

REGIONALIZACIÓN DE COLOMBIA SEGÚN LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL, A TRAVÉS ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

Guzmán D.; Ruíz, J. F.; Cadena M.

Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático

Subdirección de Meteorología – IDEAM

(2014)

RESUMEN

El propósito de este trabajo es regionalizar a Colombia en zonas homogéneas respecto al régimen de lluvias según la estacionalidad. Para realizar la división deseada, se caracterizó cada estación por su ciclo anual y su carácter regional por agrupación mediante análisis por componentes principales (ACP). El área de aplicación abarca todo el territorio colombiano, con series de datos mensuales, de la variable precipitación (mm), que corresponde al periodo de 1971-2010 de 408 estaciones. En este trabajo se presentan los resultados alcanzados por la aplicación de ACP en la identificación de las diecisiete regiones homogéneas y sus subregiones, las cuales concuerdan con el régimen de precipitación en Colombia. Se describen los principales procesos sinópticos que generan las precipitaciones en Colombia, y como éstos explican el régimen característico de cada región.

PALABRAS CLAVES: Precipitación, Regionalizar, Análisis de Componentes Principales.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to regionalize Colombia in regard homogeneous areas according to rainfall seasonality. To perform the desired division, each station is marked by its annual cycle, and its proper regime was analyzed by component analysis (PC). The application area covers the entire Colombian territory, with precipitation time series from 1971 to 2010 for 408 stations. The results achieved by the implementation of PC identify seventeen homogeneous regions and sub regions, which are consistent with the Colombian precipitation's regime. The main synoptic processes that generate rainfall in Colombia are described, and how they explain the regime of each region.

KEYS: Precipitation, Regionalize, Principal component analysis.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
PALABRAS CLAVES:	1
ABSTRACT	1
KEYS:	1
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
2.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	7
2.2 DATOS Y MATERIALES UTILIZADOS	7
2.3 METODOLOGÍA.....	8
2.3.1 Complementación de Datos.....	8
2.3.2 Caracterización Climática.	8
2.3.3 Análisis de componentes principales (ACP).....	8
2.3.4 Delimitación de las zonas por caracterización climática y ACP.....	11
3. ANALISIS DE RESULTADOS.....	13
3.1 PROCESOS GENERADORES DE PRECIPITACION EN COLOMBIA.....	15
3.1.1 Zona de convergencia intertropical	15
3.1. 2 Sistemas de alta presión.....	17
3.1.3 Ondas del este del caribe	21
3.1.4 Vaguadas de latitudes medias	21
3.1.5 Características de mesoescala	21
3.1.6 Ciclones tropicales.....	22
3.1.7. Vaguada tropical de la alta tropósfera – (tutt).....	22
3.1.8 La Zona de convergencia del atlántico sur - zcas	22
3.1.9 Baja anclada de panáma	22
3.1.10 Corrientes en chorro	23
3.1.11 Frentes fríos.....	23
3.2 DESCRIPCIÓN TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES PARA CADA REGIÓN POR ESTACIONALIDAD	24
3.2.1 Región Caribe (1)	26
3.2.3 Sinú San Jorge –Nechi (3).....	28
3.2.4 Urabá (4)	29
3.2.5 Pacífico Norte y Centro (5).....	30
3.2.6 Costa Pacífica (6)	31

3.2.7 Cuenca Alto Patía (7).....	32
3.2.8 Pacifico Sur (8)	32
3.2.9 Sur del Huila y Putumayo (9)	33
3.2.10 Cuenca Del Alto Cauca – Montaña Nariñense, Alto Patía y Alto magdalena (10).....	34
3.2.11 Medio Cauca y Alto Nechi (11).....	37
3.2.12 Cuenca del Catatumbo (13).....	38
3.2.14 Piedemonte Llanero (14).....	39
3.2.15 Piedemonte Amazónico (15).....	40
3.2.16 Cuenca del rio Arauca (16)	41
3.2.17 Amazonia (17)	41
4. CONCLUSIONES	43
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	52
ANEXO 1	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución espacial de las estaciones de precipitación empleadas en este estudio.....	7
Figura 2. Ejemplo de corte para la regionalización estacional (Región 1).	9
Figura 3. Resultado de ACP para la región 1 con dos factores.	10
Figura 4. Descripción de herramientas usadas para la delimitación por polígonos.	12
Figura 5. Polígonos de las regiones según la precipitación por estacionalidad.	14
Figura 6. Posición media mensual de la ZCIT en Colombia.....	17
Figura 7. Anticiclones del Pacifico y del Atlántico.....	19
Figura 8. Posición de la Alta de Bolivia.	20
Figura 9. Regiones según la precipitación por estacionalidad y sus histogramas.	25
Figura 10. Régimen de precipitación para la estación Fundación.	26
Figura 11. Subdivisiones por ACP, para la región 1.....	27
Figura 12. Régimen de precipitación para la estación San Lorenzo.....	28
Figura 13. Régimen de precipitación para la estación Sincelejo.	28
Figura 14. Régimen de precipitación para la estación Acandí.....	29
Figura 15. Régimen de precipitación para la estación Quibdó.	31
Figura 16. Régimen de precipitación para la estación Bahía Solano.....	31
Figura 17. Régimen de precipitación puerto López de Micay.....	32
Figura 18. Régimen de precipitación para la estación Tumaco.....	33

Figura 19. Régimen de precipitación para la estación Parque Arqueológico.....	34
Figura 20. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Alfonso Bonilla.....	35
Figura 21. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Benito Salas.	36
Figura 22. Subdivisiones mediante ACP, para la región 10.	36
Figura 23. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Olaya herrera.....	37
Figura 24. Régimen de precipitación para la estación Llano de Palmas.	38
Figura 25. Régimen de precipitación para la estación Gramalote.	38
Figura 26. Régimen de precipitación para la estación La pradera.....	39
Figura 27. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Gustavo Artunduaga. .	40
Figura 28. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Puerto Carreño.	41
Figura 29. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Vázquez Cobo.	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Procesos principales generadores de la precipitación en Colombia.	15
---	----

1. INTRODUCCIÓN

Colombia está situada en el trópico del continente Americano, “como una isla entre tres cuencas de agua” (Snow, 1976), si se piensa que además del Caribe y del Pacífico, Colombia recibe la influencia de la circulación atmosférica de la cuenca Amazónica. La presencia de la barrera orográfica que constituyen los tres ramales de la cordillera de los Andes, induce la formación de climas locales y regionales de alta complejidad y dificultad de predicción a distintas escalas de tiempo (Poveda, 2004).

Dada la gran variabilidad estacional en Colombia, el comportamiento de la precipitación es muy variable. En particular, la clasificación de las estaciones pluviométricas de Colombia en grupos homogéneos, según su ciclo anual, conduce a la obtención de una regionalización del país según el régimen de lluvias. Esta regionalización puede ser útil en la búsqueda de relaciones con agentes físicos externos, al momento de ajustar pronósticos, y múltiples aplicaciones meteorológicas e hidrológicas (Terra & Pisciotano, 1994).

Entre los trabajos que utilizan alguna herramienta de regionalización del área de estudio, pueden mencionarse el de Hurtado (2000), quien realizó una zonificación (24 regiones) de acuerdo a la homogeneidad fisiográfica y el estudio descriptivo de los factores generadores de la precipitación, el régimen de lluvias por regiones naturales, tratando de deducir algunos regímenes representativos. Casas (2005), empleó indicadores del tipo estadístico, como al análisis de la variación de la lluvia mes a mes, el ciclo anual de la lluvia, presencia de máximos y periodos en los que éstos ocurren y la combinación de estos, sumado a la integración del componente geográfico, resultando así, diecinueve regiones.

Con el fin de lograr regiones con similar variabilidad temporal se exploró el método de agrupamiento por análisis de componentes, previa caracterización de los regímenes de lluvia. Entre las variables meteorológicas posibles, el método de análisis por componentes principales (ACP) se ha utilizado en otros países como: México, Uruguay, Argentina, Ecuador entre otros, principalmente en la precipitación (Bettolli et. al., 2009, Cedeño & Cornejo, 2009, Comrie and Glenn, 1998; Englehart and Douglas, 2002; Gong y Richman, 1992, Terra & Pisciotano, 1994) y la temperatura (Englehart and Douglas, 2004, Salas-Flores et. al., 2011).

Existen pocos estudios en los que se aplique el método de ACP al clima de Colombia, este método se ha utilizado a pequeña escala por Carvajal & Marco (2002), quienes realizaron una clasificación de las estaciones del departamento del Valle del Cauca, aplicando el método de Cluster jerarquizado y los resultados se comprobaron aplicando los métodos estadísticos de Dalrymple (1960) y Wiltshire (1987) y análisis discriminante de las componentes principales, tomando las 10 primeras componentes (Jhonson, 2000).

De esta manera, esta metodología se utilizó, no solo como una herramienta de reducción de datos, sino también como una alternativa para el análisis de grupos. En un ACP, los factores de peso de las componentes se graficaron para mostrar los patrones espaciales característicos de la variable precipitación. La división espacial de un conjunto de estaciones en grupos sustancialmente homogéneos con respecto a un campo físico, facilita estudios posteriores de variabilidad en el tiempo o de correlación con alguna otra variable externa. Mediante este método, el territorio nacional a escala anual, muestra diecisiete regiones principales, y se encontró que el régimen (bimodal) está presente en la mayoría de las regiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

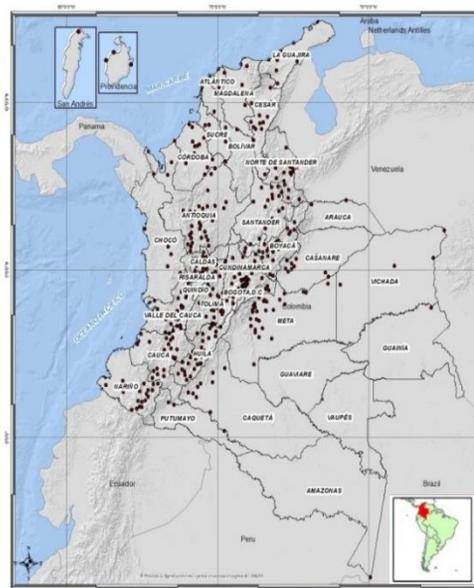
2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Colombia está localizada entre las coordenadas $12^{\circ} 30' 46''$ N y $4^{\circ} 13' 30''$ S y $66^{\circ} 50' 54''$ W y $79^{\circ} 01' 23''$ W (Fig.1), limita al este con Venezuela y Brasil, al sur con Ecuador y Perú, al norte con el mar Caribe, al noroeste con Panamá, y por el oeste con el Océano Pacífico. Geológicamente, Colombia hace parte del Cinturón de Fuego del Pacífico. El territorio nacional se encuentra dividida en 5 regiones naturales, Caribe, Pacífico, Andina, Orinoquía y Amazonía, adicionalmente la parte insular perteneciente a las islas de San Andrés y Providencia (Ruíz et al., 2012).

2.2 DATOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Se utilizaron datos mensuales de precipitación procedentes de un total de 408 estaciones, cuyo criterio de selección fue su distribución en las cinco regiones naturales de Colombia, tomando aquellas que contenían el mayor número de datos para series dentro del periodo de 1971-2010, información suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La ubicación geográfica de las estaciones seleccionadas se muestra en la Figura 1, se consideró que la cobertura espacial de estas estaciones resultó satisfactoria para el tipo de análisis que se buscó realizar. Sin embargo, hubo regiones que presentaron zonas con cobertura espacial escasa, como es el caso de las regiones, de la Orinoquía y la Amazonia. A pesar de la escasez de datos en estas regiones, se planteó obtener una regionalización que consideró todo el país.

Figura 1. Distribución espacial de las estaciones de precipitación empleadas en este estudio.



2.3 METODOLOGÍA

Para la regionalización según la estacionalidad de la precipitación, se utilizó el análisis de componentes principales, mediante una rotación ortogonal de los ejes factoriales por el método del varimax; se usaron criterios de corte que permitieron tomar aquellos factores que explicaron mejor la varianza y a partir del criterio del máximo factor de peso se encontró los diferentes grupos de estaciones que variaran coherentemente a través del tiempo.

2.3.1 Complementación de Datos. Dada la necesidad de encontrar regiones homogéneas y acordes a la climatología de Colombia, se hizo necesario trabajar con series climatológicas que cumplieran criterios básicos de homogeneidad y que abarquen el máximo intervalo temporal posible. Para ello, se trabajó con series tratadas mediante métodos de complementación, según la metodología (Ruíz et al., 2012) que consistió en el uso de algoritmos como el de la razón de valores normal y Arima, cuyo proceso fue validado con el test de McQueen para datos de precipitación.

2.3.2 Caracterización Climática. Para realizar la agrupación de los datos, se tuvo en cuenta la estacionalidad anual de las series climatológicas, donde se identificaron las series que presentaban un comportamiento climático homogéneo, y que correspondían con la ubicación geográfica.

2.3.3 Análisis de Componentes Principales (ACP). A través del ACP se puede simplificar la información original, a partir de la representación de los mismos objetos en un menor número de variables, las cuales van a retener la mayoría de la información del espacio original. De este modo se minimiza cualquier pérdida de información, posibilitando un mejor entendimiento e interpretación de las estructuras de los datos (Bettolini et al., 2009). Esta metodología permite el agrupamiento de estaciones con variaciones temporales similares en la escala temporal para la precipitación. Las principales características del ACP pueden encontrarse en forma más extensa y con sus respectivas formulaciones matemáticas en Green (1978), Jolliffe (1986) y Richman (1986). Se consideraron criterios importantes, para mejorar los resultados, según los siguientes aspectos.

I. Distribución Espacial De Los Datos

Errores potenciales pueden surgir al utilizar una base de datos cuya distribución espacial no sea homogénea al realizar un ACP. Esta distribución irregular de datos influencia los factores de peso, haciendo que los mismos reflejen la varianza de las áreas con mayor densidad de puntos (Karl et al., 1982). Para este trabajo se optó por eliminar las estaciones que aportaran información redundante, de forma tal de obtener una distribución espacial de estaciones más homogénea.

