

# Uso de retrotrayectorias (back trajectories) para el estudio del origen de la precipitación en regiones de interés hídrico.

DARÍO ALEJANDRO HERNÁNDEZ MENDOZA

J. STEVEN PÉREZ CARRASQUILLA

DIRECTOR: CARLOS DAVID HOYOS ORTIZ PhD.

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

[daarocot@unal.edu.co](mailto:daarocot@unal.edu.co)

[jspc.siata@gmail.com](mailto:jspc.siata@gmail.com)

## Resumen

*La precipitación en una región depende de la cantidad de humedad advectada a la misma, la humedad reciclada, y los procesos dinámicos y termodinámicos que ocurren para que dicha humedad disponible en la atmósfera se condense y forme nubes generadoras de lluvia. Inicialmente se realiza una caracterización local de los eventos de precipitación sobre dos cuencas de interés (Miel, ubicada en el departamento de Caldas, y el Valle de Aburrá, en el departamento de Antioquia), a partir de datos de las redes pluviométricas de ISAGEN y EPM, se identifican los eventos que correspondan al 80% del acumulado anual (por orden de acumulado de cada evento), aquellos que se consideran representativos de la climatología de cada región. Posteriormente, con el fin de caracterizar el origen de la humedad que ingresa a las cuencas de estudio y relacionarlo con el ciclo hidrológico, se desarrolla un modelo lagrangiano de seguimiento de parcelas, y se aplica a datos del reanálisis europeo ERA-5 (2010-2016) para cada uno de los eventos representativos seleccionados anteriormente, para luego calcular los gradientes de humedad y obtener zonas de humidificación y pérdida de humedad a distintos niveles de la atmósfera. Finalmente, se propone un método para seguimiento de nubes generadoras de precipitación a partir de imágenes satelitales (GOES), que puede ser útil para corroborar los resultados obtenidos, y tener en cuenta procesos de formación de nubes en el análisis.*

**Palabras Clave:** Ciclo hidrológico, análisis lagrangiano, origen de la humedad, precipitación, retrotrayectorias (back trajectories).

**Agradecimientos:** Queremos agradecer a nuestros padres por el apoyo a lo largo de la carrera, a nuestros compañeros de trabajo en la oficina 306, ya que de cada uno aprendimos algo distinto. A Adriana Gómez y Carolina Cruz, por guiarnos en los últimos meses y ampliar nuestros conceptos no solo para esta investigación sino en el campo en general, brindándonos además muchas herramientas que nos fueron útiles y lo serán más adelante. Por último, y de manera especial, agradecer a nuestro director de tesis, Carlos David Hoyos, quien además de un excelente profesor consideramos es un ejemplo a seguir en varios aspectos, por brindarnos la oportunidad de trabajar en lo que nos apasiona, tener tanta paciencia, y estar siempre dispuesto a resolver inquietudes con el mayor de los gustos. ¡Gracias! :)

---

El desarrollo de esta tesis se encuentra parcialmente enmarcado dentro del proyecto 'Estudio de variabilidad del Recurso hídrico y gestión de Sedimentos en las cuencas de interés para ISAGEN (código: 309010020076)', por lo tanto varios análisis y resultados mostrados en este documento se pueden encontrar en el informe 'Estudio de variabilidad de la precipitación sobre las cuencas aferentes a la central Miel I, implementando análisis de Back Trajectories, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín 2018'.

---

## 1. Introducción

LA precipitación en una región depende de la cantidad de humedad que ingresa a la misma, la cantidad de humedad reciclada, y los procesos físicos que permiten que la humedad disponible en la atmósfera se condense para generar lluvia. La cantidad de agua contenida en la atmósfera cobra gran importancia en el ciclo hidrológico ya que en ella se albergan procesos de precipitación, evaporación, evapotranspiración e intersección. Gran parte del agua que se precipita sobre la superficie, proviene de la humedad contenida en la atmósfera que se evapora desde los océanos u otras regiones y es transportada por fenómenos de circulación atmosférica [Cuartas and Poveda, 2002]. En regiones tropicales, como la colombiana, la convergencia de los flujos de humedad y la migración estacional de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) controlan en gran medida las características climáticas, en Colombia en especial, dadas las condiciones geográficas y topográficas de la región, los procesos de transporte de humedad están afectados por factores tanto globales como locales, entre ellos se encuentran la proximidad con el Mar Caribe y el Océano Pacífico, los vientos alisios, las Ondas Tropicales del Este, el fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) [Hoyos et al., 2017].

Es de gran importancia identificar el origen de la humedad atmosférica si se quiere caracterizar correctamente el ciclo hidrológico, ya que los cambios en la precipitación en determinada región dependen en gran medida de éste, y el conocimiento de las fuentes de humedad es crucial para justificar físicamente los cambios en la precipitación tanto para la climatología actual como la futura [Gimeno et al., 2012].

En [Gimeno et al., 2012] se concluyó que las aproximaciones lagrangianas son la aproximación más correcta para identificar las fuentes de humedad a nivel global, y para caracterizar de manera adecuada la climatología de cierta región.

El método de Back Trajectories (BT) representa la ruta del flujo tridimensional aproximado de una parcela de aire. Sirve para identificar patrones temporales y espaciales en las trayectorias, que se calculan a partir de campos de vientos [Hondula

et al., 2010]. Este tipo de análisis permite la identificación geográfica de regiones de importancia para la constitución atmosférica de las zonas de estudio. Además, permiten concluir sobre la variabilidad atmosférica a diferentes escalas, desde la escala de eventos hasta los patrones climáticos estacionales o interanuales.

En varios artículos [Ciric et al., 2016, Dirmeyer and Brubaker, 2007, Drumond et al., 2014, 2008, Hondula et al., 2010, Hoyos et al., 2017, Huang and Cui, 2015, Stojanovic et al., 2017, Viste and Sorteberg, 2013], se utiliza el método de BT junto a los gradientes de humedad específica sobre la ruta trazada para identificar cuándo y dónde las parcelas pierden o ganan humedad, por procesos de precipitación o evaporación, y de esta manera, caracterizar el ciclo hidrológico de manera global o local.

En [Hoyos et al., 2017], se concluye que la humedad del Océano Atlántico y el reciclaje terrestre son las fuentes más importantes de humedad para Colombia, y se destaca la importancia de las cuencas del Orinoco y el Amazonas como proveedores regionales de humedad atmosférica. Los resultados muestran la influencia del flujo ecuatorial de largo alcance desde el Océano Atlántico a territorio Colombiano.

La central hidroeléctrica Miel I, ubicada en el municipio de Norcasía, Caldas, con 396 MW de capacidad instalada, es de gran importancia para ISAGEN y el Sector Energético Colombiano (SEC), se saca provecho del recurso hídrico que aportan las corrientes de Guarinó, La Miel, Moro, Manso, Samaná Sur, Pensilvania y Tenerife. El análisis de la relación entre los procesos del ciclo hidrológico se puede realizar con base en las fuentes de humedad atmosféricas que afectan a la cuenca de interés, ya que de acuerdo a la disponibilidad de humedad en la atmósfera, es posible gestionar y aprovechar con mayor acierto el recurso hídrico en la zona de interés.

El Valle de Aburrá se encuentra ubicado en el centro-sur del departamento de Antioquia, al Área Metropolitana del Valle de Aburrá la componen los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, La Estrella, Itagüí, Sabaneta, Envigado y Caldas. Cuenta con una población de aproximadamente 3.8 millones de habitantes (DANE) distribuidos en 10 municipios, para una densidad poblacional de aproximadamente  $3300 \frac{\text{habitantes}}{\text{km}^2}$ . La cuenca del río Medellín/Aburrá se

caracteriza por tener altas pendientes a lo largo de sus laderas oriental y occidental. Las características topográficas y de alta densidad poblacional, hacen que sus habitantes se encuentren expuestos a alto riesgo de desastres naturales, gran parte de éstos detonados por precipitaciones de alta intensidad, que se ven reflejadas principalmente en aumento súbito del nivel de las quebradas, inundaciones, y deslizamientos en masa sobre las laderas de la región.

Partiendo de lo anterior, se considera de gran utilidad e importancia caracterizar y comprender de la manera más precisa y rigurosa posible el régimen de precipitación sobre las cuencas mencionadas, y su variabilidad a diferentes escalas temporales. Lo anterior representa un reto dada la diversidad de los procesos que se presentan en las regiones a causa de su ubicación geográfica y complejidad orográfica alrededor y dentro de las mismas. De acuerdo a esto, es importante conocer las causas de la variabilidad de la precipitación, incluyendo el papel de la topografía, la magnitud y dirección de los vientos, la humedad específica, y los cambios en su procedencia.

En la sección 4.1, se identifican los eventos correspondientes al 80 % del acumulado anual (por orden de acumulado de cada evento), aquellos que se consideran representativos de la climatología de cada región, a partir de las redes pluviométricas de ISAGEN (para la cuenca La Miel), y EPM (para el Valle de Aburrá).

Posteriormente, en el capítulo 4.2, se desarrolla un modelo lagrangiano de seguimiento de parcelas, y se aplica a datos del reanálisis europeo ERA-5 (2010-2016) para cada uno de los eventos representativos seleccionados anteriormente, para luego calcular los gradientes de humedad y obtener zonas de humidificación y pérdida de humedad a distintos niveles de la atmósfera. Finalmente, se propone un método para seguimiento de sistemas generadores de precipitación a partir de imágenes satelitales (GOES), que puede ser útil para corroborar los resultados obtenidos, y tener en cuenta procesos de formación de nubes en el análisis.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

- Identificar fuentes y regímenes de humedad para eventos de lluvia representativos en cuencas de interés.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Identificar eventos representativos de precipitación en las regiones de estudio.
- Identificar zonas de circulación preferente de la humedad que llega a las regiones de interés.
- Identificar zonas de humidificación de las parcelas de aire que llegan a las cuencas de interés

## 3. Metodología

### 3.1. Identificación y caracterización de los eventos representativos de precipitación

Inicialmente, se realiza la revisión de las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de las cuencas de estudio, entre éstas se seleccionan las de mayor periodo de registro, mejor calidad y continuidad en la medición. Se identifican los eventos de precipitación de cada año, se ordenan de mayor a menor en función del acumulado y se seleccionan los eventos que se encuentren dentro del 80 % del acumulado de cada año de registro, con el objeto de garantizar que los eventos muestren la variabilidad anual e inter-anual sobre las cuencas.

Una vez definidas las estaciones y los eventos representativos por estación, a cada evento se le estima la intensidad y su duración, y se presentan como serie de tiempo, esto con fin de identificar las relaciones entre la duración y la intensidad de los eventos y como se distribuyen en el tiempo. Se estima el ciclo anual de duraciones, intensidades y número de eventos ocurridos en cada mes. Se construye los histogramas de duración por estación. Y por último, se construye el ciclo diario de precipitación en cada hora del día.

Las estaciones que se encuentran en las cuencas La Miel, Manso y Guarín forma parte de la red pluviométrica de ISAGEN, estas estaciones tienen resolución horaria y las estaciones utilizadas en el Valle de Aburrá pertenecen a la red pluviométrica de EPM, éstas cuentan con resolución minutar.

### 3.2. Retrotrayectorias

Las BT se pueden definir como la trayectoria que siguió una partícula, cuerpo o parcela en un tiempo determinado, antes de alcanzar una coordenada y fecha en específico. Las BT se estiman a partir de interpolaciones lineales en saltos de tiempo definidos, usando información del presente para calcular la ubicación en el pasado. La ecuación 1, expresa matemáticamente cómo se calcula la trayectoria de una BT.

$$X_{i-1}(t) = (t - \Delta t) - \vec{V}(t, X_i(t)) * \Delta t \quad (1)$$

Donde  $X$  es la coordenada tridimensional (latitud, longitud y nivel de presión),  $t$  es el tiempo,  $\Delta t$  el paso de tiempo que es función de la resolución temporal del set de datos disponible y  $\vec{V}$  es el campo de velocidad zonal, meridional y omega del viento. Los subíndices  $i$  en  $X$ , representan la temporalidad de la coordenada.

Los datos que se usan para la construcción de las BT son campos de velocidad meridional, zonal, Omega y campos de humedad específica, obtenidos del reanálisis ERA5, el periodo de los datos corresponde desde el enero de 2010 hasta el diciembre de 2017. La resolución espacial es de  $0.125^\circ$  por  $0.125^\circ$  y la temporal de 1 hora.

#### 3.2.1. Sistema de coordenadas UTM

Para la construcción de las retrotrayectorias es necesario trabajar en un sistema de coordenadas expresado en metros, dado que las interpolaciones en saltos de tiempo se calculan en campos de velocidad expresados en  $\frac{m}{s}$  para las componentes horizontales y para la componente vertical en  $\frac{hPa}{s}$ . Por esta razón, las coordenadas horizontales se trabajan en sistema UTM el cual consiste en lo siguiente:

El sistema de coordenadas UTM se caracteriza por estar compuesto de husos y zonas, donde las

coordenadas se expresan en metros y siempre son positivas. Los husos son números enteros que van desde 1 hasta 60. Por otro lado, las zonas son letras mayúsculas, comenzando desde "C" hasta "X", sin incluir letras parecidas a números, por ejemplo, la letra "O", dividiendo el Ecuador entre las letras "M", al sur, y "N", al norte.

Cada huso es equivalente a un intervalo de  $6^\circ$  entre las longitudes, por ejemplo,  $-78^\circ E$  hasta  $-72^\circ E$  es el huso 18. Siguiendo con el ejemplo,  $-75^\circ E$  sería el centro del intervalo que, en términos de UTM, sería igual a 500000 m y permanecería constante en todas las latitudes. Por otra parte, los límites en UTM disminuyen en función de las latitudes, por ejemplo, si el intervalo en coordenadas geográficas es ( $-78^\circ E$ ,  $-72^\circ E$ ), en coordenadas UTM sería, en el Ecuador, (166021 m, 822836 m), pero en la latitud  $40^\circ N$ , sería (243900 m, 747561 m).

Las zonas se dividen en intervalos de  $8^\circ$  en relación a las latitudes, por ejemplo, entre  $0^\circ N$  y  $8^\circ N$  se encuentra la zona "N". En el hemisferio norte, las latitudes en UTM van de 0 m a  $10^7$  m, siendo 0 m el Ecuador y aumentando en dirección norte, sin llegar a  $10^7$  m; y en el hemisferio sur, van de  $10^7$  m a 0 m, siendo el Ecuador  $10^7$  y disminuyendo hacia el sur, sin llegar a 0 m.

