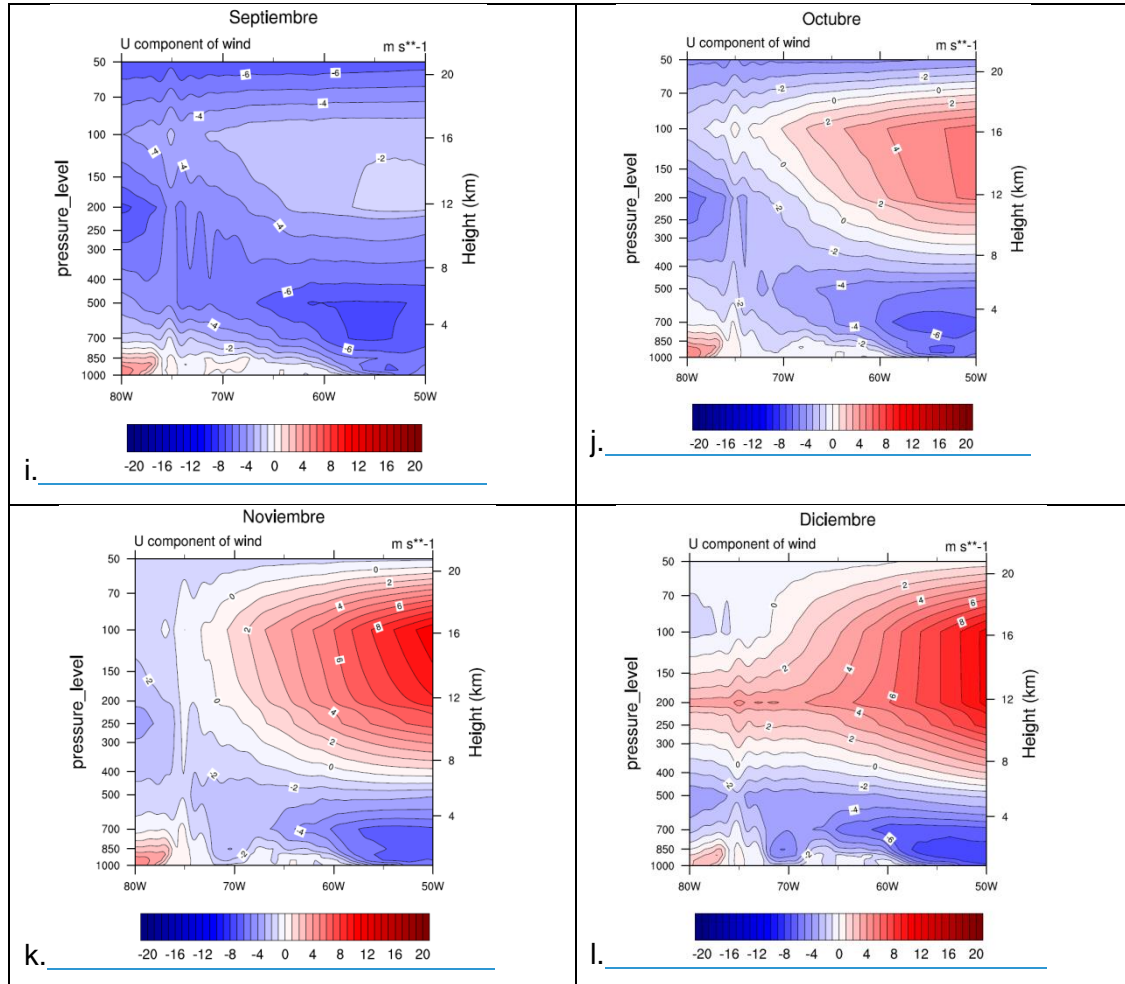


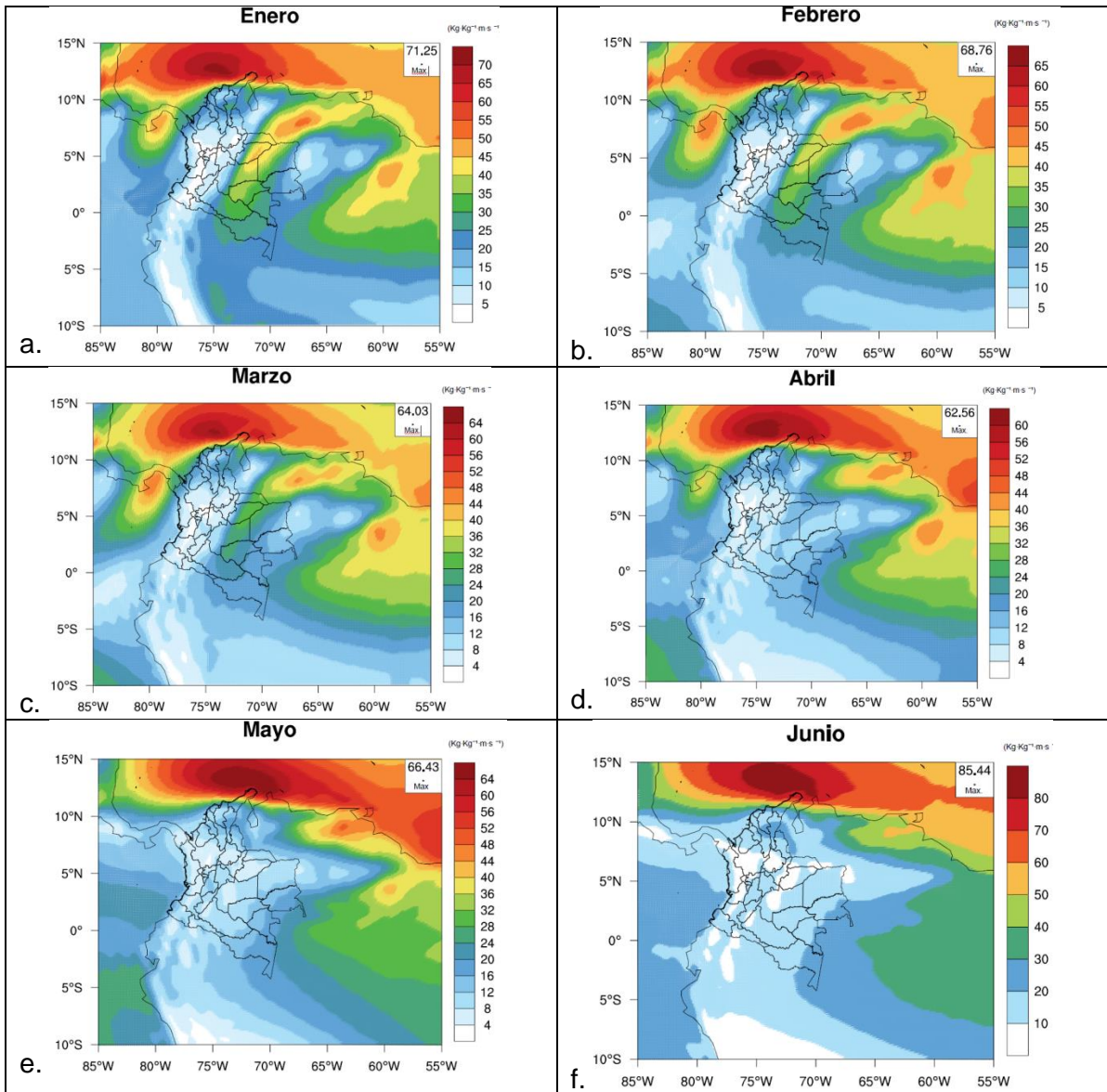
Figura 4-2: Localización del núcleo de la corriente en chorro de bajo nivel en un corte de vertical realizado en 5.5° de latitud N para el mes de febrero. Período de registro: 1983-2013.