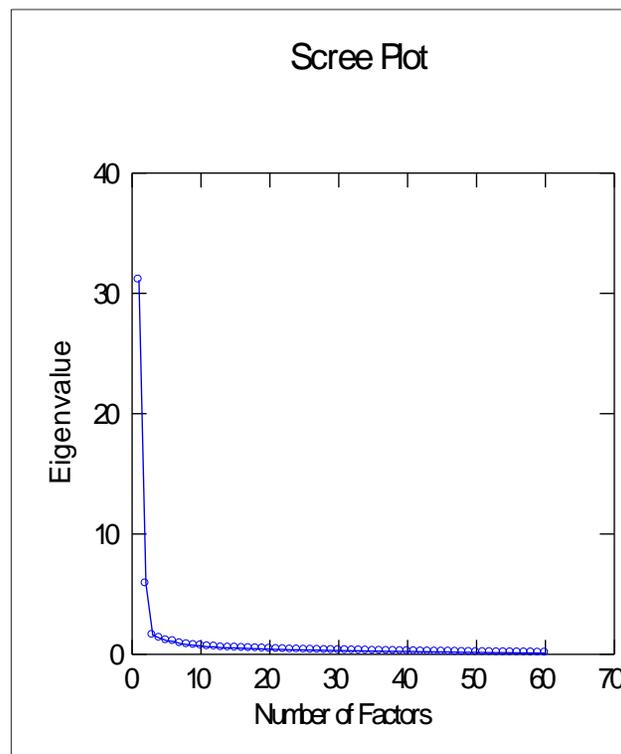
II. Rotación de las componentes principales.

Cuando el principal objetivo del ACP es la interpretación física en vez de la reducción de variables, es conveniente rotar una sub-muestra de los autovectores obtenidos inicialmente en un nuevo conjunto de vectores, a fin de mejorar la interpretación de los resultados. En este trabajo se evaluó la rotación Varimax (Kaiser 1958), la cual fue utilizada para transformar los vectores asociados al ACP en una estructura simple. En el caso de existir una estructura simple, ésta se manifiesta con componentes con mayores valores de factores de peso en algunas variables y factores de peso casi nulos en el resto.

III. Criterios de corte

En este trabajo se analizaron conjuntamente los resultados de ciertos criterios, mediante el software systat, a fin de separar las componentes con señales más claras. El criterio de Kaiser (1958) propone retener las CP cuyos autovalores sean mayores que 1, lo cual sugiere la retención de aquellas componentes que expliquen una fracción de varianza mayor que la explicada por cada variable original (ver Figura 2). Por último se estableció un corte en un determinado valor de porcentaje de varianza total a fin de poder separar las estructuras que aporten solo ruido.

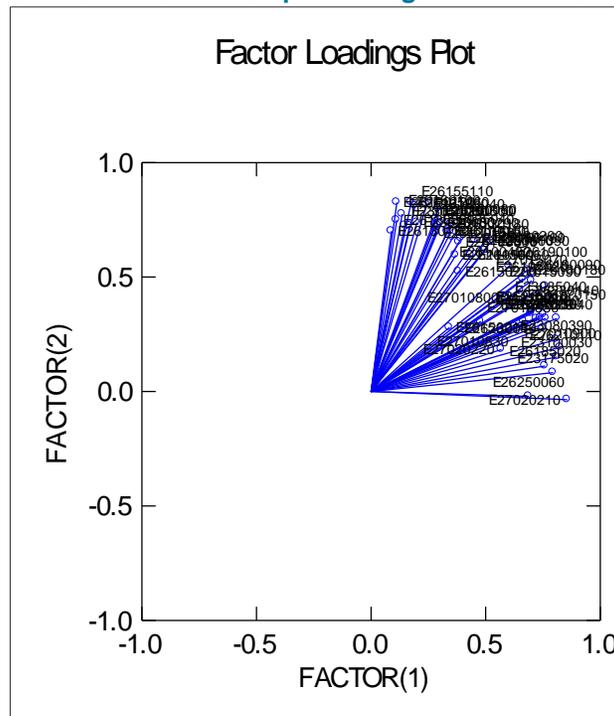
Figura 2. Ejemplo de corte para la regionalización estacional (Región 1).



IV. Determinación de las regiones homogéneas.

Una vez se analizaron los criterios de corte, se trabajó con los factores más representativos, y a partir de ellos se tomaron las estaciones según el coeficiente de significación, usando solo aquellas que cumplieran una correlación mayor a 0.6 y además formaran un conjunto de más de seis estaciones (Richman & Lamb, 1985), como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Resultado de ACP para la región 1 con dos factores.



V. Determinación de las regiones homogéneas.

Una vez rotadas y graficados los factores de peso de cada una de las componentes principales retenidas, resta determinar un criterio que permita decidir que regiones resultan significativas. Estas regiones se obtuvieron en base de un criterio Richman & Lamb, (1985), mencionada anteriormente, para el cual se consideró apropiado tomar como umbral el factor de peso de $r = |0.6|$, donde se encontraron casos para los cuales, estaciones quedaron sin clasificación por no llegar al valor de coeficiente elegido.

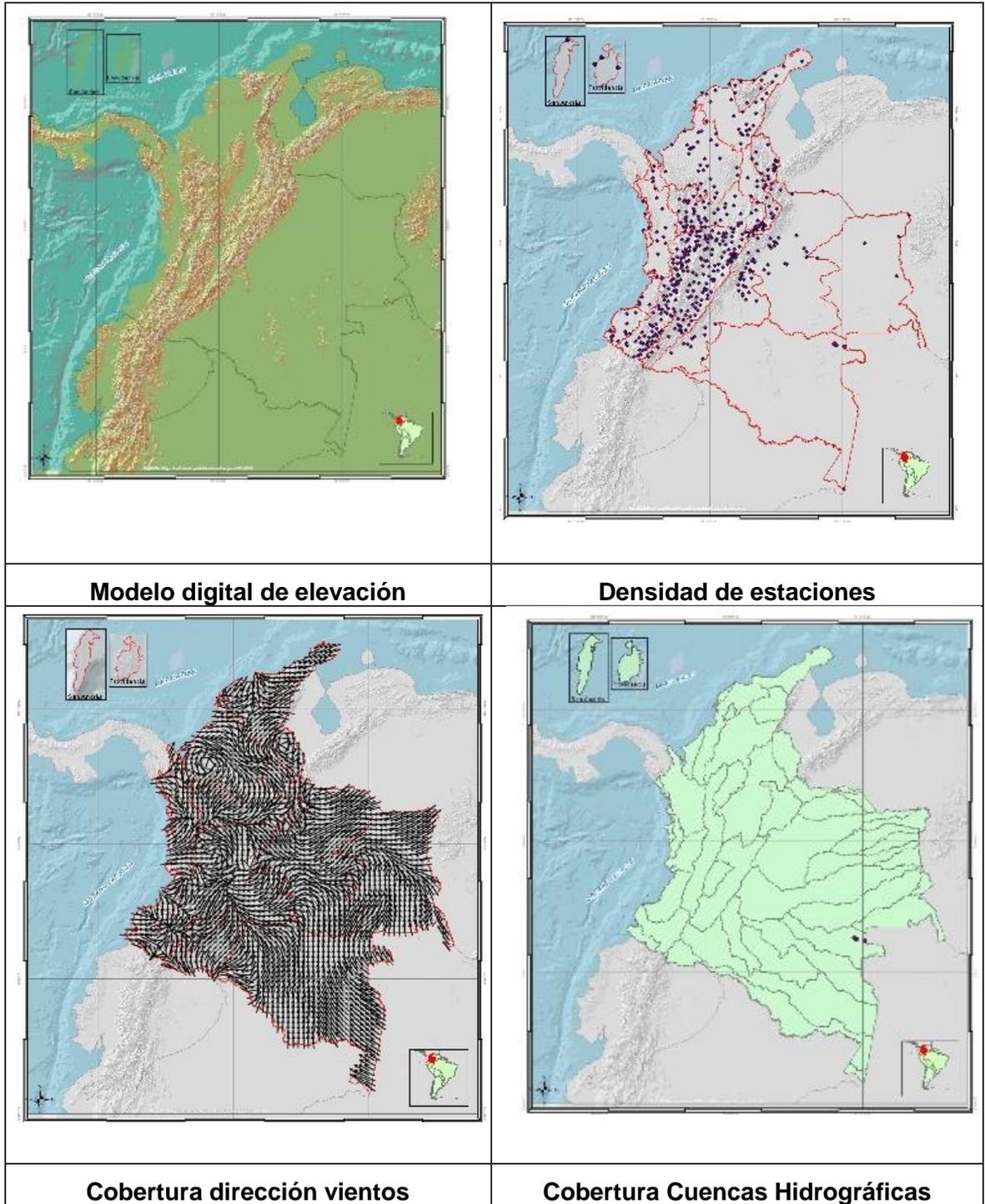
Sin embargo, estaciones presentaban intersecciones entre los factores elegidos, para lo cual, se utilizó el criterio del máximo factor de peso para poder llevar a cabo esta separación.

2.3.4 Delimitación de Las Zonas por Caracterización Climática Y ACP. La información se espacializó en ArcGis para establecer el límite de cada una de las zonas y delimitarlas mediante polígonos. Para ello fue necesario incluir un número mayor de estaciones, para un total de 520 que permitió determinar el área de influencia para cada clasificación.

Usando un Modelo Digital de Elevación (cuyos datos almacenados definen valores de altitud), se representó la topografía de Colombia, característica de importancia fundamental en la regulación de las lluvias en el país, de forma directa o indirecta. Estos modelos son simbólicos ya que establecen relaciones de correspondencia con el objeto real, mediante algoritmos matemáticos que son tratados por programas de Sistemas de Información Geográfica, (Rosas, 2009)

Sin embargo, en ciertas zonas de Colombia la cobertura de estaciones no es amplia y la poca densidad de las mismas no permitía tener un criterio delimitante. Dado lo anterior, fue necesario traer la cobertura de zonas hidrográficas y la dirección anual media de los vientos observando el recurvamiento de los mismos, para delimitar cada una de las zonas encontradas. (Ver Figura 4)

Figura 4. Descripción de herramientas usadas para la delimitación por polígonos.



3. ANALISIS DE RESULTADOS

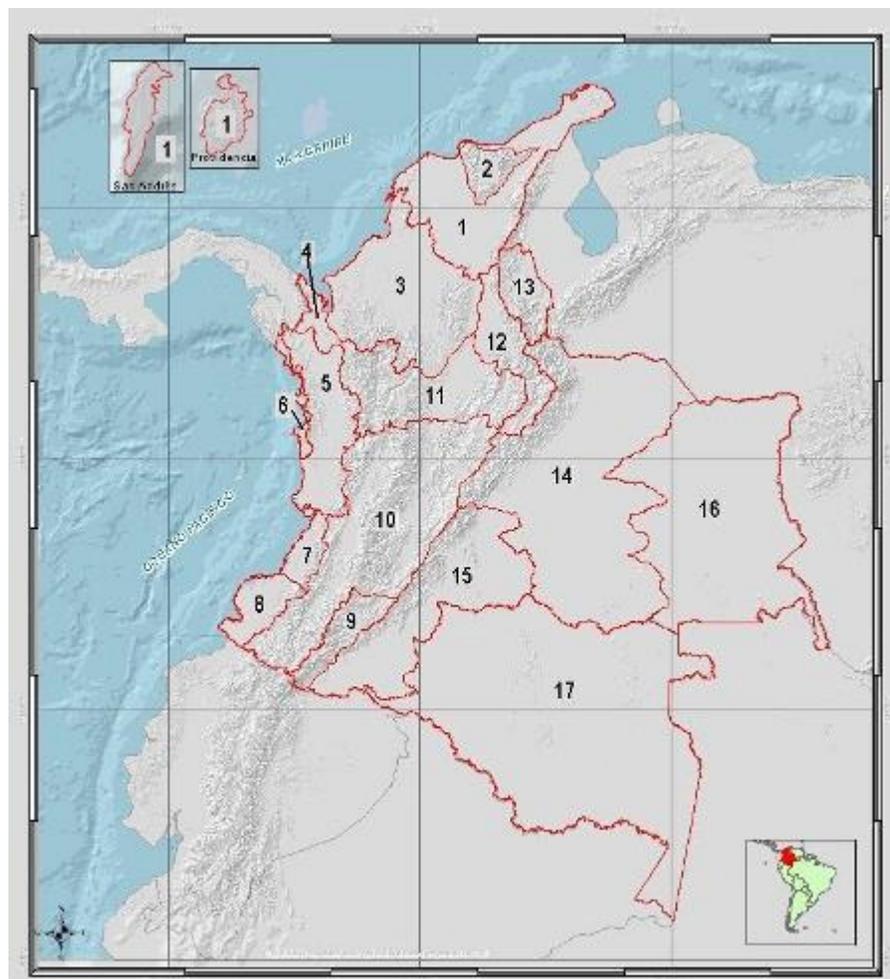
Las diecisiete regiones halladas a partir de la caracterización climática, se muestra en la Figura 5; agrupación que presentó concordancia con la precipitación de Colombia, y en su gran mayoría indicó un régimen tipo bimodal; además de mostrar correspondencia geográfica. A partir del análisis de componentes principales, se corroboró que la agrupación realizada presentó homogeneidad de los datos, dado que en general las agrupaciones presentaron señales muy claras para sólo pocos componentes en gran parte de las regiones encontradas.

Mediante el método de ACP, se obtuvieron subdivisiones respecto a las diecisiete regiones inicialmente planteadas, encontrando diferencias en volúmenes de precipitación específicamente para la región denominada Caribe (Figura 11) y la región de Cuenca Del Alto Cauca – Montaña Nariñense, Alto Patía y Alto Magdalena (Figura 22), diferencias que serán presentadas en la caracterización de las respectivas regiones. Estas zonas, pueden responder a procesos asociados a escalas más pequeñas, como la mesoescala y acorde con el planteamiento de Poveda (2004), que induce la existencia de climas locales y regionales de alta complejidad, dada la diversidad orográfica del país y la influencia de los diferentes factores atmosféricos a la que está expuesta la zona de estudio.

De esta manera se proponen 17 regiones de acuerdo a la estacionalidad de la precipitación y congruentes con los valores medios y la variabilidad temporal de la misma (Figura 5), analizado mediante componente principales, que describe particularidades para ciertas regiones. Se anexa a este documento un análisis que tiene en cuenta una regionalización de carácter general que muestra sólo la estacionalidad sin entrar a detallar características propias de zonas intermedias, volúmenes, entre otras. Anexo 1.