#### 3.2.2. Construcción de las retrotrayectorias para zonas de estudio

La metodología para la construcción de las BT de los eventos representativos de precipitación se resume en los diagramas de flujo presentado en las Figuras 29 y 30 (Anexos), en los cuales se muestra el proceso de lectura de los datos, procesamiento y cálculo de las BT y el almacenamiento progresivo de cada una de las componentes de la BT. El diagrama consta de 4 secciones nombradas **a**, **b**, **c** y **d**, donde **c** a su vez se sub-divide en 3 secciones que calculan específicamente cada una de las componentes tridimensionales de las trayectorias.

- a. En esta sección, se ingresan todas las condiciones, variables y restricciones que permanecerán constantes durante todo el proceso de construcción, en lo cual figuran las fechas de los eventos representativos de precipitación, las coordenadas de las estaciones pluviométricas in-situ (ISAGEN), los años disponibles de los set de datos de humedad específica y velocidad del viento, las

coordenadas geográficas y niveles de presión que poseen las variables. También, se ingresan los niveles de presión sobre las cuencas en el que se desea iniciar la construcción de la BT (850, 800, 750, 700, 500 hPa), el paso de tiempo y el tiempo de trayectoria, que en este caso se consideró de 8 días.

Además, se definen los límites longitudinales de las regiones UTM, que son función de las latitudes. Esto debido a que el cálculo del cambio en el espacio en cada paso de tiempo se obtiene en unidades de  $m$  (a partir de los campos de velocidad meridional ( $u$ ) y zonal ( $v$ ), que se encuentran en  $m/s$ ), facilitando el cálculo de las nuevas coordenadas en términos de UTM, para luego ser transformadas en coordenadas geográficas.

- b. A partir de esta sección, se generan trayectorias anualmente, extrayendo los eventos de dicho año y se extraen las variables de velocidad y humedad de los set de datos. Posteriormente se itera en función de los niveles de presión de iniciación y por cada nivel se procede a calcular las trayectorias de cada evento. Para cada evento, se define como coordenadas de inicio las correspondientes a la estación que detecta dicho evento, éstas se transforman a UTM, guardando el huso y zona asociados y se almacenan en una variable auxiliar. Por último, se extrae y almacena la humedad correspondiente a ese punto.
- c. En esta parte se comienza a calcular la trayectoria según muestra la ecuación 1, de manera iterativa e independiente cada componente de la coordenada siguiente usando información de la coordenada actual. La componente relacionada a la velocidad meridional se nombra  $X_{sin}$ , a la zonal,  $Y_{sin}$  y a omega,  $Z_{sin}$ . Cada una de ellas, debe atender a ciertas restricciones o consideraciones antes de poder ser almacenadas.
- c1. En esta primera subsección de la parte c, se define la coordenada  $Z$  o nivel de presión que será almacenado. La base de datos con la cual se está trabajando cuenta con niveles de presión entre 1 hPa y 1000 hPa, siendo estos los límites restrictivos de  $Z$ . Entonces, si  $Z_{sin}$  es mayor que 1000 hPa,  $Z_{sin}$  toma el valor

de 1000 hPa y se almacena en  $Z$ , en caso contrario, si  $Z_{sin}$  es menor a 1 hPa, toma este valor y se almacena en  $Z$ , y por último, si  $Z_{sin}$  no está por fuera del rango, se almacena sin modificarse.

- c2. En esta subsección se define la componente  $X$  o longitudinal de la trayectoria, para esto, inicialmente se obtienen los límites longitudinales UTM correspondientes a la zona y a la latitud  $Y_{sin}$ .

Segundo, si  $X_{sin}$  es menor al límite hacia la izquierda, se calcula la diferencia entre el límite izquierdo y  $X_{sin}$ , el resultado se le resta al límite de la derecha y la diferencia resultante es la nueva coordenada  $X$  en UTM, además al huso se le resta una unidad.

En caso contrario, si  $X_{sin}$  es mayor al límite hacia la derecha, se calcula la resta entre  $X_{sin}$  y el límite derecho, la diferencia se le suma al límite de la izquierda y el resultado es la nueva coordenada  $X$  en UTM, además al huso se le suma una unidad.

Si  $X_{sin}$  no se encuentra por fuera de los límites, la coordenada no se modifica, y el huso permanece constante hasta el siguiente paso de tiempo. Y por último, si el huso es menor a 1, este pasa a ser igual a 60; y si es mayor a 60, pasa a ser 1.

- c3. En esta parte se define la componente  $Y$  o latitudinal de la trayectoria. Si  $Y_{sin}$  es menor a 0, a  $Y_{sin}$  se le suma  $10^7$  y el resultado es la nueva coordenada  $Y$  en UTM, y la zona pasa a ser "M".

En caso contrario, si  $Y_{sin}$  es mayor a  $10^7$ , a  $Y_{sin}$  se le resta  $10^7$  y el resultado es la nueva coordenada  $Y$  en UTM, y la zona pasa a ser "N". Por último, si  $Y_{sin}$  no cumple ninguna de las condiciones anterior, la coordenada queda tal cual.

- d. Siguiendo con el diagrama de flujo, una vez definidas las componentes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , se almacenan, en coordenadas geográficas  $X$  y  $Y$ , y  $Z$  en términos de "hPa". Transformadas y almacenadas las coordenadas, se extrae la humedad específica de ese punto y se almacena. Un vez calculadas todas las componentes de la trayectoria y extraídas

las humedades, éstas se guardan en matrices independientes, donde cada columna es un evento. Ya con las matrices con todos los eventos por componentes, éstas se guardan en diccionarios según el nivel de presión de inicio en que se calcularon las **BT**, uno por cada componente. Y por último, los diccionarios con todos los niveles, se guardan en un único diccionario, unificando todos los elementos de las **BT**.

### 3.2.3. Análisis de las retrotrayectorias de humedad

Para cada evento representativo de precipitación seleccionado de las diferentes estaciones pluviométricas, se le construye la **BT** para un periodo de tiempo igual a 8 días, para los niveles de llegada (850, 800, 750, 700, 500 hPa). Con las **BT** estimadas, se realiza el ciclo anual para los diferentes niveles de llegada, mostrando los patrones espaciales de las trayectorias en las diferentes épocas del año.

Se estiman las zonas de circulación preferente de las trayectorias. Para realizarlo, se define una malla de resolución  $0.25^\circ$  por  $0.25^\circ$ , en la cual, en cada pixel, se suma el número de **BT** que lo cruzan y se divide por el total de **BT**, de esta manera se observa la probabilidad asociada a que una **BT** circule por un punto en específico.

Por último, se definen las zonas de humidificación y deshumidificación de las parcelas que siguen las **BT** hasta llegar a las cuencas de interés. Para estimar las zonas de humidificación, se calculó la diferencia de humedad punto a punto a lo largo de la trayectoria, de manera similar a lo descrito en la identificación de zonas de circulación preferentes de las **BT**, acá también se define una malla de  $0.25^\circ$  por  $0.25^\circ$  y en cada pixel, se realiza una suma móvil (de  $1^\circ$  por  $1^\circ$ ) de las diferencias de humedad que circulan por cada una de ellas. Haciendo esto, se está calculando los aportes netos de humedad de cada pixel durante el periodo de enero de 2010 hasta diciembre de 2016. Entonces, las zonas con valores negativos son aquellas donde en éste periodo las trayectorias han perdido más humedad de la que han ganado y las zonas con valores positivos son lo contrario, es decir, las parcelas que circulan sobre estos sitios se humidifican.

### 3.3. Análisis de sistema de tormenta por medio de imágenes satelitales

Para observar la procedencia, comportamiento y algunas características de los eventos de precipitación que se presentan en la cuenca La Miel es de gran utilidad el uso de las imágenes satelitales proporcionadas por el GOES-13 (Geostationary Operational Environmental Satellite) que operó hasta diciembre de 2017 con resolución temporal de 30 minutos para Colombia y espacial de 4 km y por el GOES-R/GOES-16, en funcionamiento desde entonces, que cuenta con una resolución temporal de 5 minutos y espacial de 2 km.

El GOES-13 Imager, cuenta con 5 canales, de los cuales para este estudio es de interés el canal número 4 o infrarrojo ( $10.20\text{-}11\text{-}20 \mu\text{m}$ ), que en términos de temperatura de brillo es un proxy de precipitación y altura de nube, mientras que el GOES-16 cuenta con 16 bandas de las cuales se usaría la número 13.

Con el fin de tener la capacidad para realizar un análisis más robusto de las imágenes satelitales disponibles se desarrolla un algoritmo que sirve para identificar la trayectoria de las nubes generadoras de lluvia en la región, correspondientes a cada uno de los eventos mencionados en el Capítulo 4.1, y de esta manera comparar los resultados obtenidos en el Capítulo 4.2.

## 4. Resultados

### 4.1. Identificación y caracterización de los eventos representativos de precipitación.

Se seleccionaron un total de 18 estaciones pluviométricas de ISAGEN, ubicadas en la cuenca de La Miel, y 18 estaciones ubicadas en el Valle de Aburrá. En la Figura 1 se presentan el mapa de elevación digital de ambas zonas de estudio, se observa que en la cuenca La Miel, el rango de alturas que se cubre es mucho mayor que en el caso del Valle de Aburrá. El color de los puntos representa la intensidad media en cada estación. Se puede apreciar que en la cuenca La Miel, la intensidad media es menor en las estaciones que se encuentran al suroccidente de la cuenca (subcuenca Guarinó), coincidiendo con las zonas más altas. En el Valle de

Aburrá, la distribución de intensidades es mucho más uniforme a lo largo de todo el valle.

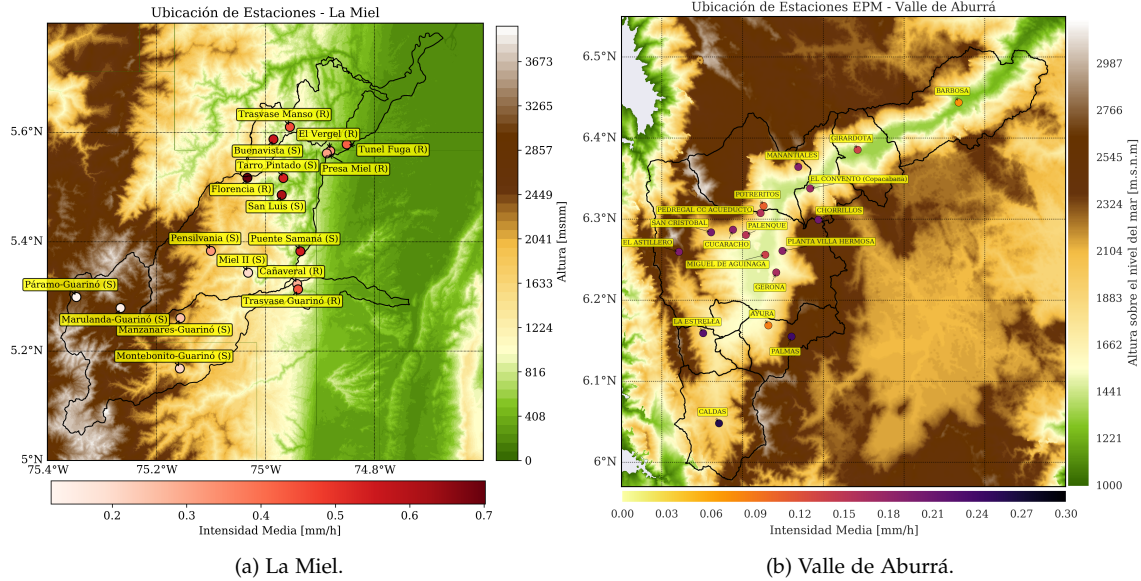


Figura 1: Mapa de elevación digital, ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas, e intensidades medias de cada estación para la cuenca de La Miel y el Valle de Aburrá.

Con el fin de verificar la variación anual y diaria se calculan las distribuciones temporales de precipitación para ambas escalas. En las Figuras 2, y 3 se presenta el promedio de intensidad para cada hora del día, se observa que el pico de intensidad a lo largo del día para el Valle de Aburrá es aproximadamente a las 15:00, mientras que el pico para la estación en La Miel es a las 00:00. Esto es un indicio de que los procesos generadores de lluvia en ambas zonas de estudio es diferente, mientras que en el Valle de Aburrá predominan los sistemas convectivos que se forman en la tarde a causa de la radiación solar y la inestabilidad atmosférica, en la cuenca de La Miel sucede algo distinto, la mayor intensidad promedio se presenta en la noche, lo que indica que la lluvia es advectada a la cuenca por sistemas de nubes que se producen fuera de la misma y la afectan en las horas de la noche.

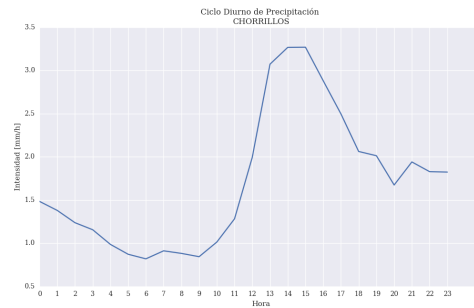


Figura 2: Ciclo diario de intensidad media para una estación en el Valle de Aburrá.

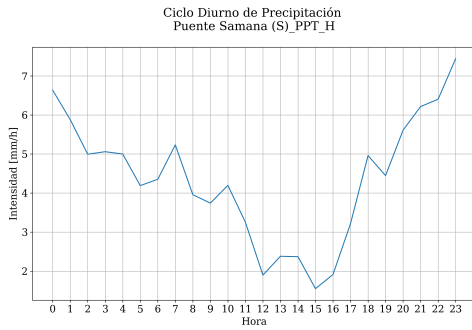


Figura 3: Ciclo diurno de intensidad media para una estación en el Valle de Aburrá.

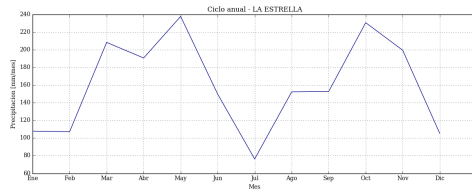


Figura 4: Ciclo anual de precipitación sobre una estación en el Valle de Aburrá.