Las corrientes en chorro de bajo nivel se caracterizan por su significativo transporte de humedad (Stensrud, 1996), por lo que con el ánimo de examinar la advección de humedad de la corriente de estudio, se realizó un análisis de la columna integrada de humedad mensual en la serie de estudio, para observar su comportamiento.

La advección zonal de humedad se calcula como el producto de la velocidad zonal del viento por la humedad específica del aire e indica el transporte de humedad debido a los vientos.

En la Figura 4-3 se observa que entre los meses de noviembre y marzo, se presenta su mayor influencia, (Figura 4-3 k, l, a, b, c,), con el máximo transporte de humedad en los meses de diciembre, enero y febrero para el territorio colombiano, con valores cercanos a

$40 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 4-3 I, a, b). Durante los meses de junio y julio se presentan los menores valores de advección de humedad. (Figura 4-3 f,g).



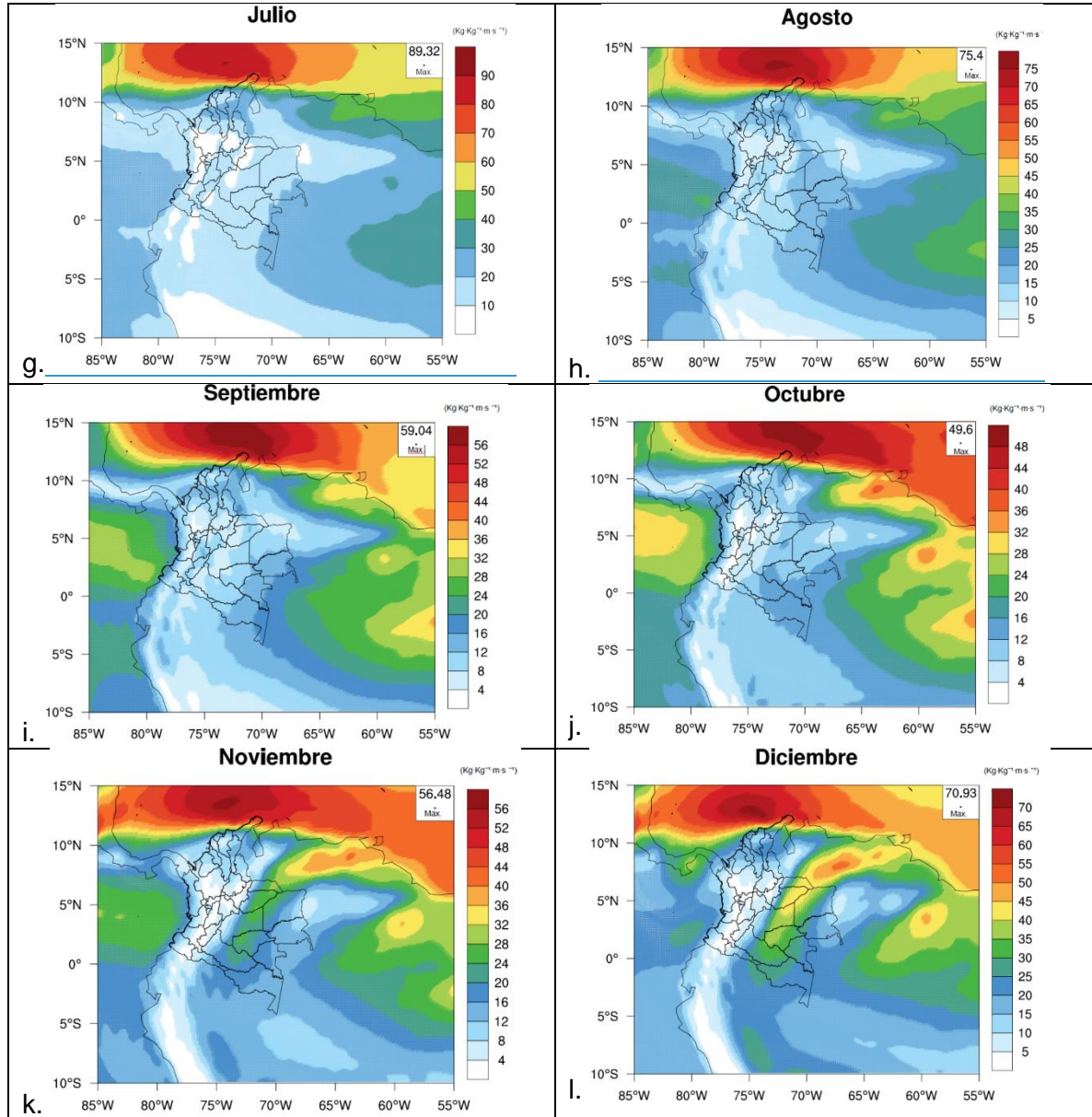


Figura 4-3: Promedio Interanual de Advección de Humedad Integrada, Serie 1983-2013. ($\text{Kg} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Cabe destacar también el significativo transporte de humedad de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe, que se mantiene casi durante todo el año. Se observan los mayores valores integrados de humedad en la columna, en las proximidades a la Península de la Guajira, al norte del Colombia.

Este transporte de humedad coincide con las altas correlaciones presentadas por Cook & Vizy, 2009, entre las anomalías mensuales del viento zonal, y las anomalías de

precipitación, para los 12 ° - 15°N, y los 70° -75°O, denotando que una fuerte correlación para los meses entre mayo y octubre.

Es posible asociar el lapso mensual de ocurrencia de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales, con la estrecha relación del viento y la presión en latitudes tropicales, expuesta por Montoya, Pelkowsky y Eslava, (2001). Los autores relacionan la formación de la corriente CAO, debida a la interacción en latitudes bajas entre el campo del viento generado en la alta del Atlántico norte y la baja presión desarrollada sobre el continente americano durante el invierno boreal (o verano austral entre noviembre y marzo).

Por medio del reanálisis realizado con ERA INTERIM, es posible analizar que los flujos de advección integrada de humedad, asociados a la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales, se ubican más norte de la posición de la CAO, y localizando su origen, desde el Océano Atlántico, pero con un núcleo significativo en el centro de Venezuela (San Fernando de Apúre), siendo coincidentes en tiempo y espacio, con lo expuesto para la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Venezolanos. (Torrealba & Amador, 2010).

La Corriente en Chorro de Bajo Nivel del CHOCÓ, presenta un marcado ciclo anual de transporte de humedad con una intensidad mayor para el trimestre de septiembre, octubre y noviembre. (RUEDA, O. & G. Poveda. 2006). La advección de humedad, la humedad específica y la componente zonal de la velocidad del viento son analizadas por los autores, y presentan los máximos valores para las variables analizadas durante trimestre mencionado.