Para entender de manera física la distribución de las precipitaciones tanto en escala temporal y espacial, se analizaron los diferentes sistemas sinópticos generadores de la precipitación en Colombia, para cada una de las regiones.

Figura 5. Polígonos de las regiones según la precipitación por estacionalidad.



3.1 PROCESOS GENERADORES DE PRECIPITACION EN COLOMBIA

El clima regional de Colombia, está definido por las propiedades relevantes de los valores medios de los campos, que están forzados por las condiciones de frontera de la atmósfera, de la distribución de continente–océano y las variaciones de la radiación solar sobre la superficie, en el espacio y tiempo. Estos fenómenos atmosféricos son fuertemente influenciados por la distribución de la topografía y la vegetación en la superficie dentro del territorio colombiano. En la tabla 1, se presentan estos sistemas.

Tabla 1. Procesos principales generadores de la precipitación en Colombia.

Procesos Generadores de Precipitación
1. La zona de convergencia Intertropical - ZCIT
2. Sistemas de Alta Presión
3. Ondas del Este del Caribe
4. Vaguadas de latitudes medias
5. Características de mesoescala
6. Ciclones Tropicales
7. Vaguada tropical de la alta tropósfera – (TUTT)
8. La Zona de Convergencia del Atlántico Sur – ZCAS
9. Baja anclada de Panamá
10. Corrientes en chorro
11. Frentes Fríos

3.1.1 Zona de Convergencia Intertropical. La zona de convergencia Intertropical (ZCIT), marca la convergencia entre el aire del hemisferio Norte y el hemisferio Sur. En esta zona, los vientos alisios del Noreste que son originados por el aire que fluye alrededor del anticiclón del Atlántico Norte encuentran a los alisios del Sureste que a su vez son originados por los anticiclones del Pacífico y el Atlántico Sur. Debido al flujo convergente, La ZCIT es la región de mayor nubosidad y lluvias. La convección y la precipitación asociada se concentra alrededor de conglomerados de nubosidad muy definidas que la hacen fácilmente identificable en las fotos de satélite. Hurtado (2000).

Las presiones en la ZCIT generalmente son menores a 1010 milibares. Esta banda oscila al Norte y al Sur siguiendo aproximadamente la posición del sol y los flujos que atraviesan el ecuador. Estos flujos de los alisios son capaces de empujar la ZCIT muy lejos de la posición que le corresponde respecto al sol.

Una característica importante de la ZCIT es el hecho de que normalmente es discontinua en los Andes. Bajo esta circunstancia se puede dividir convencionalmente en dos ramas como se observa en la Figura 6 la rama del Pacífico occidental y la rama continental o del Atlántico ecuatorial.

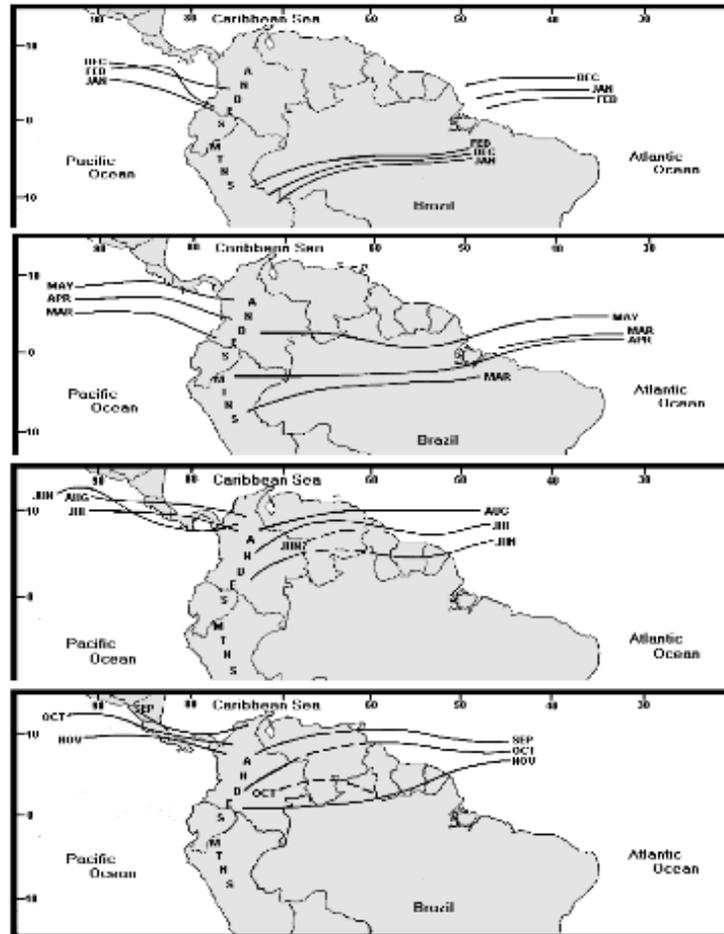
Sobre Colombia y áreas vecinas, el segmento del océano Pacífico oriental alcanza su posición extrema meridional en los 2 grados de latitud norte entre enero y febrero, mientras que en diciembre está un poco más al norte, el segmento continental aparece fraccionado e independiente del anterior y se ubica entre los 5 y 10 grados de latitud sur.

Entre marzo y mayo el segmento del Pacífico se mueve hacia el norte y su posición cerca de la costa está entre 2 y 7 grados de latitud norte; la rama continental se conecta entre marzo y abril con el segmento del océano Atlántico formando un solo sistema que se ubica entre los 5 grados de latitud sur y 1 grado de latitud norte al oriente del país; estos dos segmentos se unen a través de conglomerados convectivos no muy bien organizados sobre la región Andina.

Entre junio y agosto el segmento del Pacífico, al inicio del periodo se localiza en los 8 grados de latitud norte y al final del periodo en los 10 grados de latitud norte, penetrando a la región Caribe; el segmento continental presenta una inclinación suroeste-noreste sobre el oriente del territorio nacional, desplazándose también hacia el norte y pasado del Ecuador a los 8 grados de latitud norte.

Entre septiembre y noviembre el segmento del Pacífico comienza su desplazamiento hacia el sur y se registran posiciones desde 11 a 7 grados de latitud norte; la rama continental también inicia su recorrido hacia el sur, moviéndose de los 8 grados de latitud norte al Ecuador sobre la Orinoquia y Amazonía, perdiendo lentamente la inclinación hasta casi coincidir con las líneas de los paralelos; en este caso también los dos segmentos de la ZCIT se conectan por medio de conglomerados convectivos.

Figura 6. Posición media mensual de la ZCIT en Colombia.



3.1. 2 Sistemas de Alta Presión. Los anticiclones subtropicales no participan directamente en la generación de lluvias en Colombia, pero su posición e intensidad en un momento dado condicionan el comportamiento de la ZCIT, de las vaguadas extratropicales y de las ondas del este ya que pueden bloquear o desviar la trayectoria de estas características. Estos sistemas de presión alta son conocidos como semipermanentes porque cambian de posición sólo de verano a invierno. Estos anticiclones son:

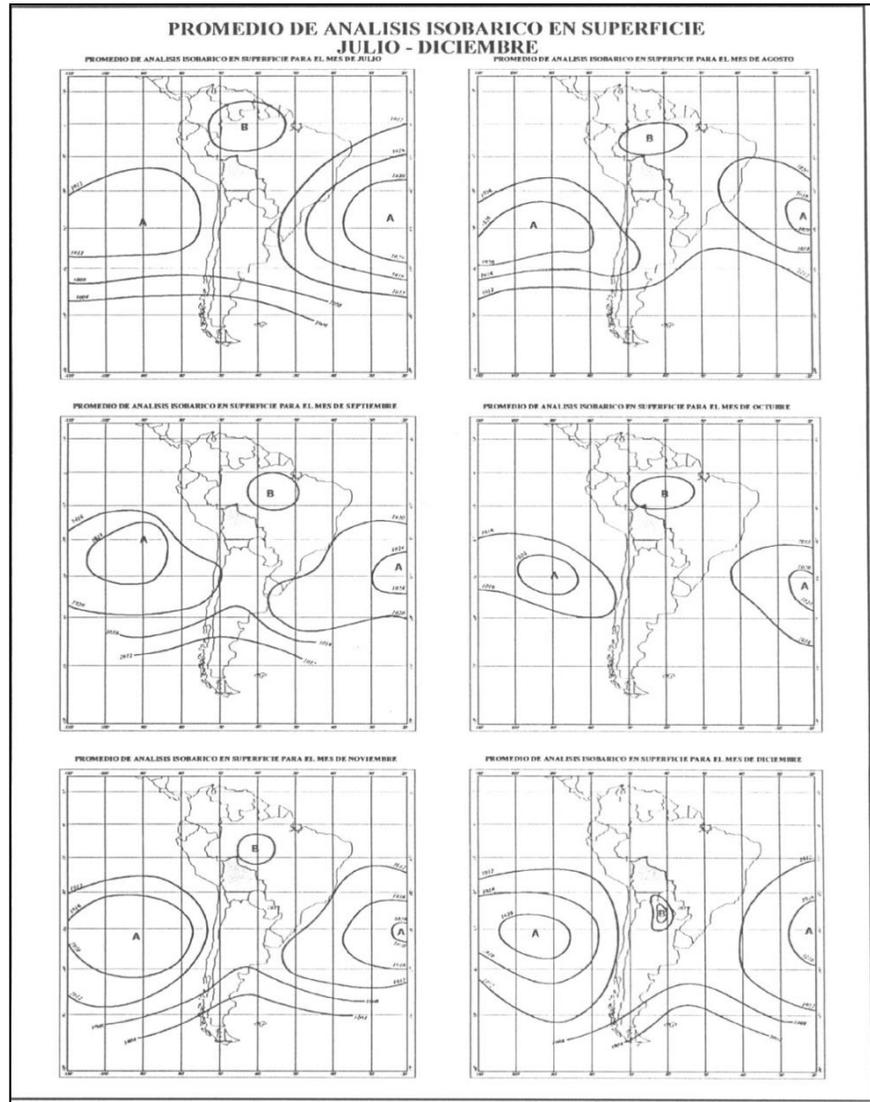
Anticiclón de los azores. Se extiende de Este a Oeste desde Africa hasta Norteamérica. El centro de alta presión generalmente se localiza cerca de los 30 N 35 W en invierno y en 35N 40 W en verano. Cubre la mayor parte del Sur del Atlántico Norte. En verano, los vientos del Este Noreste alrededor de su periferia Sur se mueven sobre el Caribe. Cuando la celda se mueve al Norte en verano, los alisios se convierten en Este - Sureste. Esta circulación es persistente abajo de los 4000 mts. Durante el verano del hemisferio Norte, la profundidad de los norestes aumenta a medida que la latitud disminuye. Sobre el Caribe central ellos alcanzan los 6 km; sobre la cuenca del Orinoco se extienden hasta 12 km. La parte sur de la circulación de los alisios converge con el flujo trasecuatorial de la alta del Atlántico Sur sobre el Atlántico ecuatorial.

Anticiclón Del Atlantico Sur. Se extiende de Brasil a Africa. La zona migra en dirección Noroeste de 32 a 26 S en julio cuando comienza el invierno del hemisferios Norte. El flujo sureste domina la cuenca del Atlántico Sur desde 25 S hasta el ecuador. Sobre las aguas la convergencia está limitada a las latitudes localizadas al Norte del ecuador debido a la posición de los dos centros de alta al Sur y al Norte. Los vientos en superficie que se originan en el hemisferio Sur y se alimentan dentro de la ZCIT son débiles y por ello la ZCIT se desplaza solo hasta 10 N. Sin embargo, justo al Norte de la alta del Atlántico, alcanzan en promedio 14 nudos.

Anticiclón del Pacifico Norte. Esta gran celda de alta presión cubre la mayor parte del Pacífico Norte al occidente. Afecta la cuenca del Caribe solo en forma indirecta y aun así únicamente en niveles medios y altos. Su mayor influencia consiste en desarrollar oestes en niveles altos por encima de los 3000 mts. durante la temporada seca (noviembre - abril) y por otra parte un cizallamiento en niveles altos que inhibe la intensificación hacia el Norte de los ciclones del Pacífico Oriental en octubre y noviembre (Figura 7).