En ambas zonas de estudio, se presenta un ciclo anual de precipitación promedio bimodal, como se muestra en la Figura 4, con picos máximos en los meses de mayo y octubre, y un mínimo en el mes de julio.

Para la selección de los eventos, se identifica el inicio y final de cada uno, y se obtiene su duración y precipitación acumulada. Posteriormente se organizan anualmente de mayor a menor de acuerdo a su precipitación acumulada y se consideran como representativos aquellos que se encuentren dentro del 80% de la precipitación acumulada total anual.

En las Figuras 5, 6 y 7, se presentan las series de los eventos representativos seleccionados en una estación del Valle de Aburrá, una al norte de La Miel, y una al Sur de la misma. Cada punto representa un evento, y su color su intensidad promedio. El eje "y" es la duración de cada evento. Se observa en todos los casos que por lo general a mayor duración la intensidad del evento es menor, y viceversa.

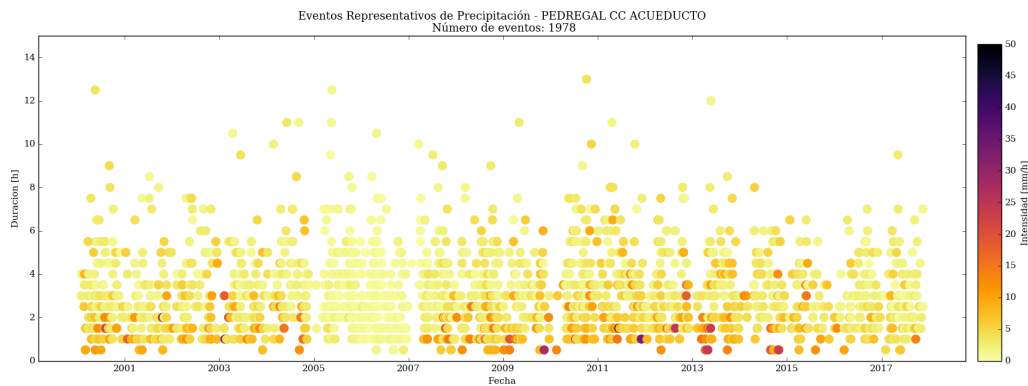


Figura 5: Ecentos representativos en una estación ubicada en la zona central del Valle de Aburrá.

Se puede apreciar cómo hay gran diferencia entre la intensidad de los eventos mostrados en las Figuras 6 y 7, correspondientes a estaciones pluviométricas ubicadas al norte y al sur de la cuenca La Miel, ésto

concuerta con el hecho de que en las estaciones con mayor altura sobre el nivel del mar, la cantidad de precipitación promedio es menor que en las de menor altura en la cuenca La Miel.



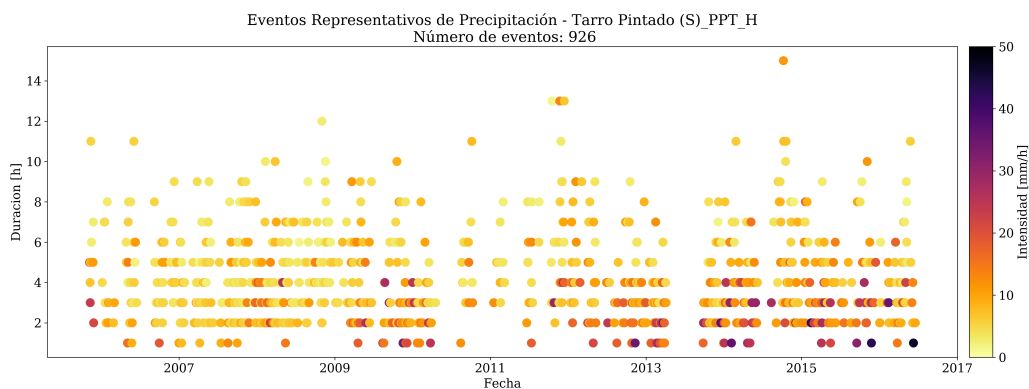


Figura 6: Eventos representativos en una estación ubicada en la zona norte de la cuenca La Miel

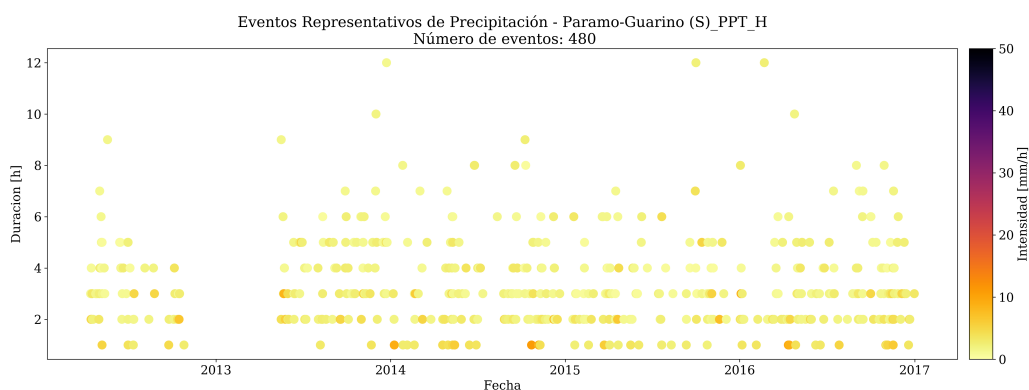


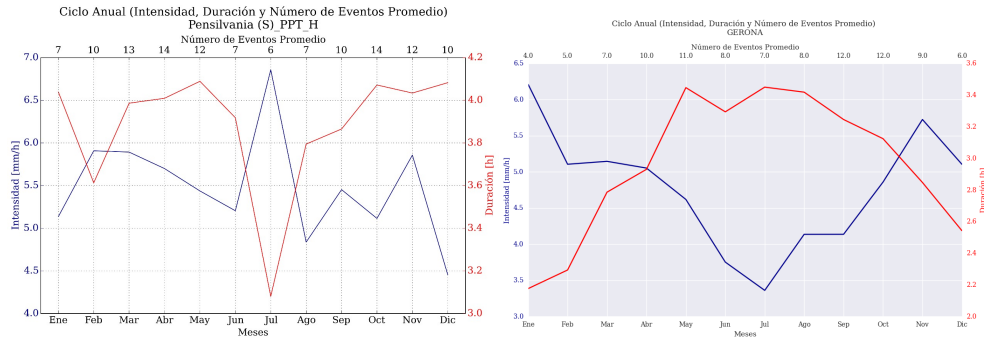
Figura 7: Eventos representativos en una estación ubicada en la zona sur de la cuenca La Miel.

La variabilidad de las características de duración (rojo), intensidad (azul) y número de eventos promedio (número en la parte superior) a lo largo del año en promedio se presenta en la Figura 8, se observa un ciclo anual marcado de las variables mencionadas para el Valle de Aburrá, los eventos a mitad de año, son en promedio menos intensos y tienen mayor duración, mientras que en el mes de enero, son más intensos pero duran menos.

Para el caso de La Miel, se encuentra que en los meses de enero y julio se presenta una menor cantidad de eventos representativos que en el resto del año, y los eventos que ocurren en los meses lluviosos (mayo, octubre y noviembre) en promedio

son menos intensos pero con duraciones mayores, lo que corrobora que el proceso más común causante de precipitaciones en la cuenca son los sistemas estratiformes, los cuales son más variables en la noche.

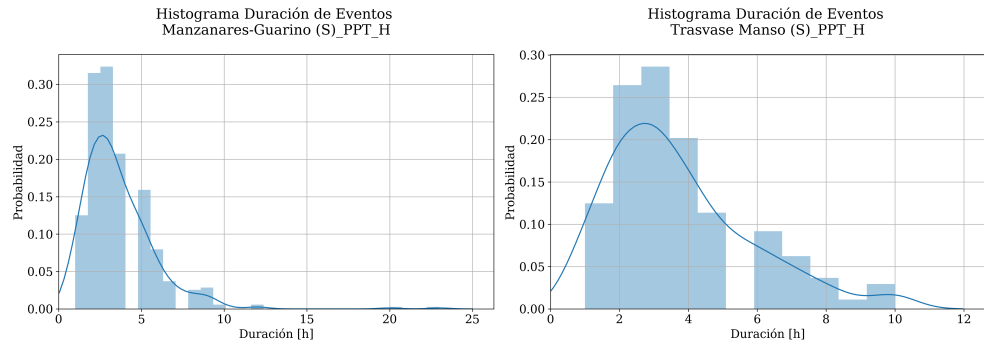
En las Figuras 9 y 10 se muestran los histogramas de duración e intensidad de los eventos representativos para las estaciones Manzanares Guarinó y Transvase Manso. Los valores más frecuentes para todas las estaciones en cuanto a duración de los eventos se encuentran entre 2 y 3 horas, mientras que los valores más frecuentes de intensidad se encuentran entre 2 y 8 mm/h, siendo mayores para las estaciones ubicadas al norte de la cuenca.



(a) La Miel.

(b) Valle de Aburrá.

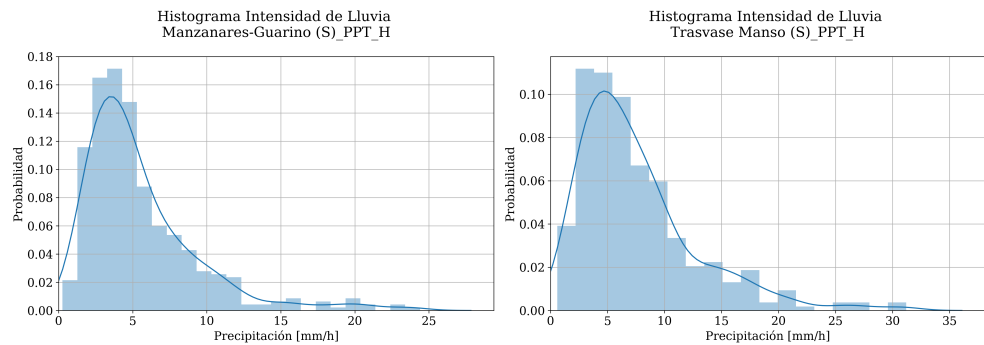
Figura 8: Ciclo anual de duración, intensidad y número de eventos para los eventos representativos seleccionados.



(a) Manzanares Guarinó

(b) Tránsito Manso

Figura 9: Histogramas de duración de eventos para las estaciones Manzanares Guarinó (sur de la cuenca) y Tránsito Manso (norte de la cuenca)



(a) Histograma de intensidades, Manzanares Guarinó (b) Histograma de intensidades, Tránsito Manso

Figura 10: Histogramas de intensidad de eventos para las estaciones Manzanares Guarinó (sur de la cuenca) y Tránsito Manso (norte de la cuenca)

La distribución de frecuencias de duración e intensidad para el Valle de Aburrá es similar a la sección izquierda de las Figuras 9 y 10.

## 4.2. Retrotrayectorias de humedad (Back Trajectories).

### 4.2.1. Variación anual

El ciclo anual de la hidro-climatología de la zona Andina de Colombia, se ve fuertemente influenciada por fenómenos físicos como la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), las corrientes superficiales del Caribe y el Pacífico, y las interacciones suelo-atmósfera de la región [Poveda, 2004]; provocando que se presenten dos épocas lluviosas en gran parte del territorio colombiano entre los trimestres de marzo, abril, mayo y septiembre, octubre, noviembre. Por lo tanto, conocer el régimen anual de patrones espaciales de las BT facilita la identificación de zonas de humidificación y deshumidificación que pueden ser relevantes para la cantidad de humedad, y por ende, para la precipitación de la cuenca.

Para la construcción de los ciclos anuales de BT, se utilizaron eventos representativos de lluvia entre enero de 2010 y diciembre de 2016, para un total de 2857 eventos registrados por las estaciones meteorológicas de las cuencas La Miel, Manso y Guarinó, y 13048 eventos registrados en el Valle de Aburrá. El área que se utilizó para calcular las trayectorias en ambos casos comprende las coordenadas (20°N, 15°S) y (-95°E, -20°E), en las cuales se encuentran el norte de Sudamérica, parte de Centroamérica y el Caribe, además se tiene gran parte del Océano Atlántico y parte del Océano Pacífico oriental. Cada trayectoria tiene una duración de 8 días, con resolución horaria.

La orografía de Colombia y en específico las cordilleras de los Andes, condicionan la circulación de humedad en los niveles de alta presión de la atmósfera (de 900 a 800 hPa), obligando a las

parcelas que llegan a las cuencas La Miel, Manso y Guarinó, a ingresar por el norte o al sur de Colombia y haciéndola circular entre las cordilleras central y oriental, así como se muestra en las BT de la Figura 11. Esto mismo se observa en las trayectorias de las BT de la cuenca del Valle de Aburrá, pero en este caso la circulación se da entre las cordilleras occidental y central, como se muestra en la Figura 31 (Anexos). Para niveles de presión de llegada de 500 hPa, la orografía pierde importancia y las trayectorias se ven principalmente influenciadas por los vientos alisios y otros fenómenos como la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical), como se observa en las Figuras 12 y 32 (Anexos).

Se aprecia que, para niveles de presión de 850 (Figura 11), en las cuencas La Miel, Manso y Guarinó, existen patrones muy marcados respecto al origen de las trayectorias que llegan a las cuencas según el mes en el que se detecta el evento representativo de lluvia, observándose lo siguiente: En los meses de enero, febrero y marzo predominan las trayectorias con origen en el Atlántico y el Orinoco. Los meses de junio julio y agosto, predominan las trayectorias provenientes del Orinoco y la Amazonía. Los meses de octubre y noviembre son más frecuentes las trayectorias con origen en el Pacífico y el Atlántico. Y los meses, de abril, mayo y diciembre se pueden considerar como meses de transición, donde el origen de las trayectorias es más variado que en los otros casos. De manera similar, para la cuenca del Valle de Aburrá, Figura 31 (Anexos), se puede apreciar que los patrones respecto al origen de las trayectorias que llegan a la cuenca, se ven afectados a los mismos forzamientos que los observados en las cuencas aledañas a La Miel, pero que, por su ubicación entre la cordillera occidental y central, la cuenca del Valle de Aburrá se ve fuertemente influenciada por los vientos originarios del Pacífico, presentándose que, a parte de los patrones observados en las cuencas aledañas a Miel 1, hay presencia de BT con origen el sur del Pacífico, en todos los meses del año, a excepción de los meses de enero, febrero y marzo, que la influencia del Pacífico se debilita.