La advección de humedad asociada con la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales, inicia su ingreso a territorio colombiano a partir del mes de noviembre, y hasta el mes de marzo, lapso en el cuál empiezan a descender los valores del transporte de humedad presentado por la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del CHOCÓ.

Las interacciones presentadas por las diferentes corrientes en chorro de bajo nivel, en referencia al significativo transporte de humedad hacia el territorio colombiano, constituyen un importante mecanismos que impacta directamente la hidroclimatología de la región, haciéndose necesario estudiar más a fondo las relaciones entre sí, con el apoyo de importantes argumentos como los presentados sobre la existencia de ríos

aéreos sobre Suramérica, y la teoría de la bomba biótica. (Poveda, G., L. Jaramillo, and L. F. Vallejo 2014)

4.1.2 Ciclo Diurno

Luego de analizar los datos de los sondeos realizados en las Bases Aéreas Luis Arturo Meneses, (SKUC), en el Vichada, y Luis F. Gómez Niño, (SKAP), en Meta, (Ver Figura 1-2), a continuación se presenta el promedio trimestral de la componente zonal del viento (-u), de los sondeos realizados desde el 8 de septiembre de 2008, hasta el 29 de noviembre de 2006, desde cada una de las Bases Aéreas mencionadas. En las Figura 4-4 y 4-5, se presentan los perfiles verticales durante los dos horarios de lanzamientos realizados. (1200UTC y 2200UTC).

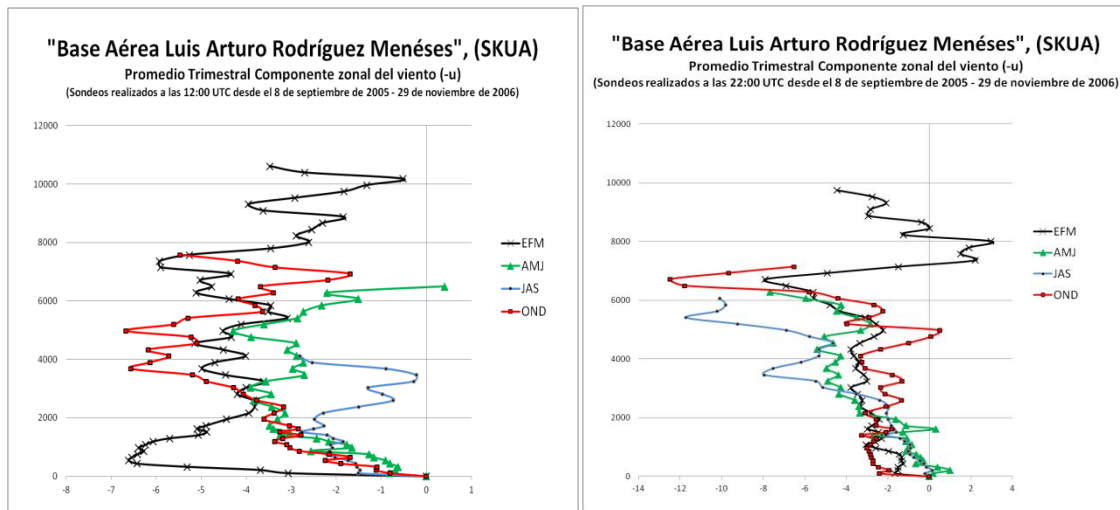


Figura 4-4: Variabilidad del ciclo diurno en el Promedio trimestral de la Componente zonal del viento (-u). Lanzamientos realizados en la Base Aérea Luis Arturo Rodríguez Meneses (SKUA), durante los lanzamientos realizados a las 12:00 UTC (izquierda), y a las 22:00 UTC (derecha) Serie 2005-2006. (Velocidad, $m \cdot s^{-1}$, Altura, m).

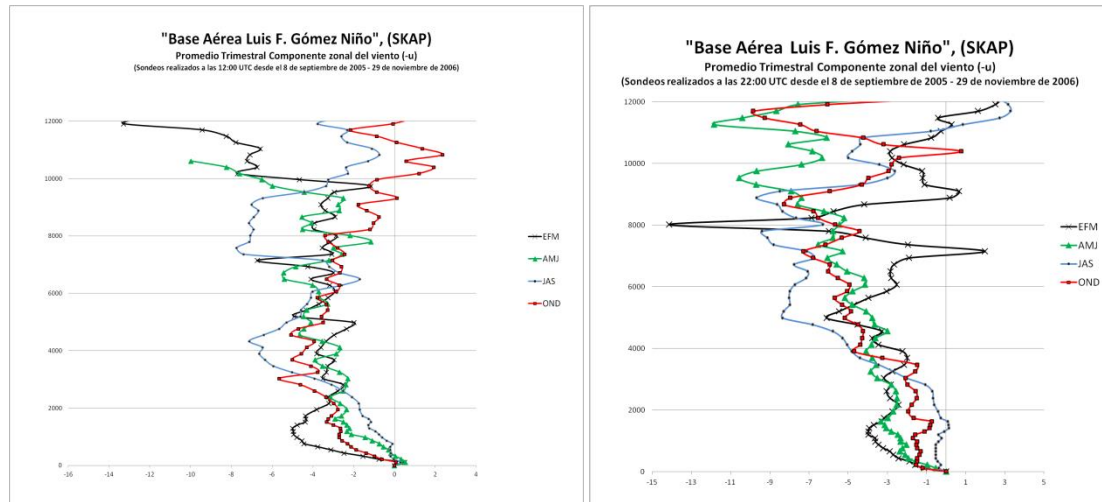


Figura 4-552: Variabilidad del ciclo diurno en el Promedio trimestral de la Componente zonal del viento (-u). Lanzamientos realizados en la Base Aérea Luis F. Gómez Niño (SKAP), durante los lanzamientos realizados a las 12:00 UTC (izquierda), y a las 22:00 UTC (derecha). (Velocidad, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, Altura, m).

Es posible evidenciar un máximo en el viento para ambas Bases Aéreas para los lanzamientos registrados a las 12:00 UTC, (7:00 am HLC), en el trimestre de enero, febrero y marzo (EFM), siendo mucho más pronunciada la velocidad de SKUC, próxima a los -7 m/s , para este lapso en el nivel cercano a los 1500 metros. En la jornada realizada a las 22:00 UTC, (5:00 pm HLC), se observa que la velocidad del viento casi que permanece constante en los niveles bajos e inicia a mostrar máximos en los 6500 metros, para esta estación.

Esto es muy importante y puede generarse en razón a que en las primeras horas de la mañana se inicia la activación de la capa de mezcla generándose mayor turbulencia en los niveles cercanos a la superficie.

Para la estación de SKAP, al comparar los dos horarios de lanzamiento, no se observa un pronunciamiento tan significativo en la velocidad de la componente zonal del viento, sin embargo si se mantiene el trimestre de presentación de la máxima del viento, siendo enero, febrero y marzo, en donde se encuentran las mayores velocidades próximas a los -4.5 m/s .