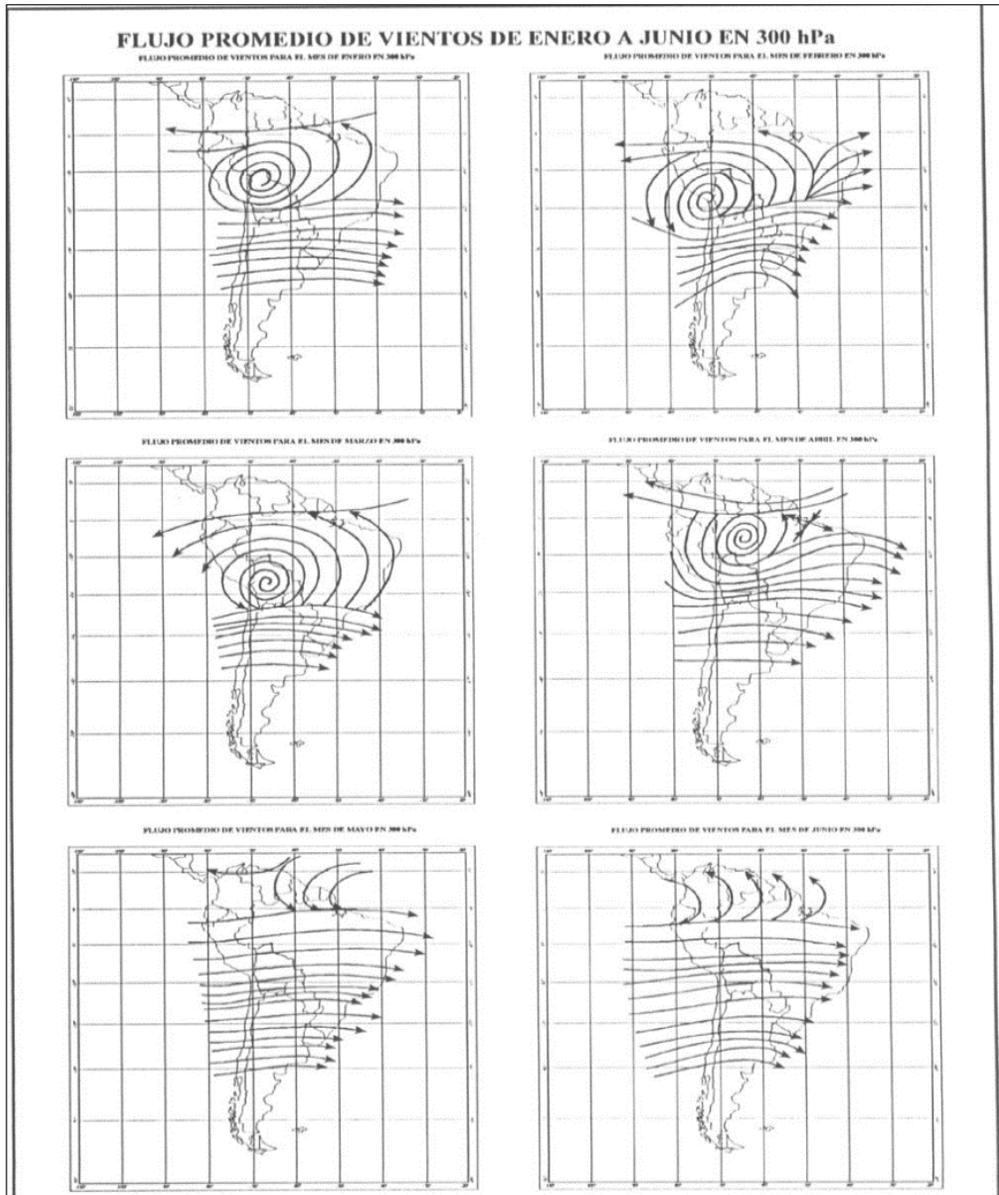
Anticiclón del Pacifico Sur. Esta celda semipermanente de Hadley es considerablemente mayor que su contraparte en el océano Atlántico. Su presión central oscila entre 1025 mb en julio y 1035 en enero. Esta celda juega un papel indirecto en la circulación en la cuenca del Caribe. Debido a que sus flujos de salida se forman los oestes ecuatoriales del Pacífico. Estos vientos encurvados del hemisferio Sur juegan un papel importante como causa de las anormalmente altas precipitaciones en el extremo occidental de Colombia y de las precipitaciones de verano sobre el oeste de Centroamérica (Figura 7).

Figura 7. Anticiclones del Pacífico y del Atlántico.



La Alta de Bolivia. Es un anticiclón con núcleo caliente que se ubica en la troposfera media y alta, su mecanismo de formación es atribuida a la liberación de calor latente. Es la principal transportadora de humedad desde el Amazonas, su presencia originará la formación de nubes y precipitaciones moderadas a fuertes; es migratoria y tiende a seguir las áreas de convección más intensa, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Posición de la Alta de Bolivia.



3.1.3 Ondas del Este del Caribe. Constituyen alteraciones en la corriente de los alisios, generalmente con curvatura ciclónica, los cuales deforman el campo de presión, originando cambios bruscos en el tiempo predominante. Generalmente son precedidas por escasa nubosidad la cual comienza a aumentar a medida que se acerca el eje de la onda. El paso del eje de la onda da lugar a bruscos cambios en la dirección del viento y aumento de la nubosidad. A la derecha del eje, sube la presión y la humedad y es común observar actividad tormentosa.

Las ondas del Este frecuentemente generan buena parte de los ciclones y huracanes tropicales. Se presentan únicamente en la temporada de mayo a noviembre y durante esta época son responsables en alto porcentaje de los cambios de tiempo observados en nuestras latitudes, Hurtado (2000).

3.1.4 Vaguadas de Latitudes Medias. Las vaguadas acompañan generalmente los frentes de latitudes medias y se ubican sobre el eje de las áreas de bajas presiones. Generalmente al Este de la vaguada se presenta convergencia en niveles bajos y divergencia en altura, presentando movimientos ascendentes y mal tiempo en estos lugares. Aunque generalmente la penetración de estas ondas es obstaculizada por los anticiclones subtropicales, en muchas ocasiones alcanzan a latitudes tropicales, interactuando en el peor de los casos con la ZCIT o con ondas del Caribe, lo cual puede ocasionar períodos prolongados de mal tiempo.

3.1.5 Características de Mesoescala. Pueden considerarse como características de mesoescala las brisas de mar - tierra, la circulación valle - montaña y la convección local. Estas características son de importancia fundamental en el origen de las lluvias en Colombia, bien sea de forma directa o indirecta.

Los procesos convectivos tienen lugar en las zonas planas tales como la Región Caribe y el Oriente del país. Son originados por ascensos verticales de aire debido al calentamiento de la superficie de la tierra. Al ascender, el aire se enfría adiabáticamente hasta alcanzar a una altura determinada el nivel de condensación, luego de lo cual aparecen los procesos de condensación, desarrollo vertical y precipitación. Son procesos generalmente rápidos, localizados y con escaso desplazamiento horizontal, aun cuando pueden afectar grandes áreas. Los núcleos convectivos comienzan a desarrollarse hacia la media mañana o al final de la tarde produciendo lluvias vespertinas o nocturnas respectivamente, Hurtado (2000).

La circulación valle - montaña es causante de lluvias orográficas las cuales se presentan rutinariamente en toda la Región Andina colombiana. El aire localizado sobre el valle, durante el día se encuentra más frío que el aire en contacto directo con la ladera, por lo cual este último es obligado a ascender, mientras que el aire más frío situado sobre el valle, desciende, originando de esta forma ascensos de aire caliente a lo largo de las laderas de la cordillera, su posterior enfriamiento y su consiguiente condensación, lo cual produce nubosidad y precipitaciones hacia los niveles medios de las cordilleras.

En las regiones aledañas a los litorales es común observar una circulación mar - tierra durante el día, y tierra - mar durante la noche, lo cual origina fajas de nubosidad de cierta magnitud a determinada distancia de la costa. En caso de existir obstáculos naturales, en

ocasiones es posible la generación de lluvia por ascenso y condensación de la masa de aire sobre estos obstáculos. Este fenómeno es común en la costa Pacífica y refuerza los efectos que pueden producir las circulaciones de macroescala predominantes.

3.1.6 Ciclones Tropicales. Los ciclones tropicales se forman en la cuenca del Caribe (entre otros sitios) comúnmente sobre aguas cálidas, bajo condiciones de direcciones de vientos constantes con la altura. Con estas condiciones pueden ser desatados por una onda del este o bajo una vaguada o ciclón en altura (TUTT). La influencia directa de los ciclones generalmente solo se observa en las islas de San Andrés y Providencia o en el extremo norte de Guajira. Sin embargo, su paso también tienen un efecto perturbador sobre el resto del país, al interactuar con la ZCIT o con ondas del este.

3.1.7. Vaguada tropical de la alta tropósfera – (TUTT). Es una vaguada de niveles altos en la tropósfera, que separa la cuña subtropical de la cuña ecuatorial en el Pacífico norte o en el Atlántico norte cerca a Suramérica. La TUTT en el Atlántico Norte y el Caribe (10°N a 20°N) se presenta entre junio y noviembre y se traslada desde el noroccidente de la costa de África hasta el extremo suroccidental del Caribe y en ocasiones alcanza el oriente del Pacífico ecuatorial. En la vaguada, algunas veces se observa vórtices que viajan en dirección suroeste.

Este sistema genera núcleos nubosos que dependen de la disponibilidad de calor y de la humedad. La TUTT, aparece muchas veces como una línea de cortante de viento sin las células ciclónicas o también puede tener muy poco desarrollo en las capas superiores de la tropósfera. Sin embargo, puede aparecer como una cadena de células ciclónicas de cientos de kilómetros de largo y en algunas ocasiones puede ser tan profunda, que puede ser observada en superficie. Los mayores núcleos nubosos están al sur de la línea de vaguada. La convección más intensa está asociada con circulación ciclónica bien desarrollada en niveles altos y con la pendiente vertical al suroriente decreciendo con la altitud.

3.1.8 La Zona de Convergencia del Atlántico Sur – ZCAS. Está definida por una zona donde convergen las masas de aire tropicales y las masas de aire subtropicales. Se forma generalmente cuando los frentes fríos se debilitan y estacionan al sudeste del Brasil. Se localiza frecuentemente en verano, sobre el norte y noreste del continente suramericano, afectando parte del suroccidente del país. Muchas veces cuando se asocia a la Alta de Bolivia, generan mal tiempo.

3.1.9 Baja Anclada de Panamá. Para finales del mes de mayo y comienzos del mes de junio, por lo general, se posiciona un sistema de baja presión o baja anclada de Panamá, sobre la parte centro y oeste del Mar Caribe, generando una disminución de hasta 1008 milibares hacia el este, oscilando la presión barométrica entre 1010 y 1012 milibares.

3.1.10 Corrientes en Chorro. Una corriente en chorro es una fuerte y estrecha corriente de aire concentrada a lo largo de un eje casi horizontal en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por una fuerte cizalladura vertical y horizontal del viento. Presentando uno o dos máximos de velocidad, la corriente en chorro discurre, normalmente, a lo largo de varios miles de kilómetros, en una franja de varios centenares de kilómetros de anchura y con un espesor de varios kilómetros. Dentro de las corrientes en chorro en Colombia se pueden mencionar:

- La corriente en chorro de niveles bajos en el Caribe: Es un fenómeno meteorológico derivado de la influencia de la circulación subtropical en niveles altos, la cual genera un arrastre de vientos Alisios en superficie con velocidades entre los 20 y 30 nudos. Está localizada en la zona tropical aproximadamente a unos 10 a 15 grados de latitud norte, pudiendo interactuar con la ZCIT. Cuando esta corriente se encuentra con altos contenidos de humedad en las capas bajas hay formación de nubes y precipitaciones que pueden ser de carácter fuerte.
- El chorro del choco: Los vientos del chorro del Chocó exhiben un marcado ciclo anual, siendo más fuertes en los meses de septiembre-noviembre y más débiles durante los meses de febrero-marzo. Tal comportamiento contribuye a explicar las razones por las cuales la segunda temporada lluviosa de septiembre-noviembre es más intensa que la primera de abril-mayo en muchas partes del occidente de Colombia.

3.1.11 Frentes Fríos. El comportamiento atmosférico en el país está determinado no sólo por la acción de los sistemas sinópticos que cruzan el país, sino también por la influencia que sobre ellos tienen algunos sistemas característicos de otras latitudes entre los cuales se destacan algunos típicos del hemisferio norte y el hemisferio sur, como lo son los frentes fríos.

Delante del frente frío, los alisios son reemplazados por un flujo ecuatorial cálido y húmedo, la convección se intensifica con los días y se organiza en una línea de convergencia prefrontal. Puede dar precipitaciones notables en presencia de forzamientos de altura. Tras el paso del frente la temperatura baja y se reestablece el régimen de alisios

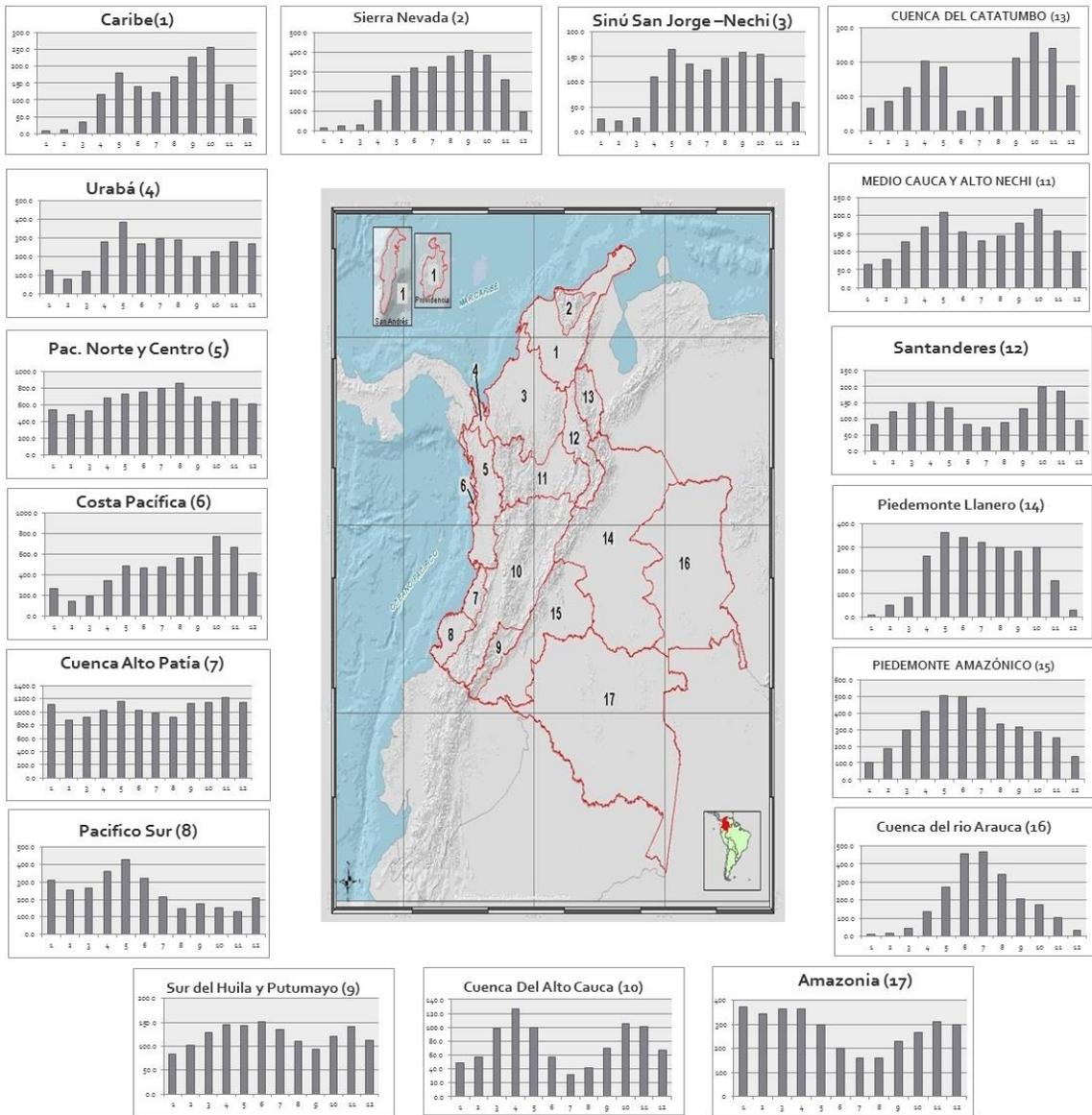
Sobre el mar Caribe los frentes fríos empiezan a transitar desde el mes de diciembre a marzo, provenientes de las altas latitudes, descendiendo en ocasiones hasta los 10° norte. Estos sistemas frontales generalmente ocasionan aumentos significativos el gradiente de presión en el área, generan incrementos en la intensidad de los vientos.