Back Trajectories de la cuenca La Miel.  
Ciclo anual Nivel 850 hPa

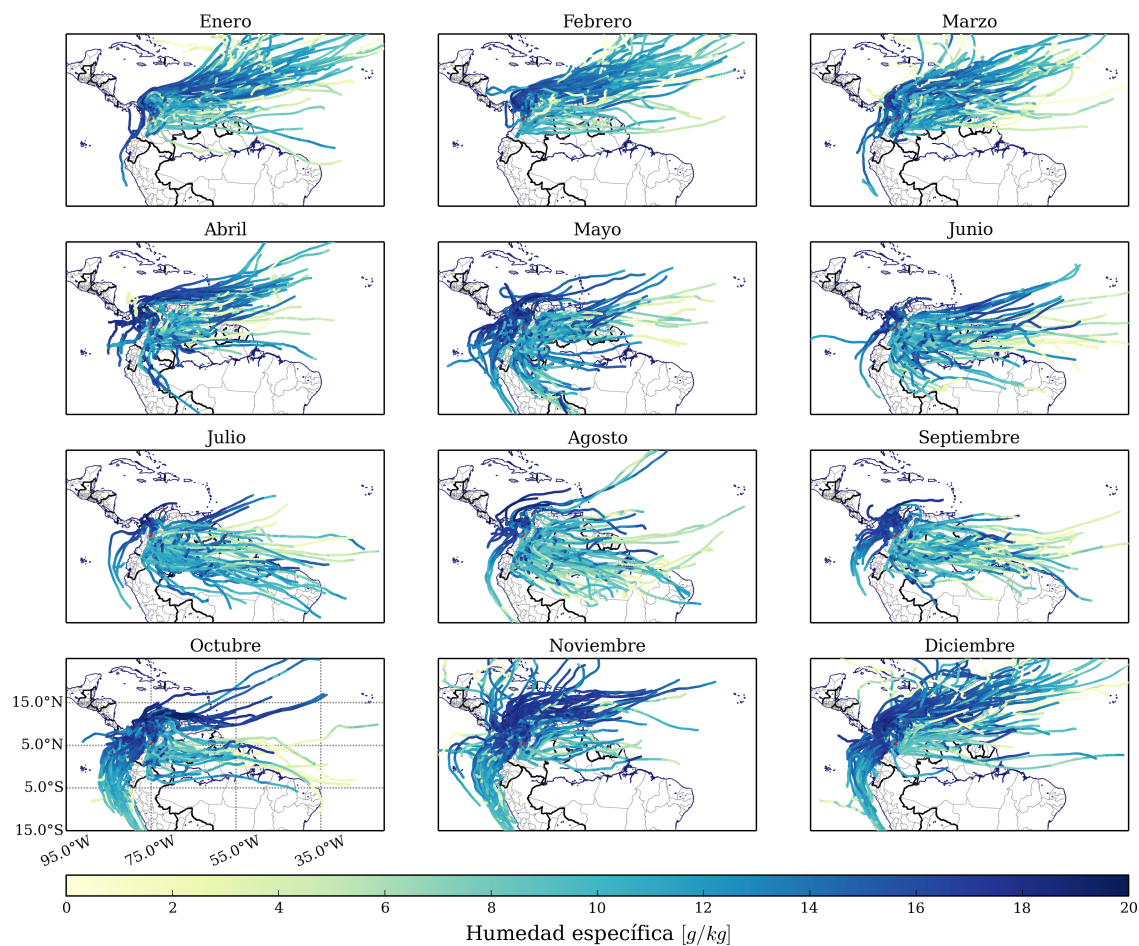


Figura 11: Ciclo anual de Back Trajectories de las cuencas La Miel, Manso y Guarínó para nivel de llegada de 850 hPa.

Para los 500 hPa (Figuras 12 y 32), en los mismos meses, se presentan patrones similares a los niveles inferiores de la atmósfera, pero con ciertas diferencias. Los meses de enero, febrero y marzo siguen predominando las trayectorias con origen en el Atlántico y el Orinoco, pero de manera más dispersa respecto a los otros niveles de presión. Mientras, los meses de junio, julio,

agosto presentan un patrón claro desde el Atlántico tropical e ingresando por la cuenca del Orinoco y Amazonas. Y por último, los meses de octubre y noviembre, aunque continúan las trayectorias en sentido oriente-occidente, una importante cantidad de trayectorias tienen como origen el norte y sur del océano Pacífico.

Back Trajectories de la cuenca La Miel.  
Ciclo anual Nivel 500 hPa

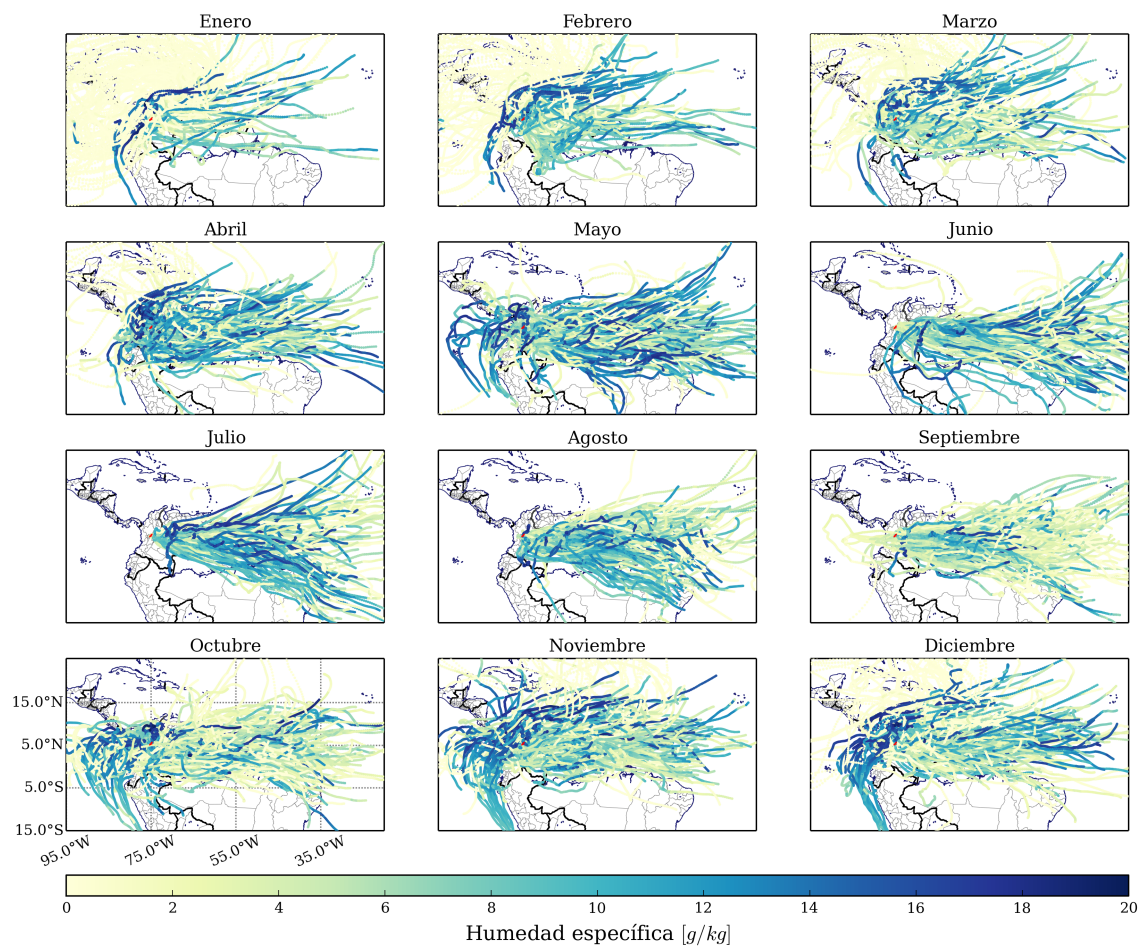


Figura 12: Ciclo anual de Back Trajectories de las cuencas La Miel, Manso y Guarinó para nivel de llegada de 500 hPa.

#### 4.2.2. Densidad de trayectorias

La identificación de zonas por las cuales pasa un mayor número de trayectorias, además de indicar los caminos preferentes de las mismas, da una idea de aquellas regiones que pueden tener mayor influencia sobre la humedad que finalmente llega a las cuencas. Las Figuras 13 y 14, presentan el análisis de densidad de trayectorias a partir de la probabilidad de ocurrencia sobre pixeles de  $0,25^\circ$  por  $0,25^\circ$ , para el área comprendida entre  $(15^\circ\text{N}, 5^\circ\text{S})$  y  $(-80^\circ\text{E}, -65^\circ\text{E})$ . Se observa que la mayor concentración de trayectorias se da en las zonas cercanas a las cuencas, en la zona Andina de

Colombia.

Para las trayectorias que llegan a niveles superiores de la atmósfera (500 hPa), en el caso de las cuencas La Miel, Manso y Guarinó, se resaltan zonas del oriente y nor-oriente como recorridos preferentes, siendo coherentes con la variación mensual de estas trayectorias y los vientos alisios; pero para cuenca del Valle de Aburrá, se tiene que no existe un dirección preferente. En cuanto a niveles inferiores, en el caso de las cuencas La Miel, Manso y Guarinó, las trayectorias tienden a transitar a lo largo del valle del río Magdalena y en ciertos puntos sobre las cordilleras central y oriental, dado que, como se mencionó en secciones anteriores, la topografía

de la zona condiciona la entrada de muchas de las trayectorias; en el caso de la cuenca del Valle de Aburrá, se tiene que la circulación se da entre

la cordillera Occidental y la central hacia el norte, y hacia el sur la circulación tiende a cruzar la cordillera occidental en dirección al Pacífico.

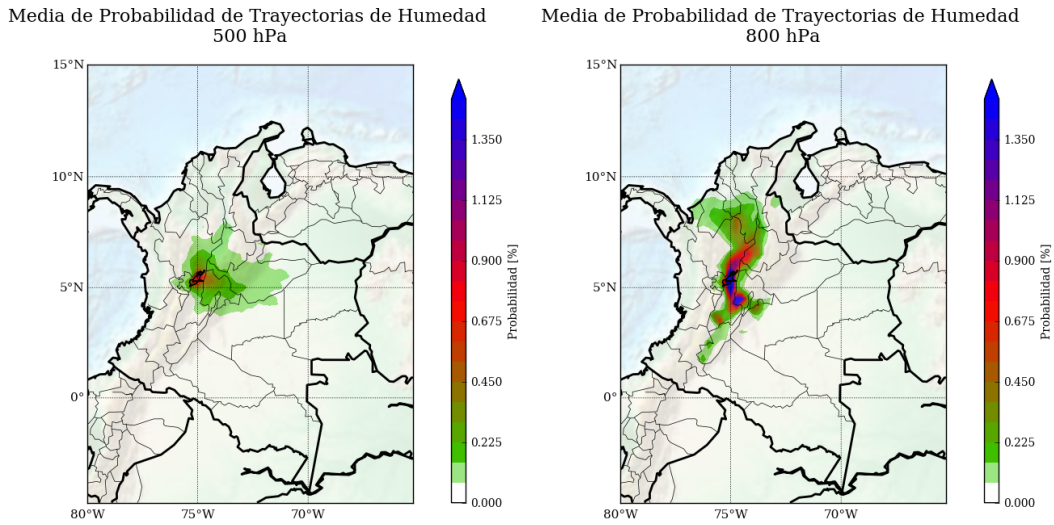


Figura 13: Probabilidad media de ocurrencia de Back Trajectories para nivel de llegada de 500 y 800 hPa, para la cuenca La Miel, Manso y Guarín.

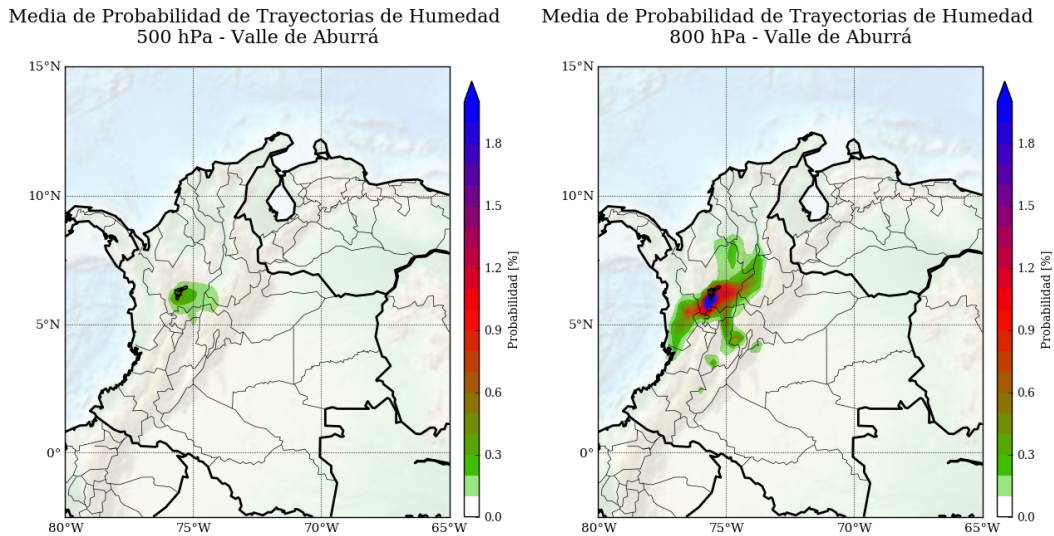


Figura 14: Probabilidad media de ocurrencia de Back Trajectories para nivel de llegada de 500 y 800 hPa, para el Valle de Aburrá.

De esta manera, se resalta de nuevo, la influencia de la topografía y los vientos alisios sobre la entrada de humedad a las cuencas de estudio, sin embargo, este análisis debe ser acompañado de la identificación de puntos o regiones de humidificación o aporte de humedad a las trayectorias, de manera que sea posible resaltar aquellas por las cuales pasa un número importante de trayectorias y a su vez aportan humedad a las mismas.