Luego de realizar el análisis del ciclo diurno en base a la información de los reportes METAR, de las Bases Aéreas de Apiay y Marandúa, de las campañas de sondeos del

proyecto PACSONET, en la Figura 4-6 se observa que el incremento de las velocidades del viento se inicia justamente a las 1200Z. También se puede observar que se presentan máximas en el ciclo diurno entre las 1700Z y las 2000Z, a nivel superficial, con velocidades entre los 4 y 5 Kt para la Base Aérea Luis F. Gómez Niño y entre 6 y 7 Kt, para la Base Aérea Luis Arturo Rodríguez Meneses.

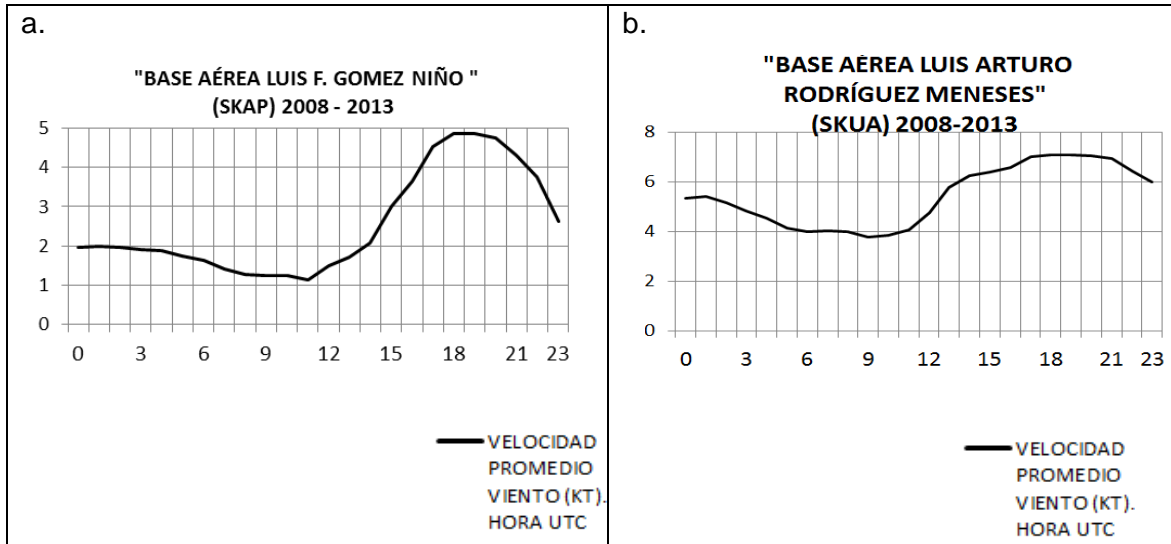
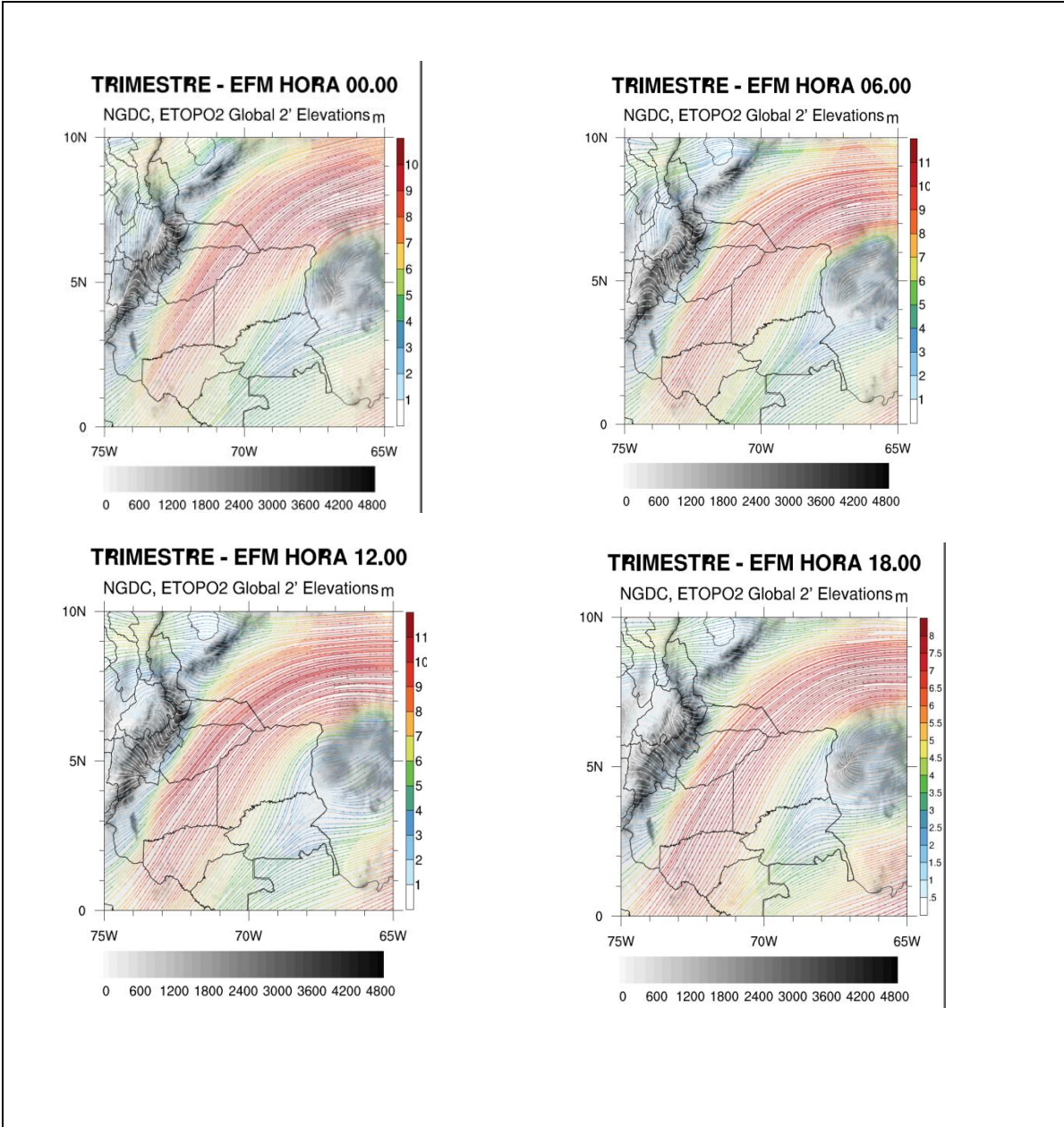
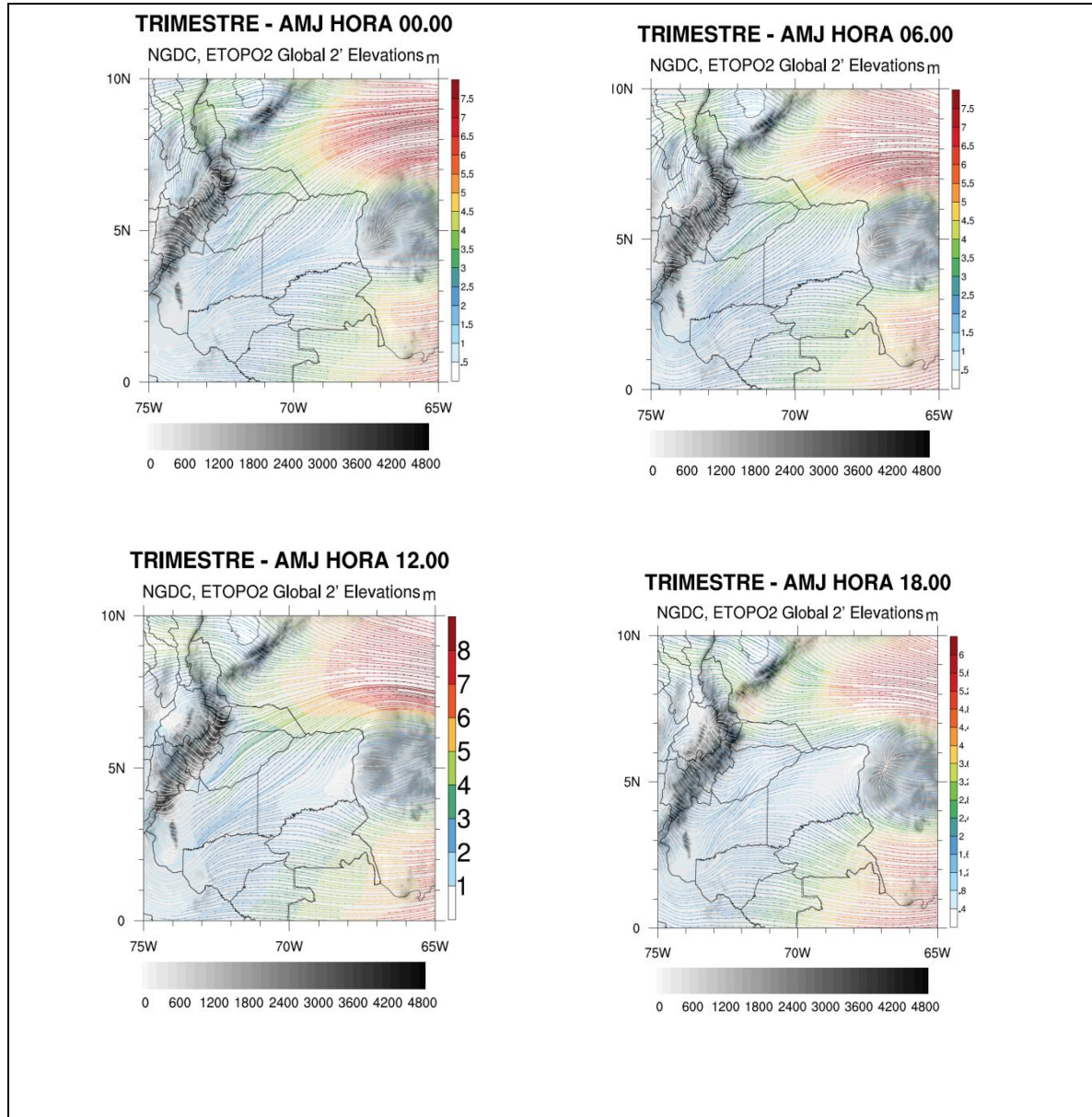
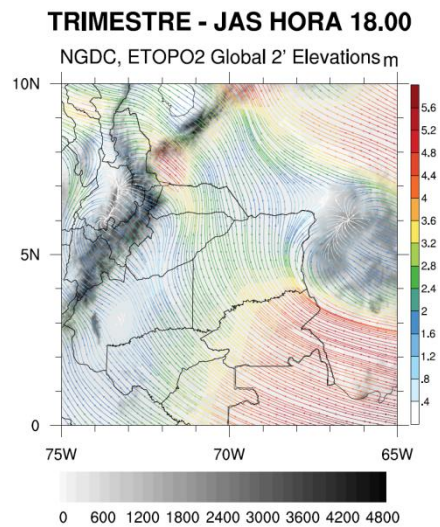
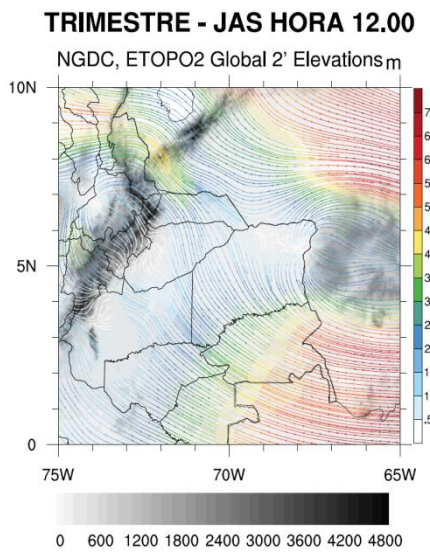
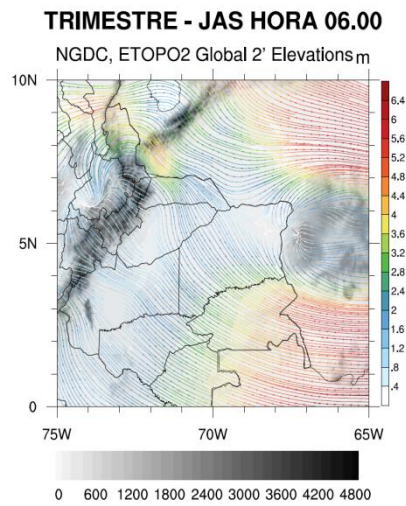
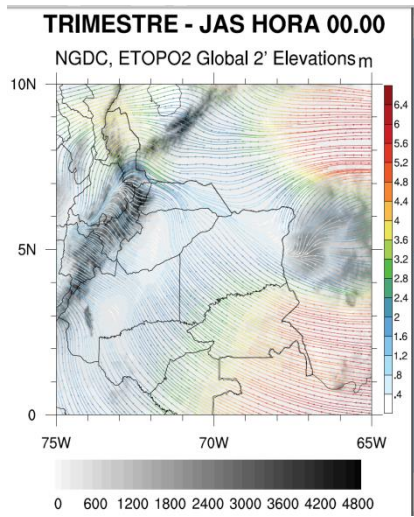