3.2 DESCRIPCIÓN TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES PARA CADA REGIÓN POR ESTACIONALIDAD

De acuerdo a las regiones encontradas por la estacionalidad de la precipitación (17) y el posterior análisis por componentes principales, se presenta en la Figura 9 la distribución de las regiones y se hace una caracterización de cada una de ellas, según los procesos generadores ya mencionados.

Los grupos encontrados por ACP, dado un conjunto original de datos (Regiones por estacionalidad), agrupan según la varianza y es ordenado por su importancia de mayor tamaño del conjunto de datos; de esta manera captura el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Se realiza una descripción de las posibles causas de la variabilidad de una región dado por sus componentes encontrados mediante ACP específicamente para la región 1 y la región 10, que mostró un agrupamiento en más de un solo componente.

Figura 9. Regionalización según la precipitación por estacionalidad y sus histogramas.



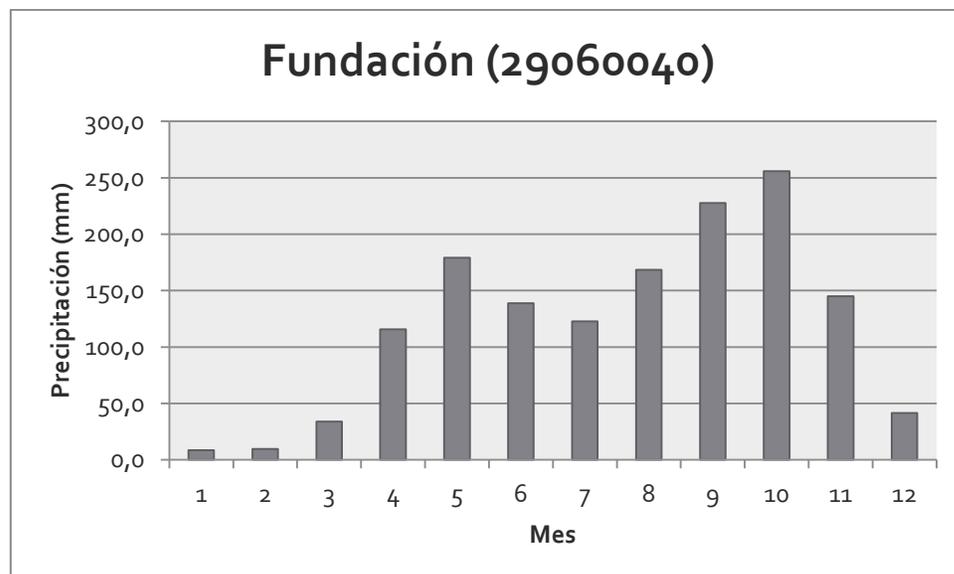
3.2.1 REGIÓN CARIBE (1)

Como se muestra en la Figura 10 el régimen de lluvias de esta región está representado por la estación Fundación. Esta región se caracteriza por tener un régimen bimodal con una temporada seca bien marcada a principio de año, y una segunda con volúmenes de precipitación cercanos a los 100 mm. La primera temporada seca, responde a la ubicación del Anticiclón del pacifico Norte, cuyos movimientos temporales durante el invierno (enero a marzo) en la cuenca del Caribe y las zonas costeras próximas, favorecen el debilitamiento de la nubosidad y la precipitación, sumado al hecho que para este periodo la ZCIT (principal componente generador de precipitaciones), se encuentran en su posición más al Sur del país. En el verano (julio a septiembre) el área del anticiclón es un poco menor y excluye las inmediaciones de la Zona de Convergencia Intertropical.

La época lluviosa del segundo semestre se caracteriza por un régimen de precipitaciones abundantes con septiembre y octubre como los más lluviosos, en esta época suelen presentarse los denominados Ciclones Tropicales y ondas del este; durante el resto del año puede darse el tránsito de frentes y Anticiclones subtropicales, los cuales pueden aumentar el régimen de lluvias en todo el Caribe colombiano.

Durante el inicio de la época húmeda sobre el Mar Caribe, comienza a percibirse el ascenso paulatino de la Zona de Convergencia Intertropical sobre los 08°N, así como la reactivación de la baja presión anclada de Panamá, con lo cual se presentan las primeras precipitaciones.

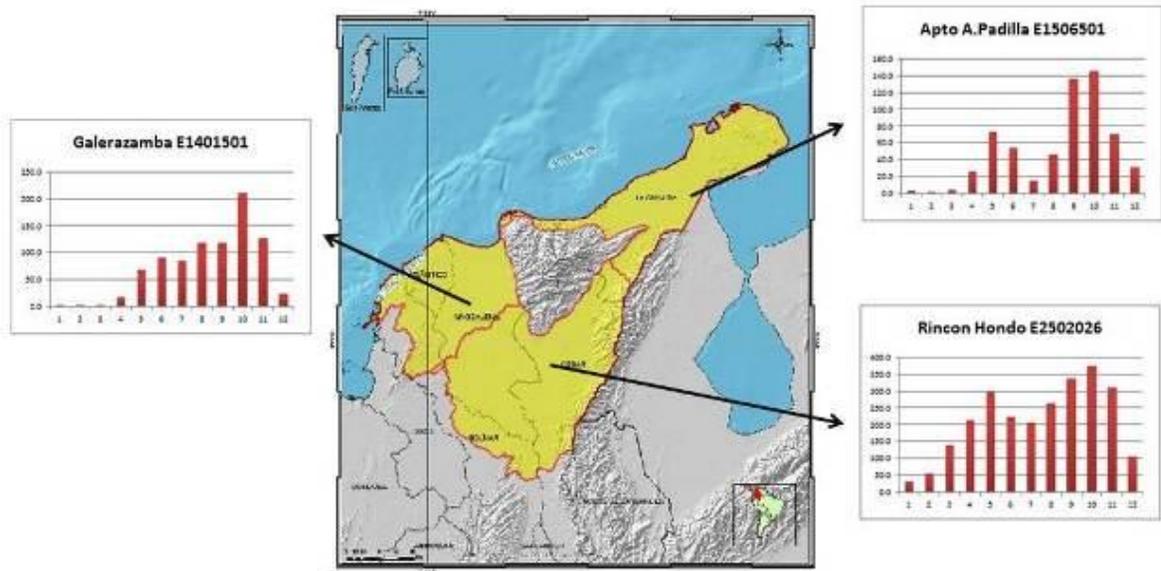
Figura 10. Régimen de precipitación para la estación Fundación.



Otro factor importante, que aporta a alimentar el sistema convectivo en el Caribe, entre junio y noviembre, es la presencia de la TUTT, que es uno de los sistemas más importantes en

la convección del Caribe, ya que se desempeña como un canal de salida para organizar dicha convección presente en este periodo. La ubicación y orientación de la TUTT también puede jugar un papel importante en la formación de ciclones tropicales en el Caribe occidental. (Zea Mazo, León Aristizábal, & Eslava Ramirez, 2000).

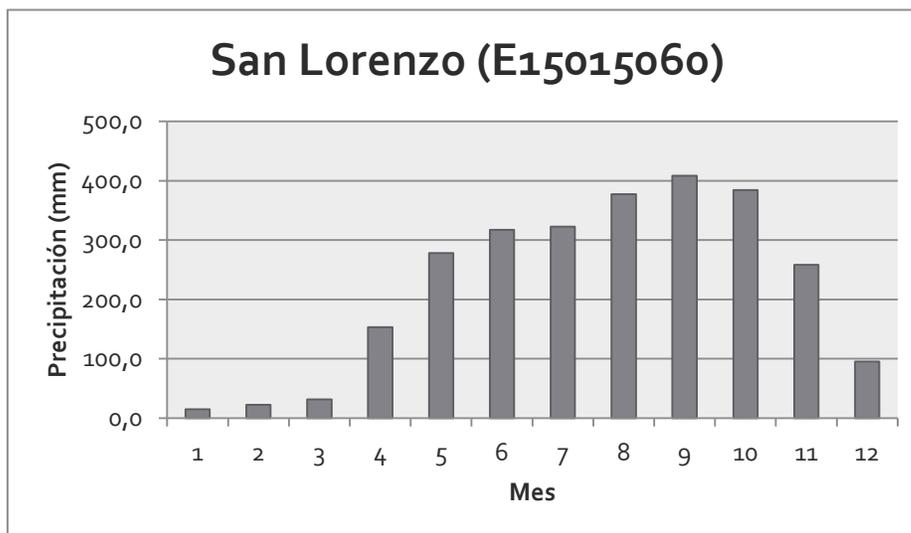
Figura 11. Subdivisiones por ACP, para la región 1.



3.2.2 REGIÓN SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA (2)

Por su parte, La Sierra Nevada representa por la estación de San Lorenzo con una elevación de 2200 m.s.n.m., tiene una distribución diferente a la región del caribe, dado que se encuentra rodeada por la Serranía del Perijá de un lado, y por la propia Sierra Nevada al Occidente, lo cual ocasiona que en la mayoría de los casos sea dominada por masas húmedas provenientes del mar Caribe dadas por los factores sinópticos ya mencionados y la topografía del lugar actúe como una barrera para las masas de aire que descargan su humedad en las laderas de las cadenas montañosas a modo de precipitaciones orográficas (Figura 12).

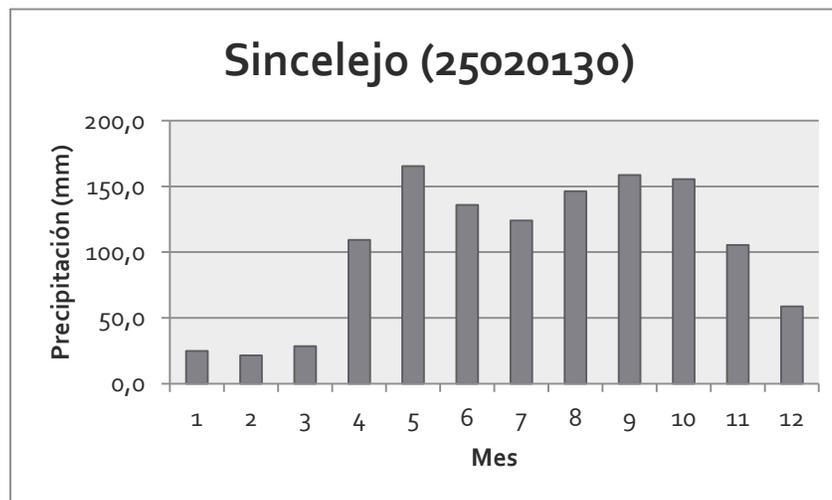
Figura 12. Régimen de precipitación para la estación San Lorenzo.



3.2.3 SINÚ SAN JORGE –NECHI (3)

Esta región al norte del país, es más lluviosa que la región del caribe, cuyos componentes sinópticos llegan afectar a ambas zonas, sin embargo, el volumen de precipitación es mayor, dado a su cercanía al Océano Pacífico, y a la rama pacífica de la Zona de Confluencia Intertropical. Su proximidad con las Serranías de la cordillera Occidental produce un factor adicional de incremento de las lluvias. La influencia de la incursión de masas del Pacífico, se muestra en los histogramas correspondientes a la estación de Sincelejo (Figura 13). Aquí prácticamente desaparece la temporada seca de mitad de año, característica del bajo Magdalena y la cuenca del Cesar constituyendo el único sector del norte del país en poseer régimen monomodal.

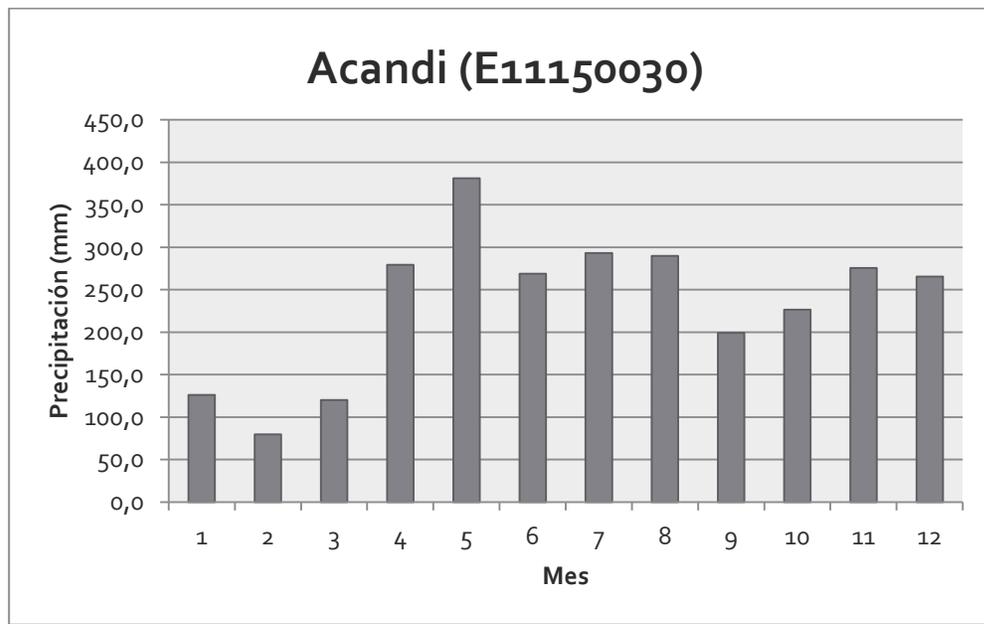
Figura 13. Régimen de precipitación para la estación Sincelejo.