#### 4.2.3. Zonas de humidificación

A lo largo de las trayectorias de las parcelas de aire, se presentan procesos de humidificación y dehumidificación, éstos dependen de múltiples factores dinámicos, termodinámicos y meteorológicos, entre ellos la topografía, el cambio de superficie (océano-continente), y la cantidad de humedad específica media en determinadas regiones, que favorecen o no la carga de humedad en las parcelas que se dirigen hacia la cuenca de interés. La identificación de estas regiones favorece la construcción de estrategias complementarias de monitoreo y pronóstico de las condiciones meteorológicas y climáticas en la cuenca, ya que estas zonas regulan en cierta medida la oferta de humedad en la cuenca, y por lo tanto, su régimen

de precipitación.

El cambio o gradiente de humedad específica en cada paso de tiempo en una trayectoria, es el principal indicador de humidificación, por lo cual a partir de la integración de dichos cambios en el periodo enero de 2010 hasta diciembre de 2016, es posible señalar regiones que aportan al transporte de humedad de las trayectorias, o que por el contrario tienden a comportarse como sumidero de humedad. Este análisis se lleva a cabo en dos partes, inicialmente se aborda toda la región de estudio excluyendo la cuenca del Magdalena-Cauca y posteriormente se realiza un análisis más localizado sobre las cuencas de estudio, esto debido a que los cambios de humedad son muy fuertes sobre la cuenca del Magdalena-Cauca y si se analiza todo el área de estudio no es posible identificar el aporte de humedad oceánica.

Los aportes netos de humedad específica en los niveles de presión de 500 hPa de las zonas externas a la cuenca Magdalena-Cauca, Figuras 15 y 16, exhiben dehumidificación en las regiones del Orinoco, la cuenca Amazónica y la Costa Pacífica, principalmente alrededor de la latitud 5°N; en cambio, en las regiones del Atlántico tropical norte y al sur del océano Pacífico oriental, se presentan pequeños aportes de humedad.

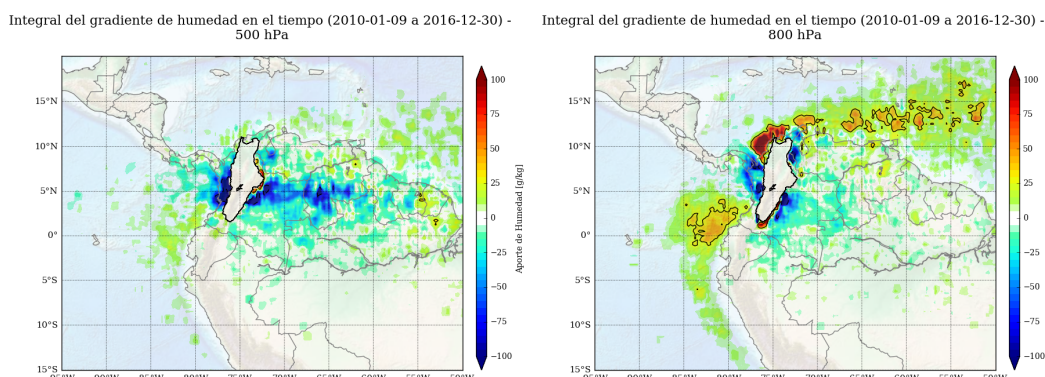


Figura 15: Integral del gradiente de humedad en el tiempo para 500 y 800 hPa, para la cuenca La Miel, Manso y Guarín.

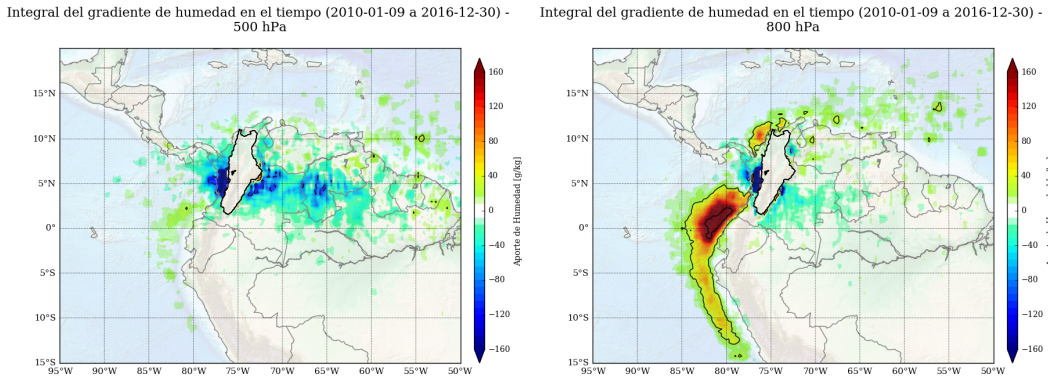


Figura 16: Integral del gradiente de humedad en el tiempo para 500 y 800 hPa, para el Valle de Aburrá.

En las Figuras 18 y 19 se muestran los porcentajes aproximados correspondientes a la humedad aportada por cada una de las macro-cuencas que se muestran en la Figura 17 para los años de entre 2010 y 2016.

Para la cuenca de La Miel, en la Figura 18, se observa que para 500 hPa, la mayoría de humedad ha sido adveccionada desde el Mar Caribe (73%), y aproximadamente el 23% de la humedad fue transportada desde el Pacífico Norte Tropical. En alturas más bajas de la tropósfera, las demás cuencas cobran importancia, en este caso, el Caribe aporta cerca del 60%, y el resto del porcentaje corresponde al Atlántico y Pacífico tropicales.

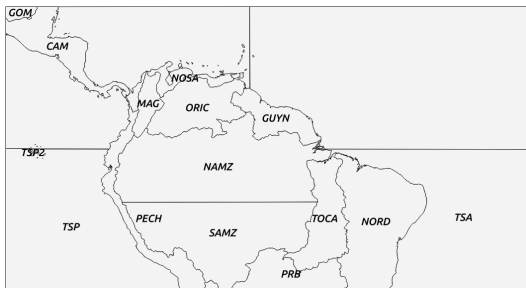


Figura 17: Macro-cuencas.

En el caso del Valle de Aburrá, para 500 hPa, los porcentajes son similares a la otra zona de estudio, aunque el Atlántico Norte cobra importancia, para 850 hPa, el Pacífico Sur y Norte tropicales, aportan la mayoría de humedad a la cuenca.

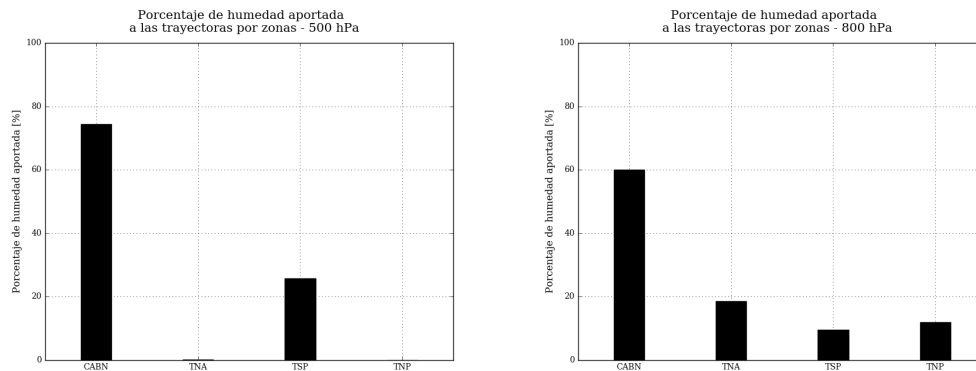


Figura 18: Integral del gradiente de humedad específica de las trayectorias de 500 hPa y 800 hPa, enfocado sobre la cuenca del Magdalena-Cauca, cuencas La Miel, Manso y Guarínó.



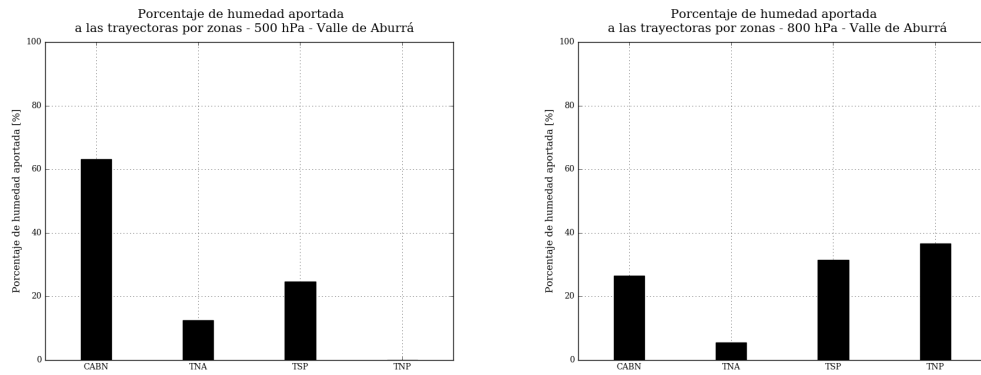


Figura 19: Integral del gradiente de humedad específica de las trayectorias de 500 hPa y 800 hPa, enfocado sobre la cuenca del Magdalena-Cauca, cuenca del Valle de Aburra.

En cuanto a trayectorias que llegan a niveles entre 700 y 850 hPa, se evidencia mayor humidificación en las regiones oceánicas, las Figuras 15 presenta los resultados para el nivel 800 hPa, de las cuencas La Miel, Manso y Guarinó, y la Figura 16, presenta los resultados de la cuenca del Valle de Aburra. Se destaca la humidificación en las regiones del Pacífico Colombiano y el Atlántico tropical norte, especialmente en la costa Atlántica colombiana, en el caso de las cuencas aledañas a Miel 1, y en el caso del Valle de Aburrá, las costas del Pacífico

sur; sin embargo, en las regiones de la cordillera Occidental, el Orinoco y el Amazonas son zonas de deshumidificación, pero en menor medida en relación a los niveles de 500 hPa.

Analizar el gradiente de humedad específica integrado en el tiempo en regiones aledañas a las cuencas de interés (Figuras 20 y 21), revela en primer lugar máxima deshumidificación sobre la zona de La Miel en todos los niveles, esto debido al procesos de generación de las BT, que fueron condicionadas a periodos con precipitación sobre la cuenca.

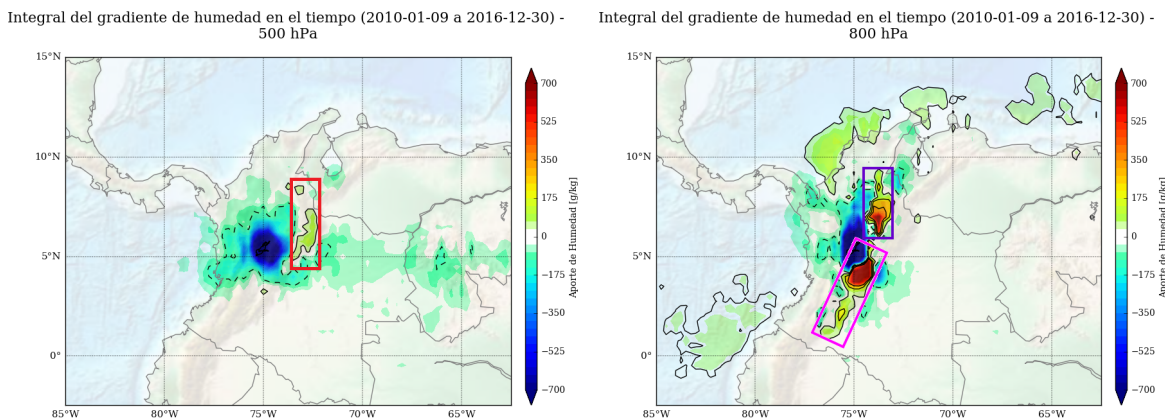


Figura 20: Integral del gradiente de humedad específica de las trayectorias de 500 hPa y 800 hPa, enfocado sobre la cuenca del Magdalena-Cauca, cuencas La Miel, Manso y Guarinó.

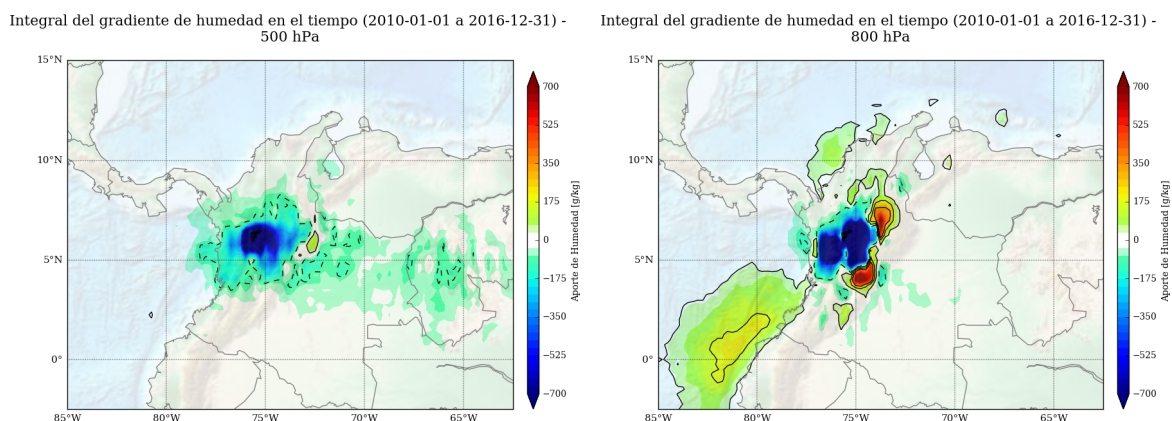


Figura 21: Integral del gradiente de humedad específica de las trayectorias de 500 hPa y 800 hPa, enfocado sobre la cuenca del Magdalena-Cauca, cuenca del Valle de Aburrá.

En segundo lugar, en las cuencas aledañas a Miel 1, se resaltan zonas de ganancia significativa de humedad. Para trayectorias que llegan a la cuenca a 500 hPa la mayor humidificación se da sobre una porción de la ladera occidental de la cordillera oriental, enmarcada en el recuadro rojo de la Figura 20, asociado al tránsito de trayectorias en sentido oriente-occidente e influencia de la cordillera en cambios negativos y positivos sobre el transporte de humedad; esto mismo se observa para la cuenca del Valle de Aburrá, en la Figura 21.