Figura 4-6: Variabilidad del ciclo diurno de la velocidad promedio del viento de estaciones ubicadas dentro del área de estudio, basado en los reportes horarios METAR disponibles en a) Base Aérea Luis F. Gómez Niño y b) Base Aérea Luis Arturo Rodríguez Meneses, Serie 2008-2013, (Velocidad Promedio en KT, Hora UTC).

Apoyados en el re análisis de ERA INTERIM, con el fin de analizar de una mejor manera la variabilidad del ciclo diurno, se graficó el viento promedio en los horarios de 00, 06, 12 y 18 UTC, en el lapso de 2008-2013, (Figura 4-7), encontrando una alta coincidencia en las velocidades del viento y los sectores de influencia de la corriente en chorro de bajo nivel sobre los llanos orientales colombianos.







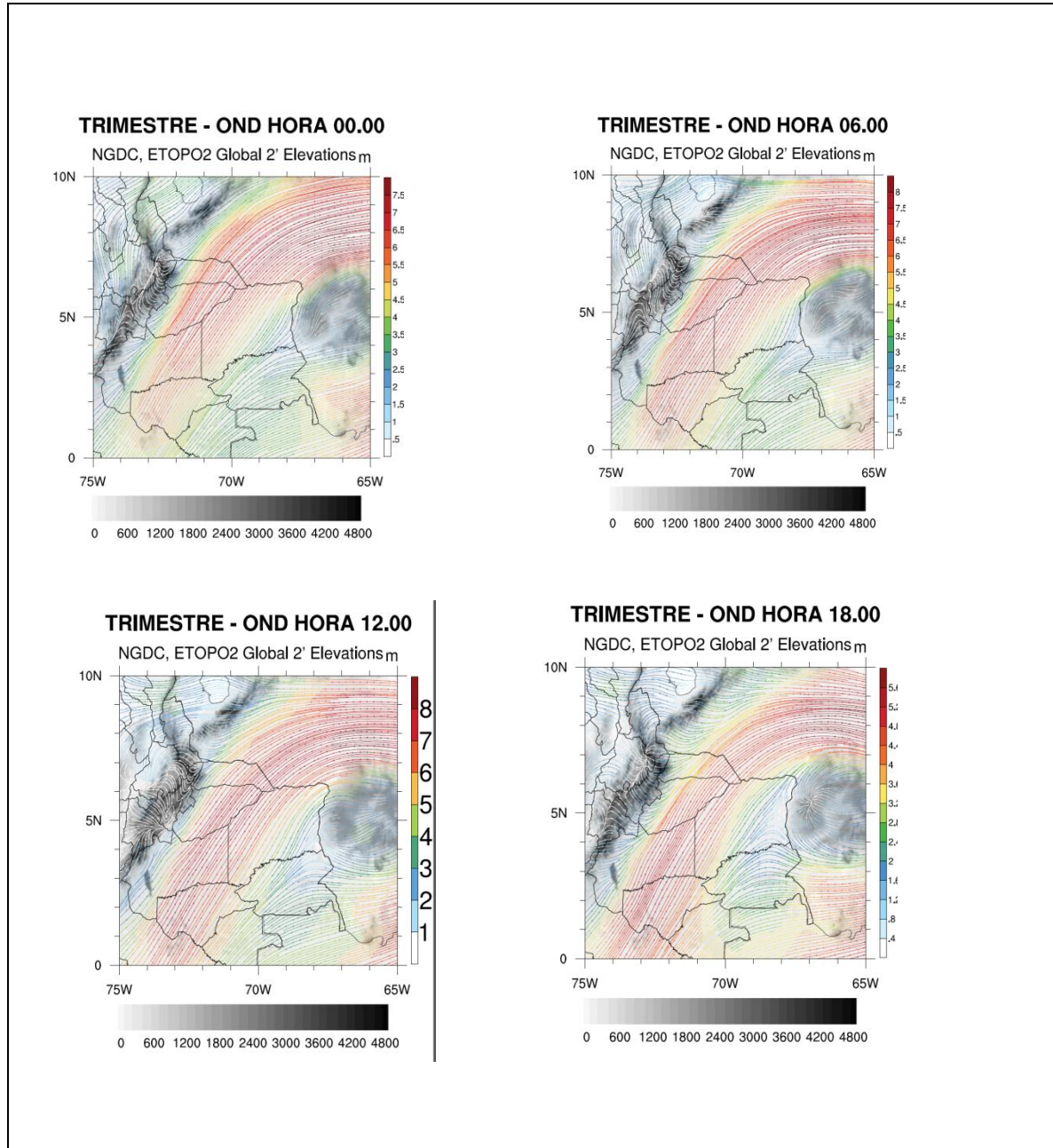


Figura 4-7: Variabilidad del ciclo diario de la velocidad promedio del viento realizado con reanálisis de ERA INTERIM del área de estudio, para el nivel de 850 hPa a) 00:00 z, b) 06:00 z, c) 12:00 z, d) 18:00 z, Serie 2008-2013, Corte 850 hPa, (Velocidad Promedio en $m \cdot s^{-1}$).

Como es posible evidenciar en la Figura 4-7, la variabilidad del ciclo diario es diferente para cada uno de los trimestres del año. Durante el trimestre de enero, febrero y marzo (EFM), se presentan las mayores velocidades del viento siendo entre las 06:00 UTC y las 12:00 UTC, los horarios en los que se presenta con mayor intensidad oscilando entre los

10 y 11 m/s. Las 18:00 y 00:00 UTC, presentan velocidades máximas de 8 m/s y de 10m/s respectivamente. El área de despliegue de la corriente, es coincidente con una porción de la Corriente de los Andes Orientales, expuesta por Montoya et. al (2001), y llama la atención que para el horario entre las 12:00 UTC y 18 UTC alcance incluso a estar sobre el Departamento de Guaviare y Amazonas, y continúe hacia el norte de Brasil.

Para el trimestre de abril, mayo junio, (AMJ) se evidencia la mayor velocidad sobre los llanos orientales en especial sobre el Departamento del Casanare, entre las 06:00 UTC y 12:00 UTC, con velocidades entre los 3 y los 4 m/s. Se evidencia como el núcleo central se retrae hacia el centro de Venezuela, en San Fernando de Apure con velocidades máximas entre los 7 y 8 m/s, durante la noche.

En el trimestre de julio, agosto, septiembre, (JAS), se presentan las mínimas velocidades del viento entre las 00:00 UTC y 12:00 UTC, entre los 0 y 3 m/s, denotando también un cambio significativo en la velocidad del viento hacia el noroeste, ingresando a territorio colombiano por los Departamentos de Guainía y Vaupés, durante las 18:00 UTC, con velocidades no superiores a los 5m/s, sobre estos Departamentos y disminuyendo hasta los 3 m/s, en su trayectoria hacia el noroeste en los Departamentos de Casanare y Arauca.

Claramente para el trimestre de octubre, noviembre y diciembre, (OND), se activa nuevamente la corriente proveniente desde el oriente de Venezuela, presentando la mayor velocidad entre las 06:00 UTC y las 12:00 UTC, alcanzando los 8m/s. para el resto del día se mantiene con velocidades entre los 4 y 6 m/s, en especial en los Departamentos de Arauca, Casanare, y el norte de los Departamentos de Meta y Vichada.

Es importante resaltar que se evidencia que a pesar de que a las 18:00 UTC, se presenten las velocidades mínimas (4-5m/s), es el horario en el que la corriente alcanza su mayor despliegue sobre el territorio nacional, durante este trimestre, llegando al sur hasta el Departamento del Caquetá.