3.2.4 URABÁ (4)

Las precipitaciones en esta zona son de mayor volumen para la época seca de diciembre a marzo comparado con la región de Sinú San Jorge; característica atribuida a la permanencia semicontinua de la baja presión de Panamá, lo que genera un incremento en la nubosidad y algunas lluvias aisladas. Se puede observar el avance a lo largo del cinturón semicontinuo de bajas presiones (ZCIT), el paso de abundantes ondas tropicales a partir del mes de mayo, las cuales ocasionan incrementos en las lluvias como se muestra en el histograma de la estación de Acandí.

Figura 14. Régimen de precipitación para la estación Acandi.



3.2.5 PACIFICO NORTE Y CENTRO (5)

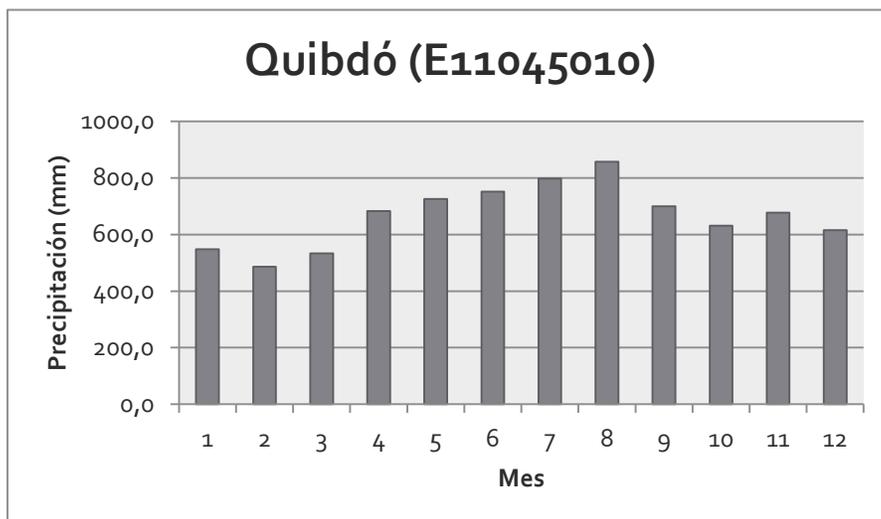
Los procesos de lluvias están condicionados por el movimiento de la ZCIT - rama Pacífica de sur a Norte y de Norte a Sur durante el año, los cuales se combinan con efectos orográficos por la presencia de varios accidentes geográficos y de la Cordillera Occidental. La orientación de las cadenas montañosas (Serranía del Baudó y las estribaciones de la cordillera Occidental), actúa como una barrera para las masas de aire tropical provenientes del Océano Pacífico que descargan su humedad en las laderas occidentales de las cadenas montañosas a modo de precipitaciones orográficas. La estación de Quibdó es representativa del régimen de lluvia predominante en la Región.

No se aprecia una temporada seca definida y la distribución durante el año es muy uniforme ocasionando un histograma casi plano (Figura 15). Comportamiento mencionado por Zea (2002), dado a los lazos dinámicos entre la ZCIT, el recurvamiento de los vientos Alisios en el ecuador y su permanencia en el área, como también la influencia en el flujo circulante en el área por parte de la barrera constituida por la Cordillera Occidental que da lugar a un sistema de baja presión en el Pacífico Colombiano con circulación que favorece el desarrollo de la convección casi permanentemente en la zona.

Entre mayo y noviembre se observan las mayores precipitaciones, periodo el cual se presentan ondas del este. Esta época justamente está centrada en el momento cuando la ZCIT y en general los sistemas atmosféricos registran su mayor desplazamiento al norte Mac Gregor (1986). Estos sistemas de baja presión y convergencia cerca de su eje al paso a través de longitudes cercanas a la localización normal de la baja del Pacífico, refuerzan las condiciones de convergencia, convección, humedad e inestabilidad en el área, contribuyendo en parte a su activación según la intensidad de las mismas Zea (2002).

Por su parte el chorro del choco que exhiben un marcado ciclo anual, siendo más fuertes en los meses de septiembre a noviembre, también contribuye a explicar las razones por las cuales la segunda temporada lluviosa es más intensa que la primera de abril a mayo, ya que, este transporta grandes cantidades de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior del país. El chorro del choco interactúa con la topografía de los Andes occidentales y con los vientos alisios del este, favorece la convección profunda produciendo grandes cantidades de precipitación, Poveda (1994).

Figura 15. Régimen de precipitación para la estación Quibdó.

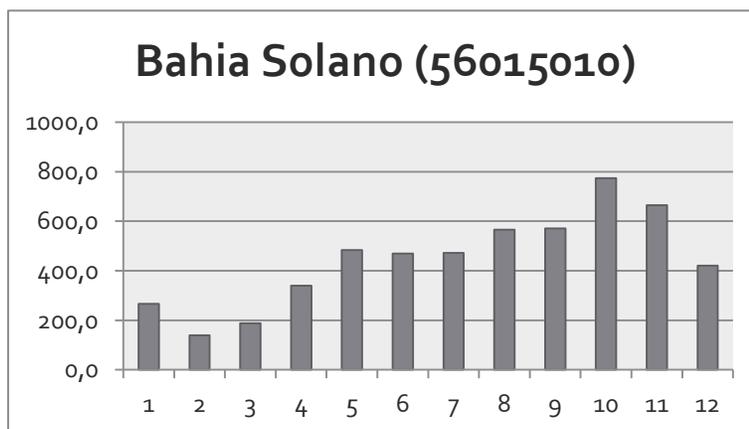


3.2.6 COSTA PACÍFICA (6)

La estación de Bahía Solano como representativa de la costa Pacífica (Figura 16), nos muestra un régimen con una temporada seca los primero meses del año, cuando la ZCIT está al sur del pacífico razón por la cual se puede explicar sus bajos volúmenes.

Al igual que la región cinco, esta se ve afectada por diferentes procesos convectivos como lo son la baja de panamá, el chorro del choco y la alta humedad de la región que ayuda a la formación de nubes. La interacción con los procesos generadores de la precipitación es la principal causa de la diferencia en los regímenes de lluvia, dado a la distancia que existe para esta zona con la topografía, que ayuda a la convección profunda.

Figura 16. Régimen de precipitación para la estación Bahía Solano.

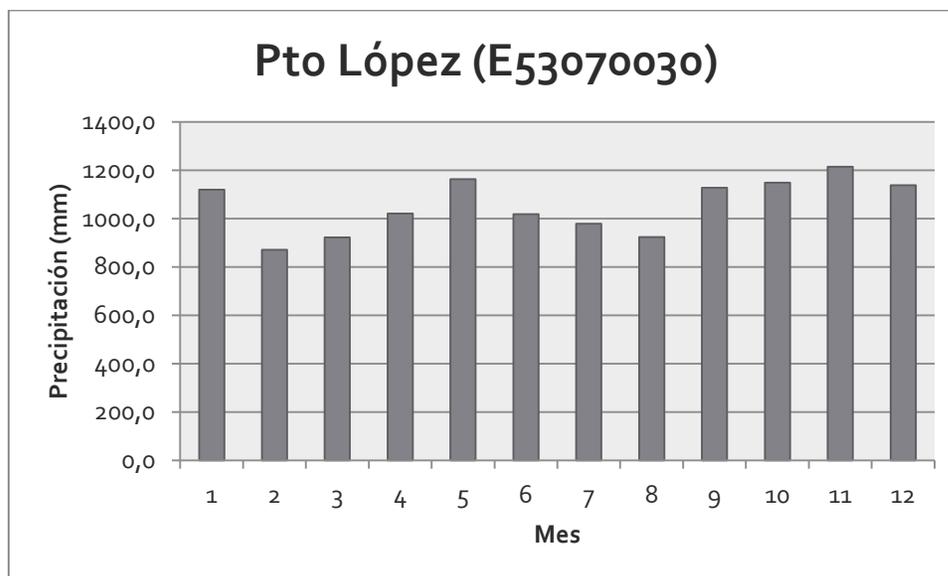


3.2.7 CUENCA ALTO PATÍA (7)

Constituye una de las regiones más lluviosas del mundo. Sobre ella confluyen varios factores: el movimiento de la Zona de Convergencia - rama pacífica, la posición de la baja semipermanente del Pacífico y la corriente en chorro del Choco, responsable por la fuerte advección de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior de Colombia. Es altamente influida por factores orográficos en cuanto hace referencia a factores que generan lluvias, además de su generador de altas tasas de evaporación que a su vez son causantes de altos niveles de humedad en la atmósfera adyacente las cuales se ven favorecidas por la exuberante vegetación selvática que produce altas evaporaciones incrementando su humedad y produciendo lluvias intensas. En la Figura 17 se presenta el régimen de la estación Puerto López, valor que puede ser el máximo pluviométrico en Colombia.

El desplazamiento de la ZCIT detrás de la normal solar determina para toda la región la temporada menos lluviosa entre los meses de enero a marzo, cuando está situada más al sur, y julio a agosto cuando está más al norte y no ejerce influencia directa sobre la zona. La época de lluvias se pueden distinguir dos períodos de abundantes precipitaciones: abril a mayo y octubre a diciembre.

Figura 17. Régimen de precipitación puerto López de Micay.



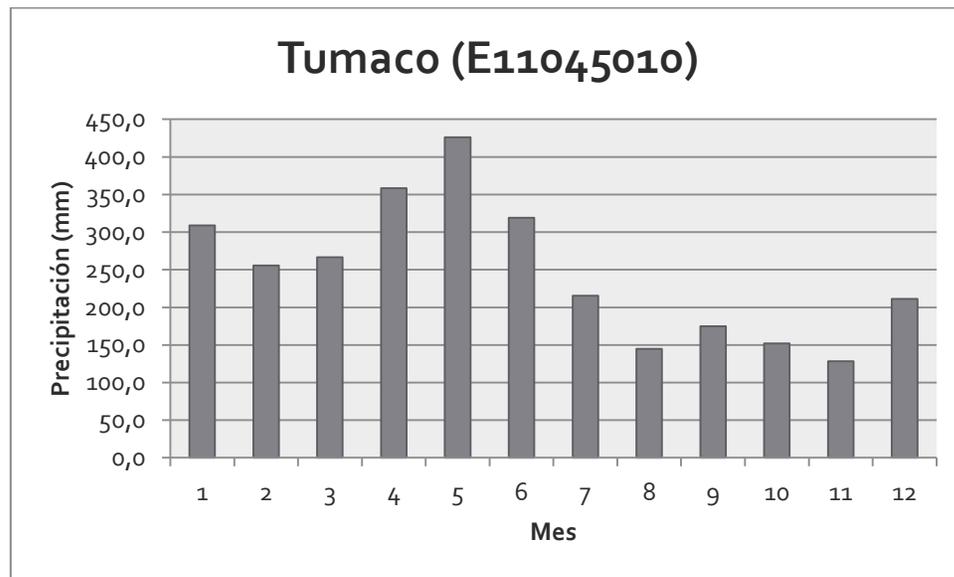
3.2.8 PACIFICO SUR (8)

De acuerdo a la Figura 18, se puede observar que la época lluviosa se presenta a principios del año en el sur del pacífico, cuando la ZCIT- rama Pacífica se encuentran en su posición

más al Sur (frente a la Costa Nariñense) y en parte es debido a la relativa distancia de la cordillera y a la menor influencia de la baja semipermanente; este frente ciclónico de mal tiempo avanza gradualmente hacia el norte empujado por los vientos, y con el desplazamiento del cinturón hacia el norte las precipitaciones disminuyen en los meses de la mitad del año.

De julio a noviembre son los meses menos lluviosos, temporada que esta explicada por la ubicación de la ZCIT más hacia el norte del país La estación de Tumaco es representativa de esta región.

Figura 18. Régimen de precipitación para la estación Tumaco.



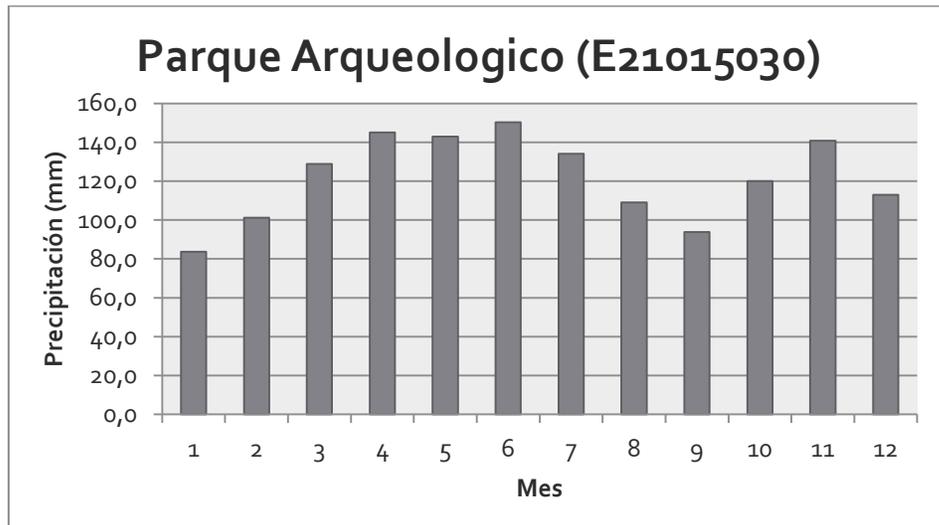
3.2.9 SUR DEL HUILA Y PUTUMAYO (9)

Debido a las particularidades topográficas del sistema montañoso, se desarrolla una transición entre los regímenes monomodales y bimodales de la precipitación que se presentan en regiones aledañas. La variabilidad en el comportamiento de la precipitación en el ciclo anual, se genera por la influencia de la ZCIT durante el año entre los periodo marzo - mayo y octubre - noviembre (temporadas lluviosas); a diferencia de la zona norte (bimodal), la temporada seca no se ve tan marcada, debido que no presenta diferencias altitudinales considerables y estas permitan la entrada de masas húmedas provenientes de la Orinoquia y la Amazonia.

Durante el mes de septiembre en donde se registran los menores volúmenes de precipitación los sistemas sinópticos de la Amazonia han empezado a desplazarse hacia el sur, ocasionando disminución en la humedad proveniente del Meta (Armenta, 2012),

modulando la temporada seca, e influyendo con menores valores de precipitación para la segunda temporada lluviosa que sólo se ve afectada por la ZCIT (Ver Figura 19).