Para las cuencas cercanas a Miel 1, las trayectorias que llegan entre 700 y 850 hPa, se resalta el sector sur-oriental en sentido del valle del Magdalena Alto (recuadro magenta), que aporta humedad significativa a las trayectorias que ingresan por el sur. Finalmente, para niveles inferiores de la atmósfera el valle del Magdalena Medio (recuadro purpura) juega un papel muy importante para el suministro de humedad a los eventos de precipitación en las cuencas de interés. Para el caso del Valle de Aburrá, además de las zonas mencionadas, el sur del Pacífico también representa un importante aporte a la humedad para los eventos de precipitación que ocurren dentro de la cuenca.

En la Figura 22 se muestra el ciclo anual del valor del gradiente de humedad integrado por trimestres para las trayectorias correspondientes 850 hPa en la cuenca de La Miel. Se observa en los meses de diciembre, enero y febrero (DEF) predomina la ganancia de humedad al norte de la cuenca,

en el bajo Magdalena, y la región de Santander (cuenca del río Sogamoso), contrario a lo que pasa en los meses de junio, julio y agosto (JJA) donde se presenta más aporte de humedad al sur-oriental de la cuenca, cobran importancia las regiones del Caquetá y el Putumayo. En los meses de marzo, abril y mayo (MAM) y septiembre, octubre y noviembre (SON) existe una ganancia de humedad tanto al norte como al sur de la cuenca, siendo más predominante en SON los gradientes positivos de humedad en el valle del Magdalena Medio, mientras que en MAM cobra más importancia la región del Huila, parte alta de la cordillera oriental.

Para el Valle de Aburrá, se observa que en el trimestre de diciembre, enero y febrero (DEF), la ganancia de humedad es baja con respecto a los otros trimestres, en marzo, abril y mayo (MAM), se puede observar que aumenta el aporte de humedad de las regiones del Pacífico Colombiano, las regiones del sur del Huila y el Caquetá, y nuevamente cobra importancia la región de Santander, sobre la cuenca del río Sogamoso, como fuente de humedad para las parcelas de aire que se dirigen a la cuenca. En junio, julio y agosto (JJA), la humidificación es similar al caso de MAM, solo que el Pacífico y Sur de la cordillera central pierde importancia. En la temporada de septiembre, octubre y noviembre (SON), se observa predominancia de la humidificación de las trayectorias provenientes del Pacífico, y de la región de Santander, pero en menor medida que en MAM y JJA.

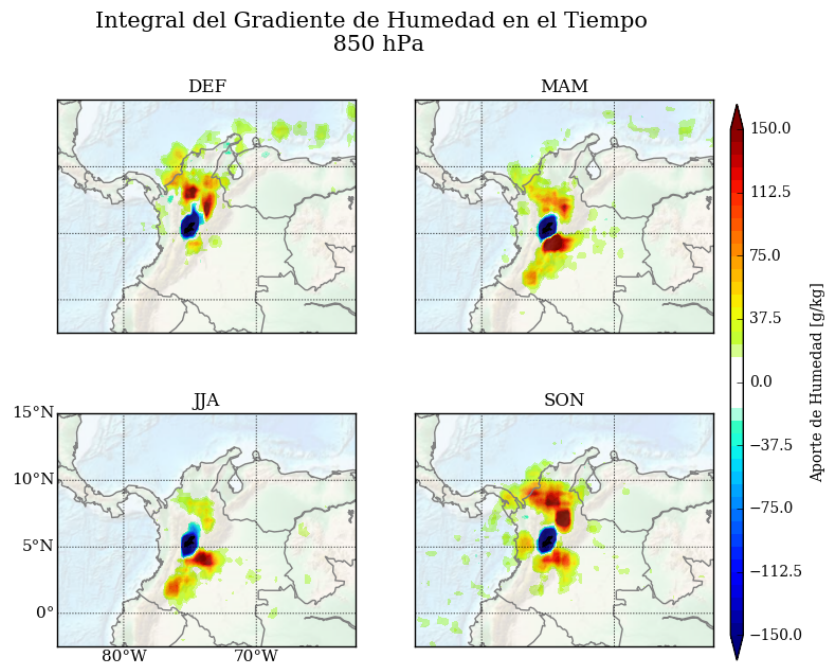


Figura 22: Ciclo anual por trimestres de la integral del gradiente de humedad en el tiempo para 850 hPa, Miel.

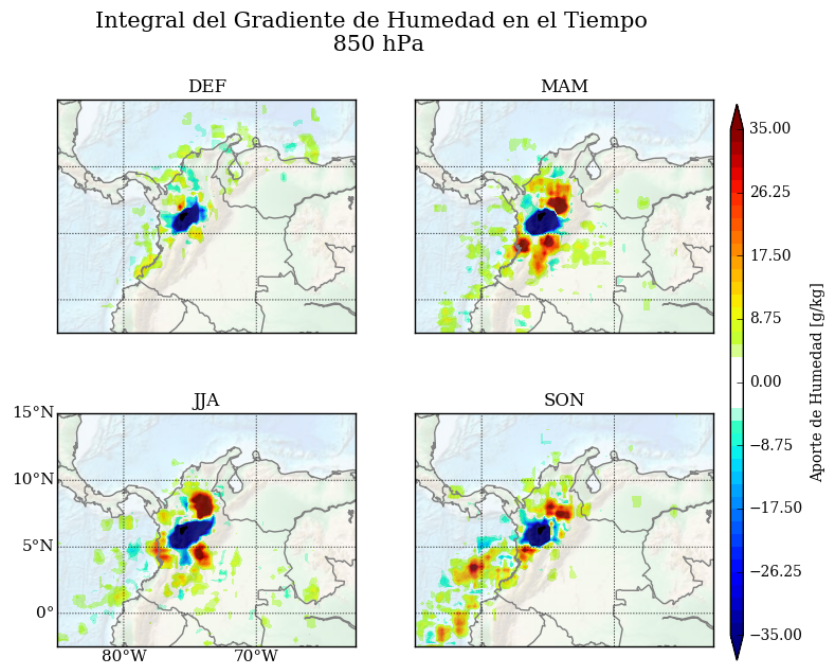


Figura 23: Ciclo anual por trimestres de la integral del gradiente de humedad en el tiempo para 850 hPa, Valle de Aburrá.

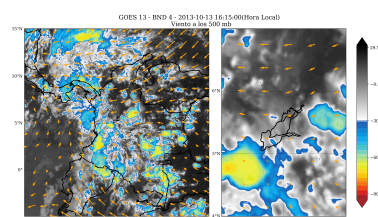
### 4.3. Seguimiento de sistemas de tormenta a partir de imágenes satelitales

Se obtuvieron imágenes satelitales para los eventos representativos de la estación Pensilvania en enero de 2011 y octubre de 2013. En la Figura 24 se muestra la evolución de un evento en particular registrado en octubre de 2013, visto desde el dominio de toda Colombia y de la cuenca en específico, además se observa la dirección y magnitud del viento a los 500 hPa (flechas naranjas), que según lo observado se encuentra fuertemente asociado al movimiento de los sistemas de precipitación que van de oriente a occidente.

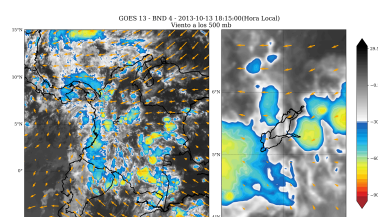
En el mes de enero de 2011, se observa que los núcleos de nubes que generan eventos de lluvia provienen tanto del oriente como del occidente, y la magnitud de la velocidad del viento a los 500 hPa es mayor que en el mes de noviembre de 2013, época en la cual se encuentran más sistemas de precipitación y de tamaños mayores a lo largo y ancho de todo el territorio Colombiano, por estas fechas la mayoría de eventos observados en la cuenca provienen de la cordillera oriental.

A partir de lo observado en las imágenes satelitales de enero de 2011 y octubre de 2013 y los resultados obtenidos en la caracterización de advección de humedad, es posible que el ciclo diurno de precipitación con pico a la media noche esté explicado por el ascenso de humedad en la cordillera oriental (a causa de las características orográficas y favorecido por la radiación solar) en las horas de la tarde, generando nubes cargadas de humedad, estos sistemas son impulsados por los vientos provenientes del este en dirección a La Miel y llegan a la cuenca en horas de la noche.

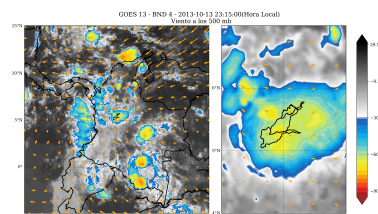
En enero de 2011 este comportamiento va acompañado de sistemas de precipitación que se mueven desde el occidente o la costa pacífica hacia la cuenca, haciendo menos clara su identificación. Estos sistemas pueden estar controlados por el viento a niveles más bajos a causa de la altura la corriente de vientos provenientes del pacífico (950 hPa).



(a) 16:15



(b) 18:15



(c) 23:45

Figura 24: Evolución de un evento de precipitación en Octubre del 2013 en Colombia y La Miel, dirección del viento a los 500mb e imagen satelital del GOES-13 en temperatura de brillo

#### 4.3.1. Trayectoria de nubes

Con el fin de tener la capacidad para realizar un análisis más robusto de las imágenes satelitales disponibles se encuentra en desarrollo un algoritmo que sirve para identificar la trayectoria de las nubes generadoras de lluvia en la región, correspondientes a cada uno de los eventos mencionados en el Capítulo 4.1, y de esta manera comparar los resultados obtenidos en el Capítulo 4.2.

El algoritmo consiste en varias fases:

Inicialmente se analizan los diagramas de Hövmoller desde 12 horas antes hasta 12 horas después del inicio del evento en la cuenca, como se muestra en la Figura 26, en los cuales se observa el promedio, a la izquierda, en las latitudes, y a la derecha en las longitudes, de la temperatura de

brillo, las líneas naranjas punteadas representan los límites de la cuenca en latitud (izquierda) y longitud (derecha), permite identificar hacia qué dirección se mueven los sistemas de nubes (de temperatura de brillo menores a  $-30.5^{\circ}\text{C}$  [Scofield and Kuligowski, 2003]) a partir de la pendiente de los diagramas (línea roja sobre ambas imágenes). En el caso de que ninguno de los diagramas presente pendiente lo más probable es que se trate de un sistema convectivo de mesoescala, como el que se muestra en la Figura 25, presentado el 29 de julio de 2011, que no tiene que ver con dinámicas cercanas a la cuenca, sino que se da por condiciones a nivel regional y abarca gran parte del territorio colombiano, dado que este fenómeno no se presenta como una nube puntual, sino como un gran sistema de nubes [Mapes, 1993], no se puede decir con certeza dónde se originó.

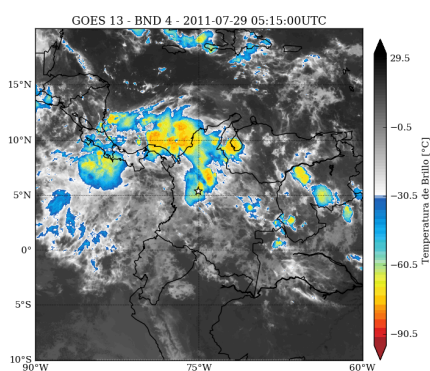


Figura 25: Ejemplo de un sistema convectivo de mesoescala.

En la Figura 26, se muestra el ejemplo de un diagrama de Hovmöller para un evento ocurrido el 10 de octubre de 2013, en el cual se observa claramente en la imagen de la izquierda como el sistema se desplaza a medida que pasa el tiempo de latitudes menores a latitudes mayores, y en la imagen de la derecha su movimiento desde longitudes mayores a longitudes menores, es decir, se infiere que el sistema se mueve desde el sur-oriente hacia el nor-occidente.

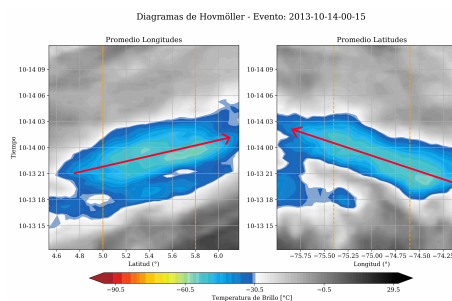


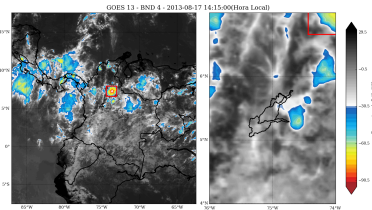
Figura 26: Ejemplo de los diagramas de Hovmöller para un evento ocurrido el 10 de octubre de 2013.

Después de haber descartado que se trate de un sistema convectivo de mesoescala, se procede a comparar las imágenes satelitales, se parte de la imagen en la cual dentro de la cuenca se presente una menor temperatura de brillo, asociada con mayor intensidad y altura de nube, a partir de allí, se compara con la imagen anterior en la serie de datos disponibles (30 minutos antes para GOES-13), se calculan las áreas y los centroides geométrico-físicos (ponderados a partir de los valores de temperatura de brillo) de los sistemas cercanos, con el fin de identificar el núcleo de la nube; seguidamente se elige aquel sistema que cumpla con tener un área similar y cuyo centroide se encuentre más cercano al evento identificado inicialmente. Se repite este proceso hasta que no se encuentre un área lo suficientemente grande, o un centroide lo suficientemente cercano, y allí se considera que se originó la nube o el sistema de precipitación.

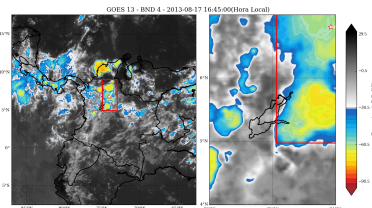
En la Figura 27 se presenta el origen y evolución de un evento presentado el 17 de agosto de 2013, la nube se aproxima desde el nor-oriente de la cuenca y llega a la misma aproximadamente a las 18:15, el recuadro rojo delimita la nube, y la línea blanca indica su trayectoria a lo largo del tiempo.