El resultado de los horarios de mayores velocidades del viento presentados para los horarios de las 06:00 y 12 UTC, en especial para los trimestres de OND y EFM, (fechas de ocurrencia del fenómeno), se debe al enfriamiento/calentamiento de los Llanos,

producto de los cambios en la mezcla vertical del momento horizontal del aire, que tiene como resultado una delgada capa de fuertes vientos, (corriente en chorro de bajo nivel), en las primeras horas de la mañana. De acuerdo con los resultados, del reanálisis y de los sondeos, se observa como esta corriente es fuerte cerca del amanecer y en las primeras horas de la mañana y se debilita a lo largo del día, como resultado del calentamiento diurno que mezcla los vientos verticalmente hacia una capa profunda. (Rebekah, 2005)

4.1.3 Influencia de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel sobre la precipitación

Como ya hemos evidenciado la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales presenta un significativo transporte de humedad para la región, en especial para el lapso comprendido entre noviembre y abril. En la Figura 4-8, se presenta la gráfica del promedio mensual del viento, de los datos obtenidos del IDEAM, de las estaciones de los Aeropuertos de Arauca y Puerto Carreño, en donde es posible observar que los meses de mayor intensidad son entre el mes de noviembre y marzo, en donde alcanza una velocidad máxima promedio mensual entre los 3.4 y 3.6 m/s.

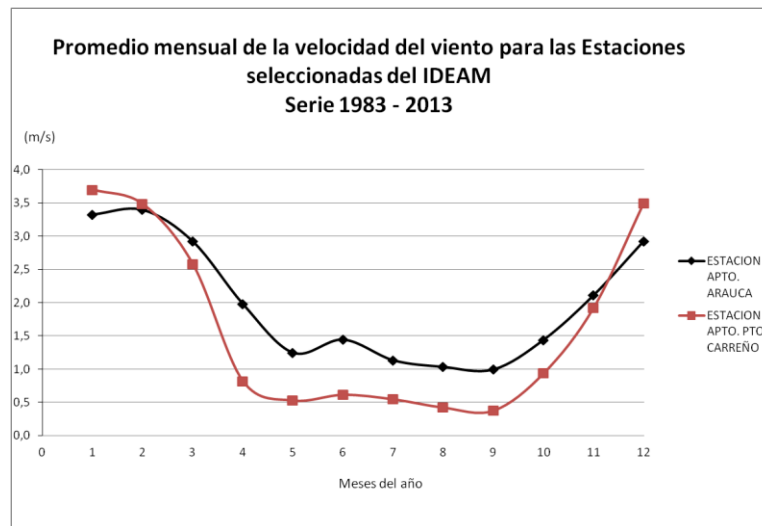


Figura 4-8: Promedio mensual de la velocidad del viento para las estaciones seleccionadas del IDEAM, Serie 1983 – 2013. (Velocidad Promedio en $m \cdot s^{-1}$).

El argumento anterior es coincidente con lo expuesto por diferentes autores hasta el momento y es referencia para analizar el ciclo de precipitación anual para la región de influencia presentado en la Figura 4-9, en el cuál se observa que durante los meses en

los que la Corriente en Chorro presenta su mayor intensidad, las precipitaciones para la región disminuyen, identificando un marcado ciclo anual, con los mayores meses de valores de precipitación entre junio y agosto.

Esto indica que dentro de los factores

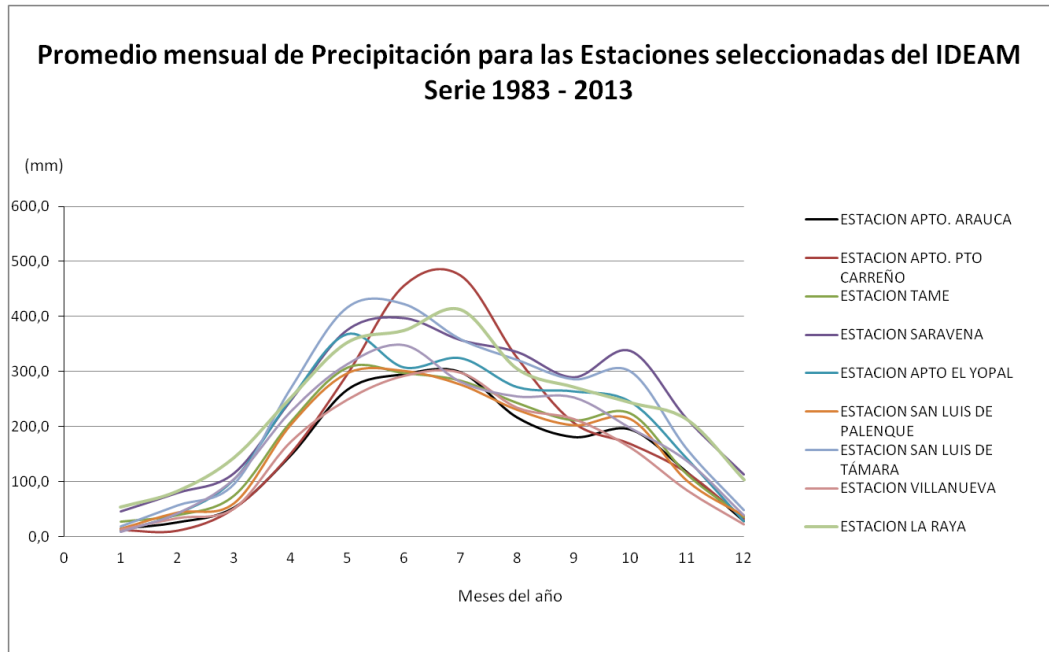


Figura 4-9: Promedio mensual de la precipitación para las estaciones seleccionadas del IDEAM, Serie 1983 – 2013. (Valores de precipitación promedio en milímetros).

Los mayores valores presentados se muestran para la estación del Aeropuerto de Puerto Carreño, con valores cercanos a los 500 milímetros, durante el mes de julio, y los menores valores presentados entre el mes de enero y febrero se observan en las estaciones de Arauca y el Aeropuerto de Puerto Carreño con valores característicos de la temporada seca (cerca de 0).

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En el análisis de las observaciones mensuales y del ciclo diario de la velocidad del viento para la región conocida como los Llanos Orientales Colombianos, permitieron caracterizar una corriente de vientos presentada en niveles bajos, que se encuentra entre superficie y 850 hPa, afectando esta región entre los meses de noviembre a marzo. Este sistema proveniente del Océano Atlántico, presenta fuertes velocidades sobre el centro de Venezuela con una dirección casi zonal, y luego ingresa por el oriente, al territorio colombiano, tomando una componente direccional nororiental.

El principal origen de esta corriente se encuentra en los vientos alisios del noreste, con velocidades entre los 10 a 12 m/s, durante el invierno boreal. Por medio del análisis realizado es posible evidenciar una máxima velocidad específicamente en el mes de febrero, sobre los Departamentos de Arauca, Casanare, Meta, Vichada, norte del Guaviare e incluso Guainía y Caquetá. Puede alcanzar una altura desde la superficie de hasta 3500 metros de acuerdo a los cortes verticales realizados.

Se pudo evidenciar un significativo transporte de humedad, durante los meses de ocurrencia de la corriente en chorro, situación que impacta profundamente en la hidroclimatología del país. Es muy importante mencionar que se identifica la interacción entre la corriente en chorro de estudio y las demás corrientes identificadas por diferentes autores sobre el territorio colombiano, observando por ejemplo un ciclo de velocidades del viento y transportes de humedad, máximos y mínimos inverso, con respecto a la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del CHOCO, o que un la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe, y la Corriente en Chorro de Bajo Nivel de los Llanos Orientales tienen su mismo origen en el Océano Atlántico, bifurcándose luego de tocar el continente.