Figura 19. Régimen de precipitación para la estación Parque Arqueológico.



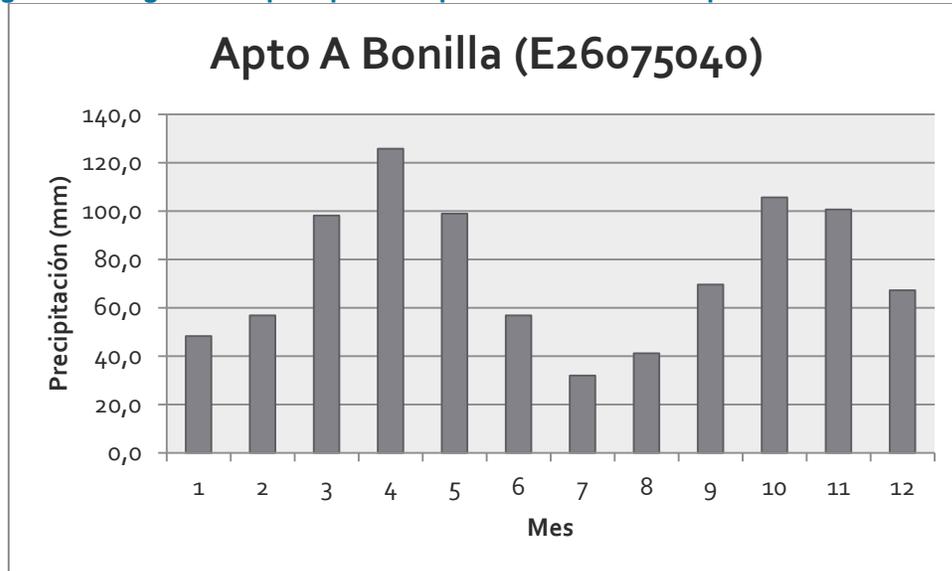
3.2.10 CUENCA DEL ALTO CAUCA – MONTAÑA NARIÑENSE, ALTO PATÍA Y ALTO MAGDALENA (10)

En esta Región el movimiento de la ZCIT es el factor que determina el régimen bimodal, de la precipitación y además dominan los procesos orográficos y convectivos. Predomina la circulación del Norte y Oeste, por lo cual su parte más lluviosa tiende a ser el flanco occidental de la cordillera Central. Por el contrario, el Valle geográfico y la ladera oriental de la cordillera Occidental son considerablemente secos por la abrupta pendiente que caracteriza esta vertiente y por el paso de masas de aire provenientes del Pacífico, desprovistas de humedad que ya ha sido descargada a barlovento (Hurtado, 2000). El régimen se ilustra con el ejemplo del Aeropuerto Alfonso Bonilla cuyas temporadas lluviosas marzo –mayo y septiembre a noviembre coincide con el paso de la ZCIT (

Figura 20).

Esta región presenta un efecto latitudinal, según el cual se incrementan las lluvias de inicio de año, hacia el Norte siguiendo el movimiento de la ZCIT. Dado que el norte de la región muestra pendientes más suaves y menos elevadas que en el sur, las masas húmedas del Pacífico alcanzan a influir en el régimen de esta región.

Figura 20. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Alfonso Bonilla.



Parte de este régimen sobre la región es explicado por el efecto Foehn, el cual ha sido estudiado por Armenta, (2013), y encontró que dicho efecto en la región ocurre de mayo a septiembre.

La evidencia del efecto Foehn, en cuanto a precipitación, se observa entre los meses de abril y septiembre, con una mayor presencia del efecto entre los meses de mayo y julio. En estos meses las diferencias de precipitación entre el valle del alto Magdalena y el piedemonte Amazónico son las más altas. La dirección de los vientos para la zona es predominantemente del Este, lo que concentra a barlovento la humedad, la nubosidad y la precipitación por la acción del ascenso del viento; produciendo valores máximos de precipitación para el piedemonte Amazónico y los mínimos valores para el valle del alto Magdalena Armenta, (2013). La ZCIT en este periodo se encuentra al norte de la región, con lo que las precipitaciones en el valle del alto Magdalena disminuyen considerablemente. (Figura 21).

Por su parte, en la Figura 22 se presenta las subdivisiones encontradas mediante ACP, cuyas diferencias principales están dadas por el volumen de la precipitación que parece estar relacionada con el doble paso de la ZCIT:

Figura 21. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Benito Salas.

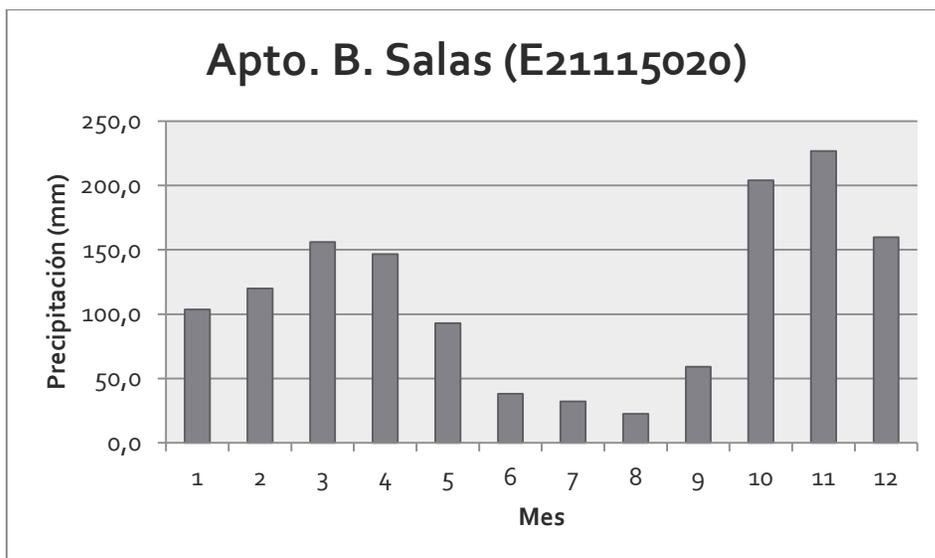
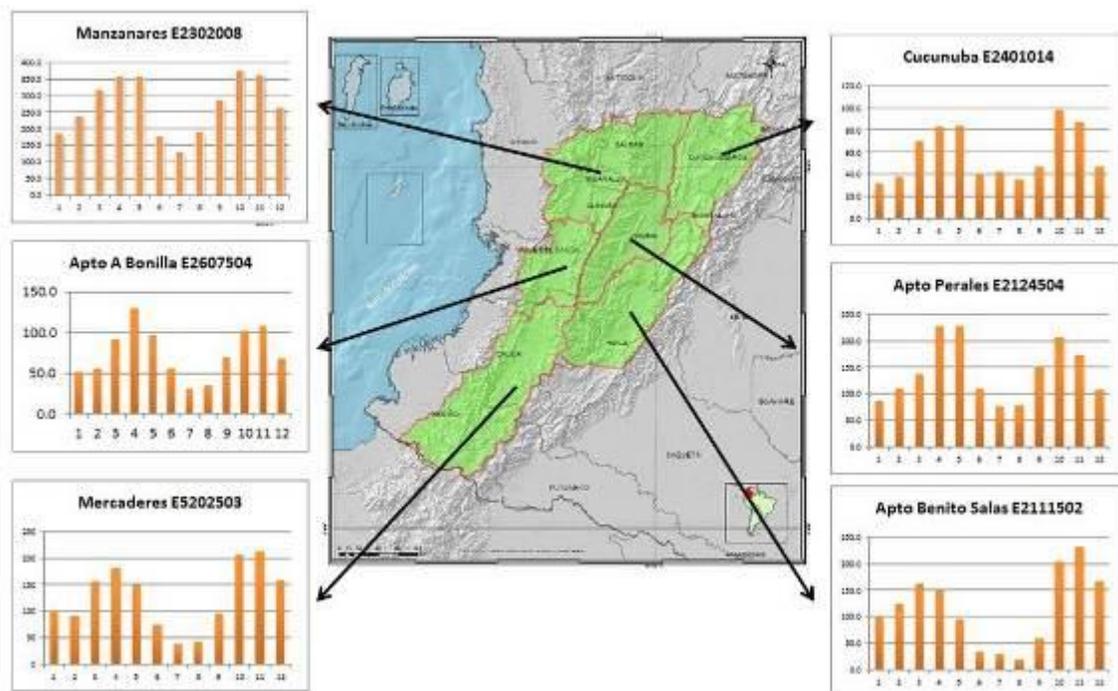


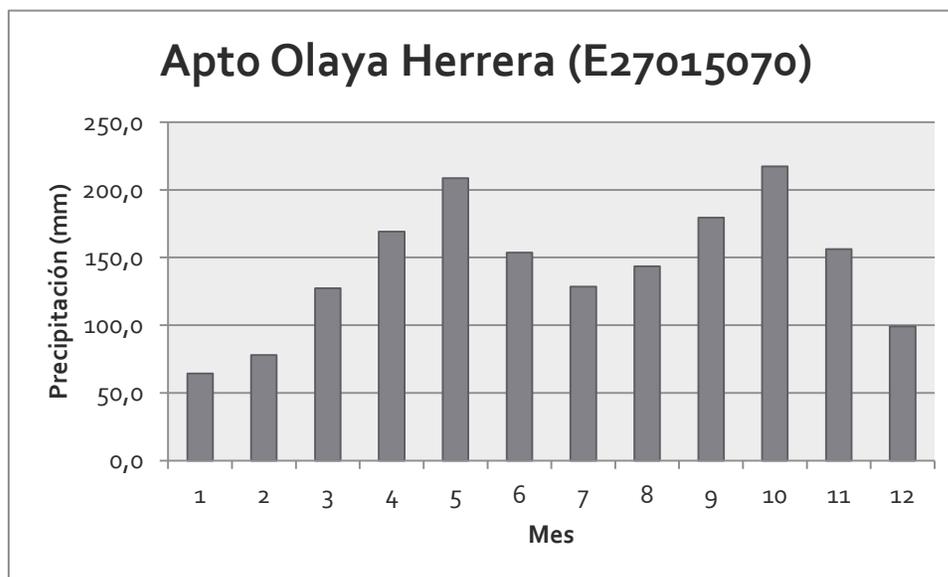
Figura 22. Subdivisiones mediante ACP, para la región 10.



3.2.11 MEDIO CAUCA Y ALTO NECHI (11)

En esta región las cantidades de lluvia tienden a ser apreciablemente mayores. y la temporada seca de mitad de año no es tan marcada como en el caso del Alto Cauca como se aprecia en el histograma del aeropuerto Olaya Herrera (Figura 23); característica, que se atribuye a que las elevaciones de la montaña en esta zona, son menores y permiten que la humedad proveniente del Océano Pacífico afecte en mayor medida las precipitaciones dadas en este región

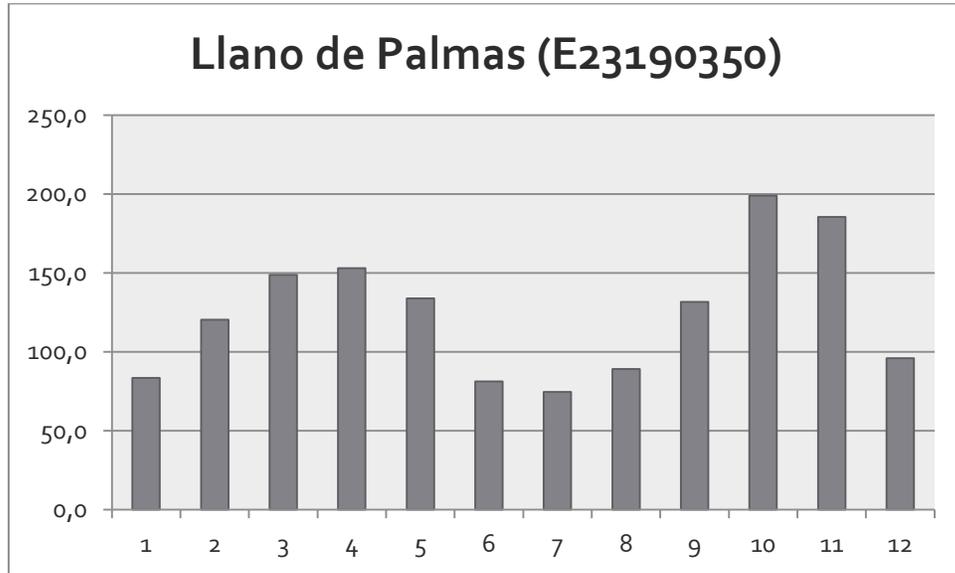
Figura 23. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Olaya herrera.



3.2.12 SANTANDERES (12)

Se encuentra enfrentada directamente a los vientos Alisios del Noreste asociados a la rama atlántica de la Zona de Convergencia Intertropical y sus movimientos explican su régimen bimodal como se observa en el histograma para la estación de Llano de Palmas (Figura 24).

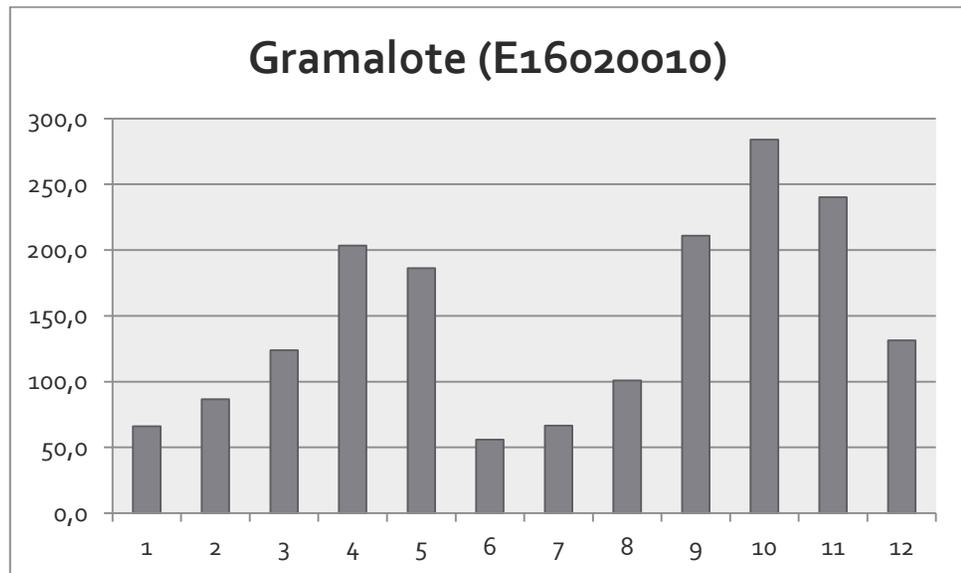
Figura 24. Régimen de precipitación para la estación Llano de Palmas.