La Figura 28, presenta la evolución de las trayectorias de parcelas de aire que llegan a 500, 700 y 800 hPa, a partir del análisis de *back trajectories*, desde 24 horas antes del mismo evento de la Figura 27. Donde se evidencia que si bien las trayectorias de 700 y 800 contienen mayor cantidad de humedad, la trayectoria a 500 hPa es más coherente con el movimiento del evento de precipitación mostrado en las imágenes satelitales. Por lo tanto, dicha humedad que ingresa a la cuenca en los niveles bajos de la atmósfera asciende hasta niveles cercanos a 500

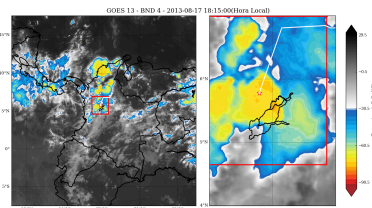
hPa por procesos convectivos, contribuyendo a los eventos de precipitación.



(a) 14:15



(b) 16:45



(c) 18:15

Figura 27: Seguimiento de un evento presentado el 17 de agosto de 2013.

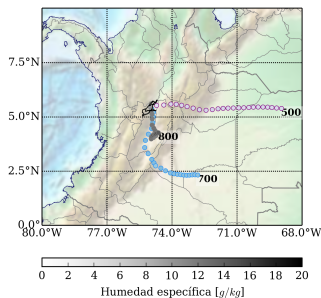


Figura 28: Back trajectories para el evento de precipitación del 17 de agosto de 2013, para niveles de llegada de 500, 700 y 800 hPa.

## 5. Conclusiones

Entender el comportamiento de la precipitación en regiones tan complejas como en cuencas ubicadas en la zona Andina, es un reto particularmente grande, dado que existen varias fuentes de humedad posibles que dan origen a eventos de precipitación significativos, incluyendo la evapotranspiración local, al igual que advección proveniente de fuentes oceánicas (tanto del océano Atlántico como Pacífico) y de cuencas como la del Amazonas, Orinoco, Magdalena, entre otras.

Durante la identificación de eventos representativos de lluvia, para la cuenca La Miel, se evidenció mayor intensidad en los eventos registrados al este y nor-este de las cuencas (estaciones Puente Samaná y Tarro Pintado), mientras las estaciones ubicadas en el costado occidental reflejan menores intensidades. Así mismo, se encontró que los valores más frecuentes de duración de eventos se encuentra entre 2 y 3 horas, mientras las intensidades oscilan entre 2 y 8 mm/hora. Los valores más frecuentes para el Valle de Aburrá son similares, pero la distribución espacial de la precipitación dentro del mismo es mucho más uniforme.

Se obtuvo que la distribución anual de precipitación promedio es bimodal y con picos en los mismos meses para ambos casos de estudio, mientras que a lo largo del día, la distribución varía de un lugar a otro. Mientras en el Valle de Aburrá, el pico máximo de precipitación se presenta entre las 15 y las 16, en La Miel, los valores máximos de precipitación se presentan en las horas de la noche, cerca a las 00:00. Los resultados indican que los procesos físicos encargados de modular las precipitaciones en cada lugar son diferentes, en el Valle de Aburrá, son más importantes los procesos de convección local, que se dan gracias a la radiación solar, inestabilidad atmosférica, y alto contenido de humedad cerca de la superficie en las horas de la tarde, cerca o dentro de la cuenca, generando precipitaciones de alta intensidad y corta duración en las épocas lluviosas. En La Miel, se observa que las mayores precipitaciones se presentan en la noche, y que éstas cumplen con ser eventos de larga duración y baja intensidad, características de los sistemas estratiformes que se forman fuera de la cuenca en las horas de la tarde, y llegan a la misma cerca de las 00:00. A partir de la observación de imágenes satelitales de algunos eventos presentados en La Miel, se da un indicio de la importancia

que tiene la cordillera oriental y los vientos alisios en la formación de nubes que posteriormente se manifiestan como precipitación en la cuenca de interés.

Por otro lado, la caracterización de precipitación y variación mensual de las BT, permite inferir que la interacción de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y corrientes oceánicas de bajo nivel en el Pacífico, en los meses de Octubre y Noviembre, son los principales moduladores del ingreso de humedad por la costa Pacífica y Atlántica del país. Para los meses de enero, febrero y marzo, se tiene poca participación del océano Pacífico, y la mayor influencia se da por el Atlántico del país. Por otro lado, en los meses de abril y mayo, se tiene menor participación del océano Pacífico, y la mayor influencia se da por parte de los vientos alisios, al igual que en los meses de junio, julio y agosto. Esto se cumple para ambas zonas de estudio.

Se obtuvo que para niveles de presión cercanos a la superficie, para ambas zonas de estudio, la circulación se da preferentemente entre las cordilleras dentro de las que se encuentran ubicadas las cuencas de interés. En la cuenca de La Miel, se presenta ingreso preferente de las trayectorias por la zona del Caribe Colombiano, y en menor medida, por el sur de la cuenca, desde la parte alta de la cordillera oriental, y el Huila. Para el caso de la cuenca del Valle de Aburrá, las zonas mencionadas también tienen importancia, pero además, se presenta ingreso de parcelas de aire desde el Pacífico Colombiano. En la media tropósfera (500 hPa), para la cuenca de La Miel, la mayor densidad de retrotrayectorias se da al oriente de la cuenca, dando muestra de la influencia de los vientos alisios. Para el caso del Valle de Aburrá, no existe una circulación preferente de parcelas de aire.

En el análisis en el cual se excluyen las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca, se observa en los niveles bajos de la atmósfera (850 hPa), para el caso de La Miel, las regiones del Caribe, el Atlántico Norte, y el Pacífico Tropical, aportan humedad a las trayectorias que llegarán a la cuenca posteriormente, mientras que para el Valle de Aburrá, se observa cómo la mayor cantidad de humedad la aporta el Pacífico Tropical, con menor participación del Mar Caribe. En la media tropósfera, se puede observar cómo se presenta un comportamiento con tendencia a la pérdida de humedad de las trayectorias, tanto al oriente como al occidente de las cuencas del Magdalena y el Cauca. Para la cuenca de La Miel,

se obtuvo que a 800 hPa, la cuenca del Mar Caribe es la que más humedad aporta (60 %), seguida del Pacífico Tropical y el Atlántico Norte. En el caso del Valle de Aburrá, el aporte del Pacífico Tropical es mucho mayor (65 % entre TSP y TNP), mientras que el Mar Caribe aporta aproximadamente el 28 %. Se debe tener en cuenta que no necesariamente ésta humedad se descarga sobre la cuenca en estudio, ya que dentro de los valles del Magdalena y el Cauca, ocurren procesos que pueden descargar humedad de las parcelas de aire que posteriormente llegarán a la misma

En el análisis local, se identifican varias zonas de humidificación en las trayectorias, en ambos casos de estudio, la parte alta del valle del Magdalena, y las regiones del Huila y el Caquetá aportan humedad desde el sur de las cuencas, y la región de Santander (cuenca del río Sogamoso y zonas aledañas) aporta humedad desde el oriente. Para el Valle de Aburrá, también se identifica como zona importante de carga el Pacífico Tropical, ya que resalta incluso teniendo en cuenta los procesos que ocurren dentro de las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca. Se observa además, que éstas zonas de humidificación son variables a lo largo del año, para La Miel, en los trimestres MAM y SON, las regiones que más aportan son las ubicadas al sur de la cuenca, en DEF, cobra importancia el norte (Bajo Magdalena) y oriente de la misma, en SON, el aporte de humedad es mayor desde el norte, pero se observa humidificación significativa en las trayectorias desde todas las zonas mencionadas anteriormente. Para el Valle de Aburrá, se observan aportes de humedad mayores en MAM, principalmente provenientes de la costa Pacífica Colombiana, la ladera oriental del valle del Magdalena, y las regiones del Huila y el Caquetá, al sur del país, en JJA, el panorama es similar que en MAM, pero el aporte de humedad en las regiones es ligeramente menor, en DEF, no se observa una fuente clara de humedad para las parcelas de aire que ingresan a la cuenca, mientras que en SON, se presentan aportes principalmente del Pacífico Tropical, el Bajo Magdalena, y la región cercana a la cuenca de Sogamoso (Santander).

Para el caso de Miel, las trayectorias que ingresan por el sur de la cuenca tienen origen en la Amazonía o el Atlántico tropical sur, y por lo general ascienden por la cordillera oriental e ingresan al valle del Magdalena. El efecto orográfico de las cordilleras pierde importancia en las trayectorias a niveles de llegada superiores a los 700 hPa y la orientación

preferente de circulación, se ve principalmente controlada por los vientos alisios.

Como fuentes de humedad, es necesario mencionar que el aporte desde regiones oceánicas tanto del Pacífico como del Atlántico tropical, y de regiones continentales como las cuencas del Amazonas y Orinoco, son fundamentales para la dinámica de la cuenca del Magdalena-Cauca [Arias et al., 2015, Hoyos et al., 2017]. Para las cuencas de interés de este estudio, se identificó al Mar Caribe y al sur de las costas pacíficas del país como principales fuentes de humedad oceánica y a la propia cuenca del Magdalena-Cauca como modulador de la cantidad de humedad que finalmente contribuye a los eventos de precipitación en La Miel y el Valle de Aburrá.

El uso y análisis de las imágenes satelitales muestra que dependiendo de la época del año, la intensidad de los vientos alisios, las corrientes que se presentan a niveles bajos sobre la cuenca del Magdalena y las corrientes de viento provenientes tanto del océano pacífico el comportamiento y origen de los sistemas de nubes y por consiguiente de precipitación es muy variable. Los eventos de precipitación que se presentan en la cuenca pueden ser producto del efecto orográfico generador de lluvia a causa del ascenso de humedad producido tanto en la cordillera oriental (procesos más frecuentes para la cuenca de La Miel) como en la central, dinámicas de cambio en las condiciones de parcelas de aire presentes dentro de cada cuenca, que resultan en eventos localizados y de pequeña extensión dentro de la cuenca (éstos son más frecuentes en el caso del Valle de Aburrá). Por otro lado están los sistemas convectivos de mesoescala, que se presentan cuando hay gran oferta de aire húmedo en los niveles bajos de la atmósfera a escala regional, que al ser elevado a causa del calentamiento localizado en algunas zonas genera pulsos de gravedad al rededor de la misma [Mapes, 1993], haciendo que se formen sistemas de nubes estratificadas de gran extensión que afectan no solo la cuenca sino gran parte del país, estos no dependen de dinámicas atmosféricas locales sino que son características de la zona tropical.

Con el fin de comprender aún mejor los procesos formadores de precipitación en las regiones de estudio, se debe realizar un análisis más robusto de las imágenes satelitales, que permita identificar el origen de los sistemas de nubes que afectan las cuencas, se propone aplicar el algoritmo desarrollado en la sección 4.3 a una cantidad de eventos que permita sacar conclusiones estadísticas

robustas, con el fin de estudiar la variabilidad de formación de sistemas de precipitación.

## REFERENCIAS

- Paola A Arias, J Alejandro Martínez, and Sara C Vieira. Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern south america. *Climate dynamics*, 45(9-10):2861–2884, 2015.
- Danica Ciric, Milica Stojanovic, Anita Drumond, Raquel Nieto, and Luis Gimeno. Tracking the origin of moisture over the danube river basin using a lagrangian approach. *Atmosphere*, 7(12): 162, 2016.
- LA Cuartas and Germán Poveda. Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en colombia según el reanálisis ncep/ncar. *Meteor. Colombiana*, 5:49–57, 2002.
- Paul A Dirmeyer and Kaye L Brubaker. Characterization of the global hydrologic cycle from a back-trajectory analysis of atmospheric water vapor. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1): 20–37, 2007.
- A Drumond, J Marengo, Tercio Ambrizzi, R Nieto, L Moreira, L Gimeno, et al. The role of the amazon basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: a lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18:2577–2598, 2014.
- Anita Drumond, Raquel Nieto, Luis Gimeno, and Tercio Ambrizzi. A lagrangian identification of major sources of moisture over central brazil and la plata basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D14), 2008.
- Luis Gimeno, Andreas Stohl, Ricardo M Trigo, Francina Dominguez, Kei Yoshimura, Lisan Yu, Anita Drumond, Ana María Durán-Quesada, and Raquel Nieto. Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation. *Reviews of Geophysics*, 50 (4), 2012.
- David M Hondula, Luke Sitka, Robert E Davis, David B Knight, Stephen D Gawtry, Michael L Deaton, Temple R Lee, Caroline P Normile, and Philip J Stenger. A back-trajectory and air mass climatology for the northern shenandoah valley,



## Referencias

---

- usa. *International Journal of Climatology*, 30(4): 569–581, 2010.
- I Hoyos, F Dominguez, J Cañón-Barriga, JA Martínez, R Nieto, L Gimeno, and PA Dirmeyer. Moisture origin and transport processes in colombia, northern south america. *Climate Dynamics*, pages 1–20, 2017.
- Yongjie Huang and Xiaopeng Cui. Moisture sources of an extreme precipitation event in sichuan, china, based on the lagrangian method. *Atmospheric Science Letters*, 16(2):177–183, 2015.
- Brian E Mapes. Gregarious tropical convection. *Journal of the atmospheric sciences*, 50(13):2026–2037, 1993.
- Germán Poveda. La hidroclimatología de colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107): 201–222, 2004.
- Roderick A Scofield and Robert J Kuligowski. Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events. *Weather and Forecasting*, 18(6):1037–1051, 2003.
- Milica Stojanovic, Anita Drumond, Raquel Nieto, and Luis Gimeno. Moisture transport anomalies over the danube river basin during two drought events: A lagrangian analysis. *Atmosphere*, 8(10): 193, 2017.
- Ellen Viste and Asgeir Sorteberg. Moisture transport into the ethiopian highlands. *International journal of climatology*, 33(1):249–263, 2013.