Debido a los efectos del calentamiento diurno sobre la capa de mezcla en las primeras horas de la mañana, es posible evidenciar como los horarios del ciclo diurno en los que se presentan las mayores velocidades en la región corresponden entre las 06:00 y 12:00 UTC, y aunque durante el día disminuyen, se incrementa la región influenciada por estos vientos superficiales, llegando incluso hasta el norte del Brasil.

Se observa una alta influencia de la corriente en chorro de bajo nivel identificada en los Llanos Venezolanos, ya que la corriente en estudio es una continuación de la anterior, aunque esta presenta una componente zonal de la velocidad del viento muy marcada, que cuando llega a territorio colombiano toma una dirección sureste, debido a la Cordillera de los Andes que actúa como barrera topográfica natural.

Las simulaciones realizadas por medio de datos obtenidos del reanálisis de ERA INTERIM, en el periodo 1983 – 2013, presentan una relación con los datos obtenidos de las estaciones del IDEAM, los reportes horarios realizados en los aeropuertos seleccionados, y las observaciones en altura por medio de los sondeos realizados por la Fuerza Aérea Colombiana, en colaboración con el Proyecto PACSONET, en algunas estaciones de la región, y mostraron resultados con una alta resolución que permitieron definir con mayor precisión las características en cuanto al comportamiento espacial y estacional de esta corriente.

Durante los meses que se presenta un fortalecimiento / debilitamiento de la Corriente en Chorro de Bajo Nivel sobre los Llanos Orientales Colombianos, se observa una disminución / aumento, de la precipitación, para esta región. De modo tal que este es otro de los factores que influyen directamente sobre esta condición para esta región del país.

Sobre territorio colombiano, con los datos obtenidos en especial de los sondeos realizados, no se había realizado una caracterización de este fenómeno sobre los llanos orientales colombianos, lo que permite realizar una profundización sobre los componentes que determinan el comportamiento atmosférico no solo para el país, sino que puede aportar importantes herramientas para que se continúe profundizando en temas como los ríos aéreos de Suramérica o con referencia a los transportes de humedad su afectación sobre el ciclo hidrológico del Amazonas.

5.2 Recomendaciones

Es indispensable el incremento de estaciones de observación de las variables atmosféricas en altura, en el país, pero en especial para esta región, ya que luego de identificar el impacto de esta corriente sobre la hidroclimatología de Colombia, se hace necesario contar con datos que permitan profundizar en la caracterización de su comportamiento espacio – temporal, ya que herramientas como el reanálisis realizado con ERA INTERIM provee una muy buena resolución, más sin embargo, para la calibración de modelos que permitan realizar un mejor pronóstico los datos observados se hacen indispensables.

Bibliografía

BALSAMO, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., de Rosnay, P., Stockdale, T., and Vitart, F.: ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 389-407, doi:10.5194/hess-19-389-2015. 2015

BLACKADAR, A. K., 1957: Boundary layer wind maxima and their significance for the growth of nocturnal inversions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 38, 283-290.

BONNER W (1968): Climatology of the low level jet. *Mon. Wea. Rev.*, 96:833-850.

COOK K. & VIZY E. 2009: Hydrodynamics of the Caribbean Low –Level Jet and its Relationship to Precipitation. *Journal of Climate*, 23, 1477-1494, doi:10.1175/2009JCLI3210.1.

C. ALBERGEL, W. Dorigo, R. H. Reichle, G. Balsamo, P. de Rosnay, J. Muñoz-Sabater, L. Isaksen, R. de Jeu and W. Wagner: Skill and Global Trend Analysis of Soil Moisture from Reanalyses and Microwave Remote Sensing. *J. Hydrometeorol.*, 14, 1259–1277, doi:10.1175/JHM-D-12-0161.1, 2013.

DOUGLAS M, Nicolini M, & Saulo A (1998): Observational evidences of a low level jeat east of the Andes during January-March 1998. *Meteorológica*, 3:63-72.

DEE, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorological Society*, 137: 553–597pp. doi: 10.1002/qj.828

FINDLATER, J., 1969: A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 95, 362-380

HASTENRATH S (1991): *Climate dynamics of the tropics*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 488 pp.

HOLTON, J. R., 1967: The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain. *Tellus*, 19, 199-205.

MARENGO J, Nicolini M, Douglas M & Pedro S (2000): Identificación de casos de Jets en niveles bajos, del norte (SALLJ) y del sur (SJ) al este de los Andes durante el verano y otoño 1999, *Anales de VIII Congremet y IX Climet*, Buenos Aires, 7-11 de Mayo de 2001. Publicación en disco compacto, 10 pp.

MONTOYA G de J, Pelkowski J & Eslava JA (2001): Sobre los alisios del nordeste y la existencia de una corriente en el Piedemonte Oriental Andino. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 25 (96), 363-370.

NICOLINI, M., C. Saulo, J. C. Torres, & P. Salio, 2002: Strong South American low-level jet events characterization during warm season and implications for enhanced precipitation, *Meteorological (Special Issue on South American Monsoon System)* 27, 59–69.

PACHECO, L. & G. León. 2003: Corriente en chorro en niveles bajos. Estudio de caso para el Caribe Colombiano Enero 30 y 31 de 20002. Meteorol. Colomb. 7:67-72. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

PACS (2005): NOAA's Pan American Climate Studies Program. Llano Jet. [<http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/web/VENEZUELA2005>

POVEDA G & Meza O (1999): La corriente de chorro superficial del oeste (del Chocó) y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. Rev. Acad. Colomb. Cienc., 23:517-528.

POVEDA, G., y Mesa O. J., 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low level jet, Geophys. Res. Lett. 27(11), 1675-1678.

Poveda, G., L. Jaramillo, and L. F. Vallejo (2014), Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers, Water Resour. Res., 50, doi:10.1002/2013WR014087.

REBEKAH J. LaBar (2005): The Llanos Low Level Jet and its Association with Venezuela Convective Precipitation. National Weather Center Research Experiences for Undergraduates, Final Project.

RUEDA, O. & G. Poveda. 2006: Variabilidad espacial y temporal del Chorro del "Chocó" y su efecto en la hidroclimatología de la región del Pacífico colombiano. Meteorol. Colomb. 10: 132-145. ISSN 0124-6984. Bogotá, D. C. - Colombia.

STENSRUD D (1996): Importance of Low-Level Jets to Climate: J. Climate, 9:1698-1711.

TORREALBA E. y Amador J. (2010): La corriente en chorro de bajo nivel de los Llanos Venezolanos de Sur América. Revista de climatología, 10: 1-20 ISSN 1578-8768

Vera C, Baez J, Douglas M, Emmanuel C, Marengo J, Meitín J, Nicolini M, Nogues-Paegle J, Penalba O, Salio P, Saulo C, Silva M, Silva P and Zipser E (2006): The South American Low-Level Jet Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87:63-77.

Virji H (1981): A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from clouds winds. *Mon. Wea. Rev.*, 109:599-610.