Anexos

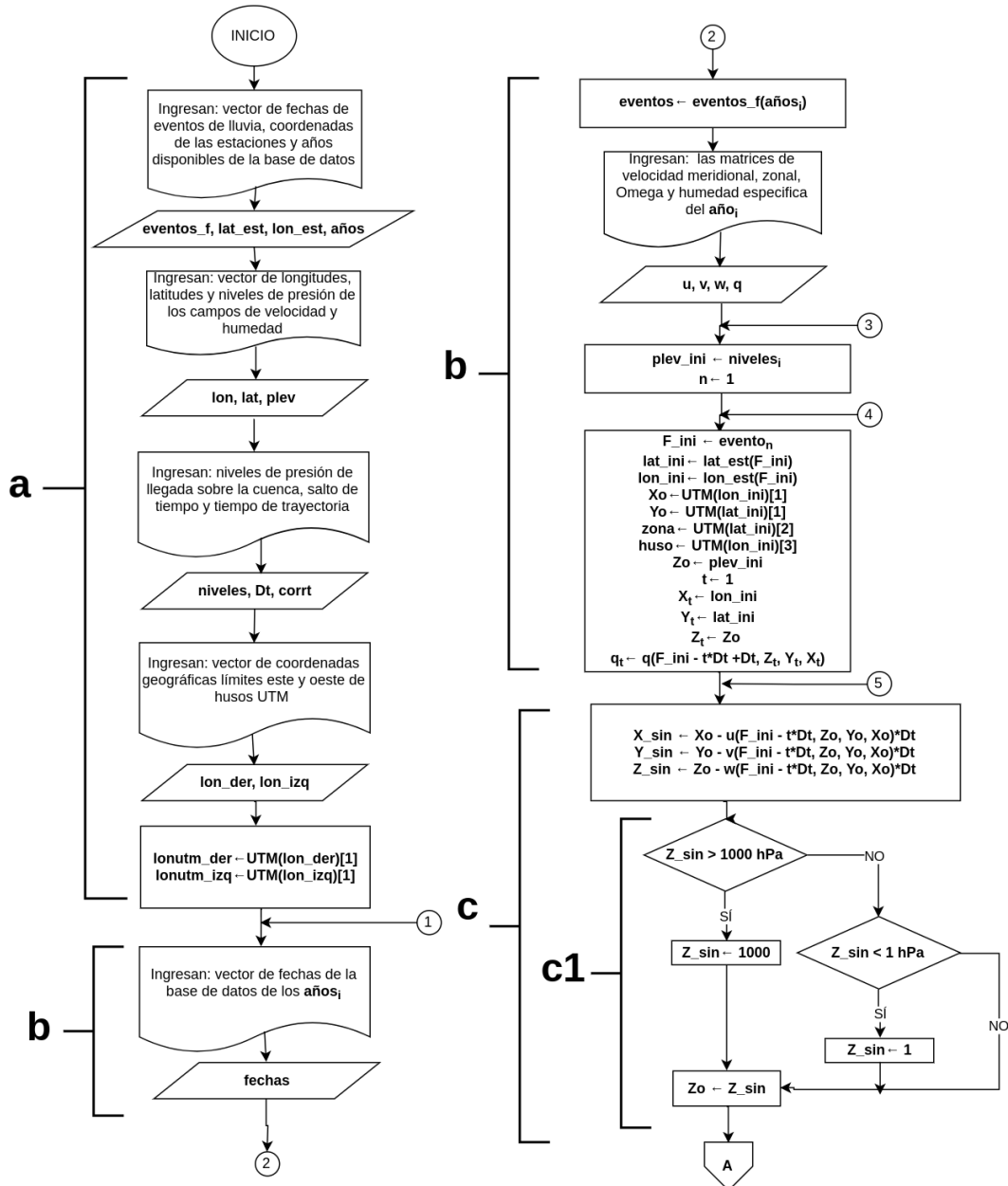


Figura 29: Parte 1 de 2 del diagrama de flujo para construir las back trajectories de todos los eventos representativos de precipitación sobre las cuencas de estudio.

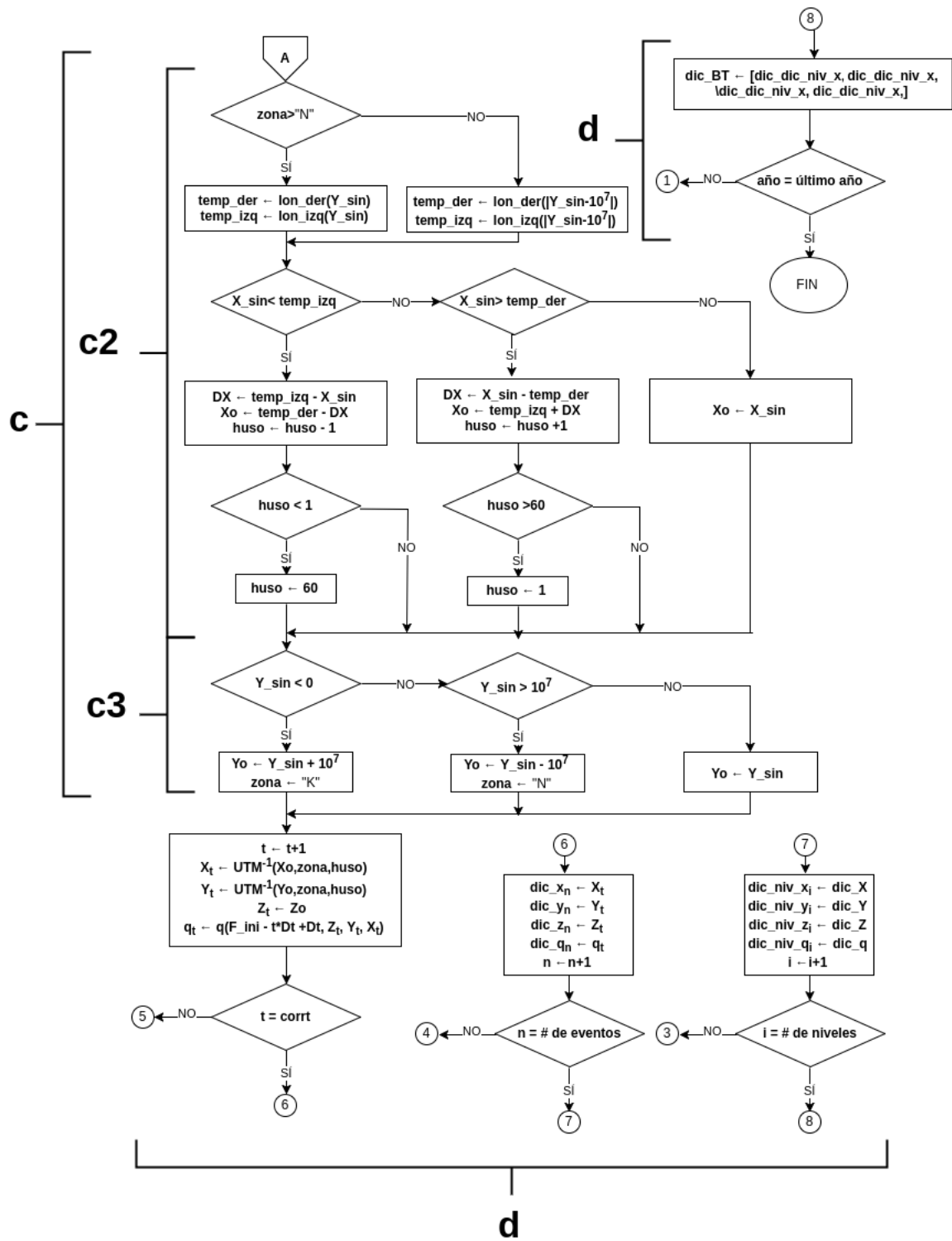


Figura 30: Parte 2 de 2 del diagrama de flujo para construir las back trajectories de todos los eventos representativos de precipitación sobre las cuencas de estudio.

Ciclo Anual de Trayectorias de Humedad - 850 hPa - Valle de Aburrá

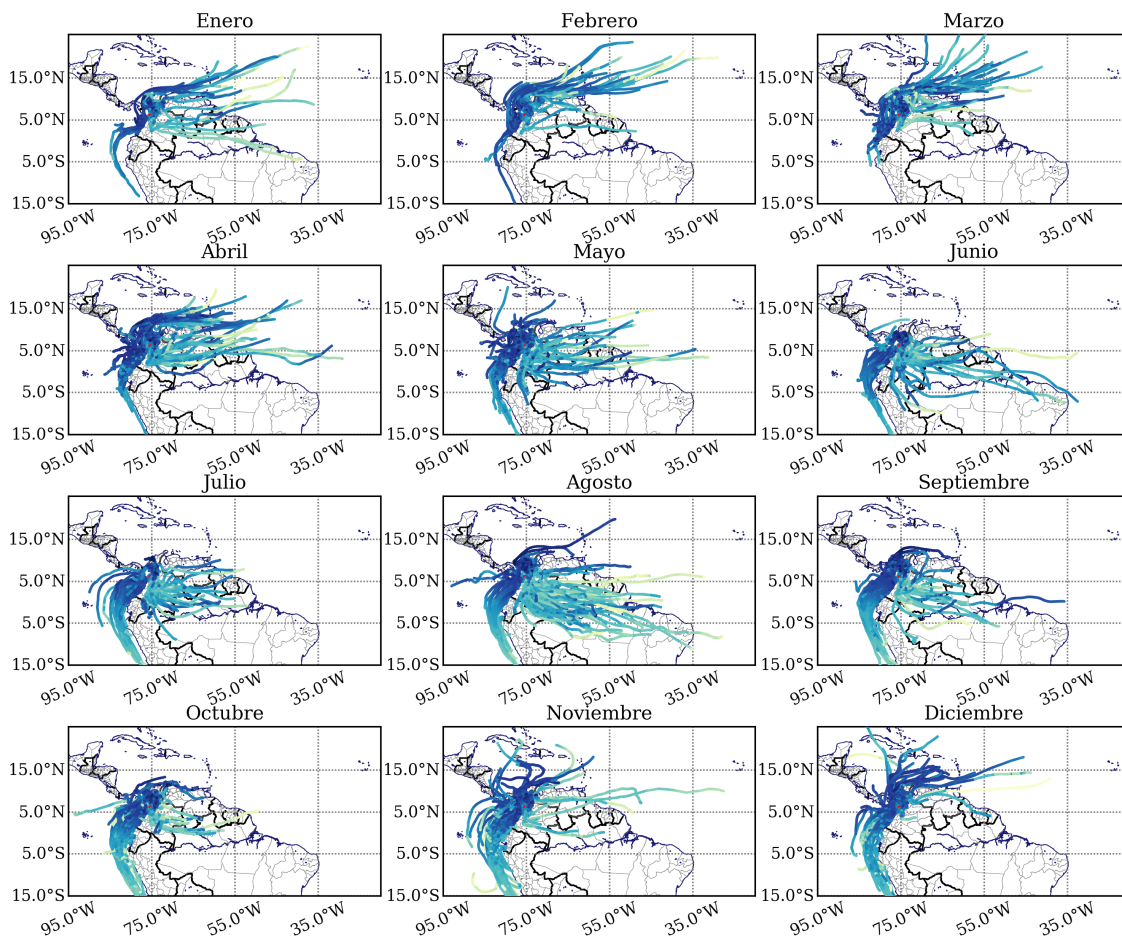


Figura 31: Ciclo anual de Back Trajectories de la cuenca del Valle de Aburrá para nivel de llegada de 850 hPa.

Ciclo Anual de Trayectorias de Humedad - 500 hPa - Valle de Aburrá

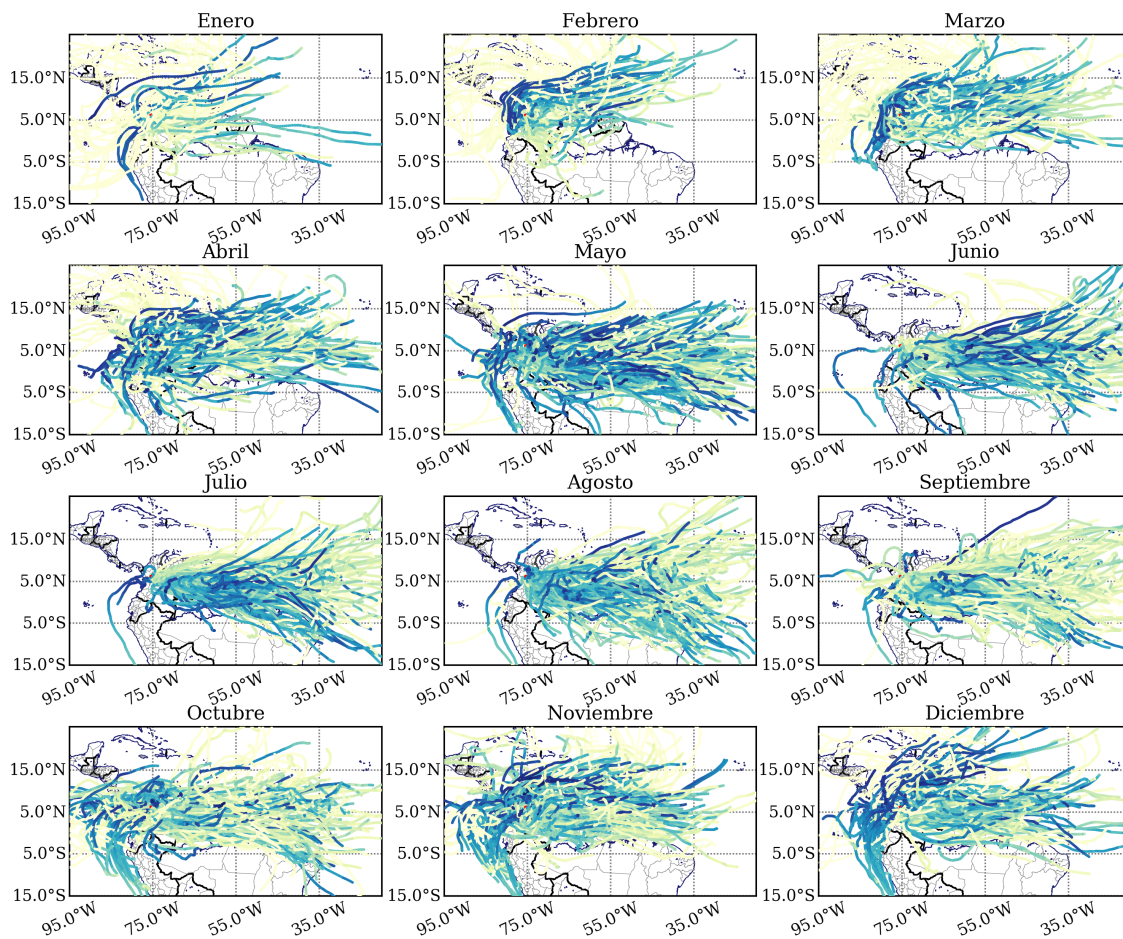


Figura 32: Ciclo anual de Back Trajectories de la cuenca del Valle de Aburrá para nivel de llegada de 500 hPa.