3.2.13 CUENCA DEL CATATUMBO (13)

Debido a su accidentada topografía, las lluvias son abundantes con mayor intensidad en la segunda temporada de lluvias, en el histograma de la estación Gramalote muestra mayores contenidos de lluvias para los meses de abril y octubre que coincide con el paso de la ZCIT (Figura 25).

Figura 25. Régimen de precipitación para la estación Gramalote.



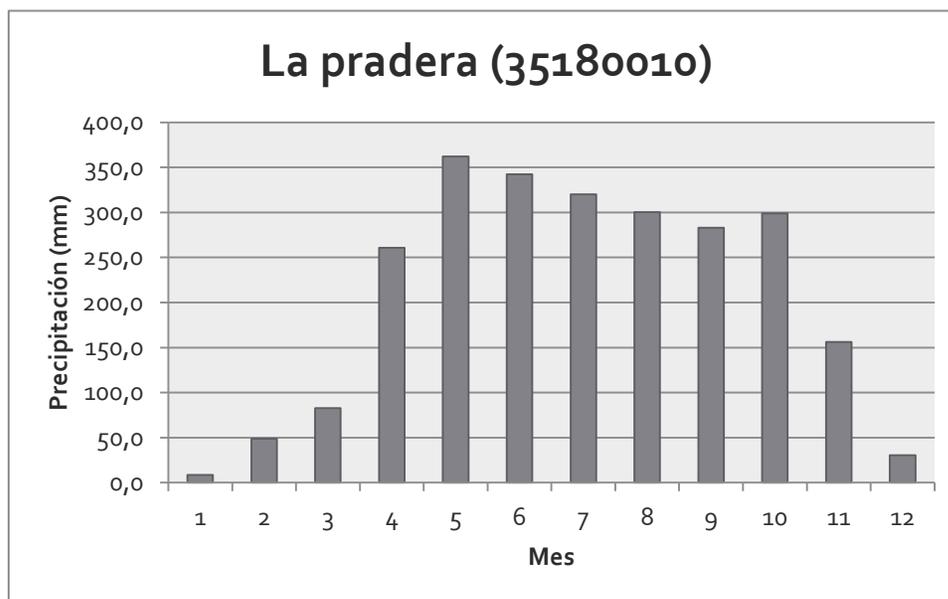
3.2.14 PIEDEMONTE LLANERO (14)

Debido a la ausencia de accidentes topográficos, el movimiento de la ZCIT es directo responsable de la aparición de lluvias en la Región y su régimen es la mejor demostración del movimiento latitudinal de la ZCIT. Es claro que hacia el piedemonte de la cordillera Oriental, este factor se ve reforzado y modificado por los factores de mesoescala, Hurtado (2000).

Otro sistema que incide sobre la circulación atmosférica del sureste del país corresponde al sistema de baja presión en niveles bajos de la cuenca amazónica, conocida con el nombre de baja amazónica y su origen se debe al calor latente de condensación y al efecto complementario que obra la cordillera de los Andes al canalizar el flujo de los alisios del noreste. Este sistema semipermanente se desplaza desde el norte de Bolivia en enero hasta el extremo sureste de Colombia en julio (León, Zea & Eslava, 2000).

La región de los Llanos Orientales es de carácter monomodal, con una época de lluvias de abril a noviembre y una época seca de diciembre a abril, coincidiendo con la presencia y ausencia de la ZCIT, humedad que se fortalece con la cercanía a la cordillera donde se generan procesos de formación de lluvias orográficas muy pronunciados y destacables como se presenta en la Figura 26.

Figura 26. Régimen de precipitación para la estación La pradera.



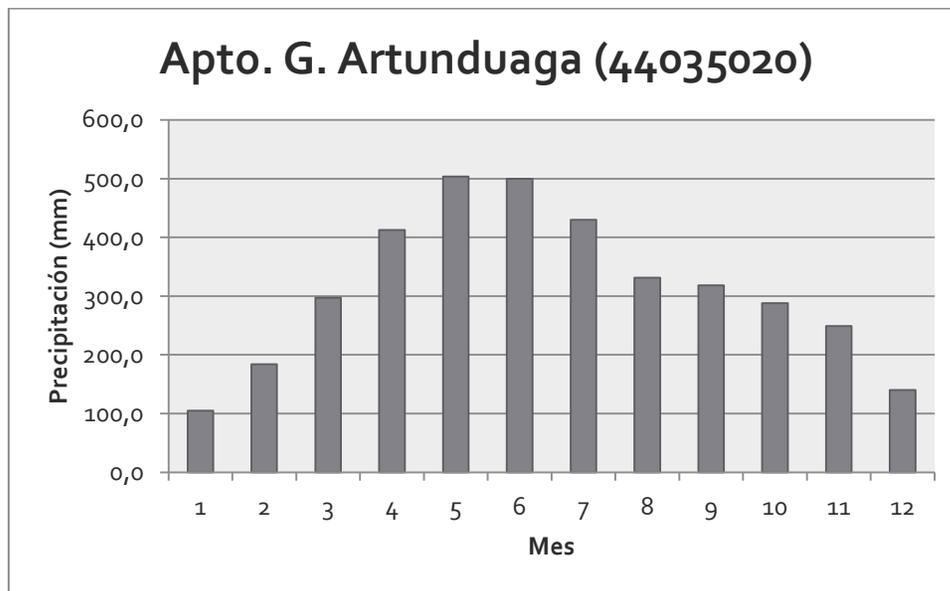
3.2.15 PIEDEMONTE AMAZÓNICO (15)

Su régimen predominante tiene la forma que muestran la estación del aeropuerto Gustavo Artunduaga con una leve disminución de lluvias en septiembre u octubre y una temporada seca definido hacia inicios del año.

En esta zona las masas de aire provenientes del Este han adquirido suficiente humedad al cruzar sobre las sabanas orinoquenses, y al acercarse a la cordillera comienzan a experimentar procesos convectivos. Las lluvias en esta región están condicionadas básicamente por factores orográficos y circulaciones locales.

Para esta región dada su ubicación barlovento de la montaña, se presenta un fenómeno meteorológico asociado a la precipitación orográfica, cuando las corrientes de aire húmedo se ven obligadas a subir un obstáculo, descargando parte de su humedad en forma de lluvia (Armenta, 2013). De esta manera como se observa en la Figura 27, se observan precipitaciones durante todo el año, explicadas por el fenómeno ya mencionado, que se alimenta de las masas húmedas provenientes de la Orinoquia.

Figura 27. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Gustavo Artunduaga.

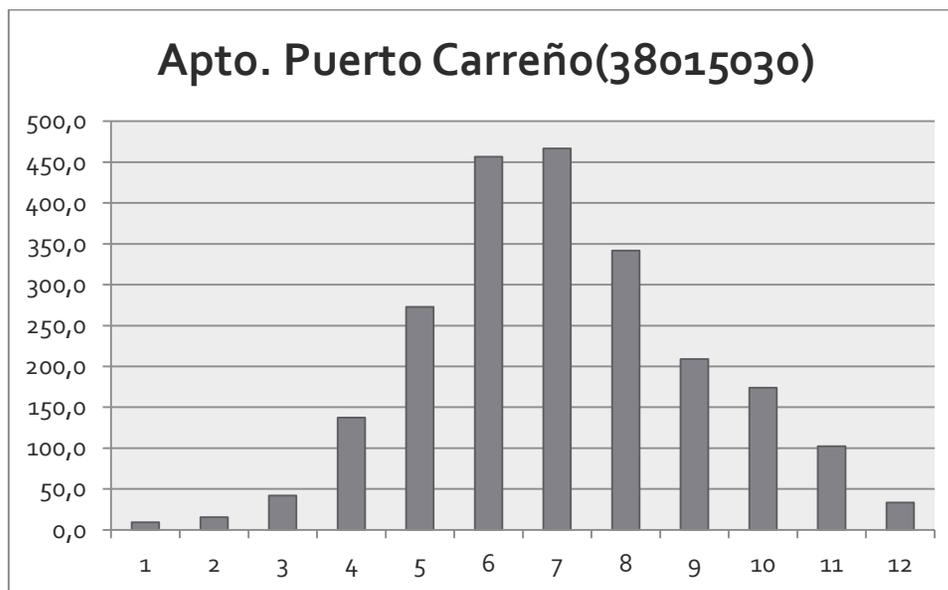


3.2.16 CUENCA DEL RIO ARAUCA (16)

Esta región recibe en general pocas lluvias debido a encontrarse protegida por la prolongación de la cordillera Oriental en Venezuela, de las masas de aire húmedas provenientes del Este y Noreste. Estas masas descargan toda su humedad en la vertiente opuesta y al llegar a los Llanos de la Orinoquia se encuentran secas y extremadamente cálidas, Hurtado (2000).

El régimen de lluvias es regido por la presencia de la ZCIT, su principal característica es la presencia de un período seco extremadamente definido entre diciembre y marzo y un único período lluvioso en el resto del año, como se presenta en la Figura 28.

Figura 28. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Puerto Carreño.

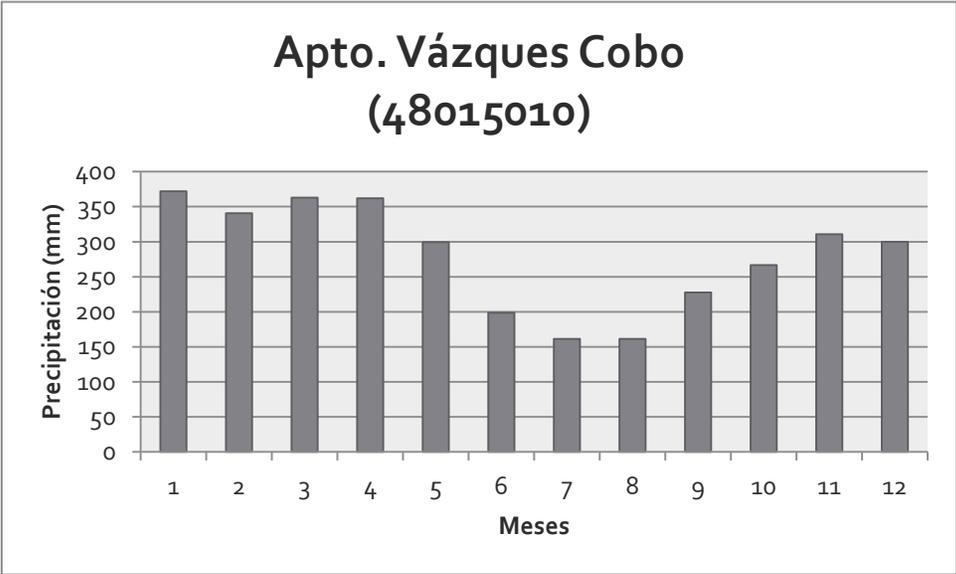


3.2.17 AMAZONIA (17)

El principal generador de lluvia en la Región es la ZCIT, modificado a su vez por el factor biológico que constituye la cobertura del suelo, generador de altas tasa de evaporación que a su vez son causantes de altos niveles de humedad en la atmósfera adyacente. Está dominada por masas de aire provenientes del sureste y del este generalmente muy inestables, las cuales se ven favorecidas por la exuberante vegetación selvática que produce altas evaporaciones incrementando su humedad y produciendo lluvias intensas.

El efecto de desfase en el régimen producido por la ZCIT, se aprecia en el histograma del Aeropuerto Vásquez Cobo (Figura 29), la cual presenta una forma monomodal, y cuya temporada seca que se caracteriza por la ausencia de la ZCIT, sus precipitaciones están influenciadas por los frentes fríos provenientes del hemisferio sur.

Figura 29. Régimen de precipitación para la estación Aeropuerto Vázquez Cobo.



Otro sistema que influye sobre la circulación atmosférica de Colombia es la baja de la Amazonia (IDEAM, 2000). Éste consiste en un sistema estacional de baja presión en niveles bajos de la atmósfera sobre la cuenca amazónica, que se desplaza desde el norte de Bolivia (en enero) hasta el extremo sureste de Colombia (en Julio). La presencia de este sistema en el territorio nacional ocasiona descensos importantes de la temperatura del aire, y ayuda a intensificar las precipitaciones en la Amazonia Colombiana particularmente a mitad de año.

4. CONCLUSIONES

Se consiguió dividir el territorio Colombiano en regiones homogéneas con respecto a su comportamiento pluviométrico, en especial a su estacionalidad y sus valores medios, lo cual dio como resultado diecisiete regiones homogéneas, las cuales muestran gran consistencia con el comportamiento (régimen) de las lluvias.

Para las diecisiete regiones encontradas, el análisis mediante componentes principales, encontró homogeneidad en las series de tiempo, dado que las agrupaciones presentaron señales claras para un solo componente, mientras que la región 1 y 10, mostraron agruparse en mayor número de componentes según la varianza analizada. Las subdivisiones podrían obedecer a procesos de meso o microescala, dando como resultado final una zonificación propia para la región 1 que corresponde a 3 subdivisiones y para la región 10 que corresponde a 6 subregiones; subdivisiones relacionadas con cambios de volúmenes en la precipitación, manteniendo la estacionalidad.

En cuanto a la región 14 y 16 es difícil obtener una regionalización adecuada, por falta de una buena densidad de las estaciones. Sin embargo, se sugiere la revisión de Pacheco, Y., & G. León. (2001):

ANEXO 1.

Zonificación por regímenes pluviométricos

En Colombia, la distribución de la precipitación obedece a dos tipos de régimen: monomodal y bimodal. El primero se caracteriza por presentar una temporada seca y una lluviosa durante el transcurso del año, mientras que en el régimen bimodal se registran dos temporadas secas alternadas con dos lluviosas (Fig. 1).

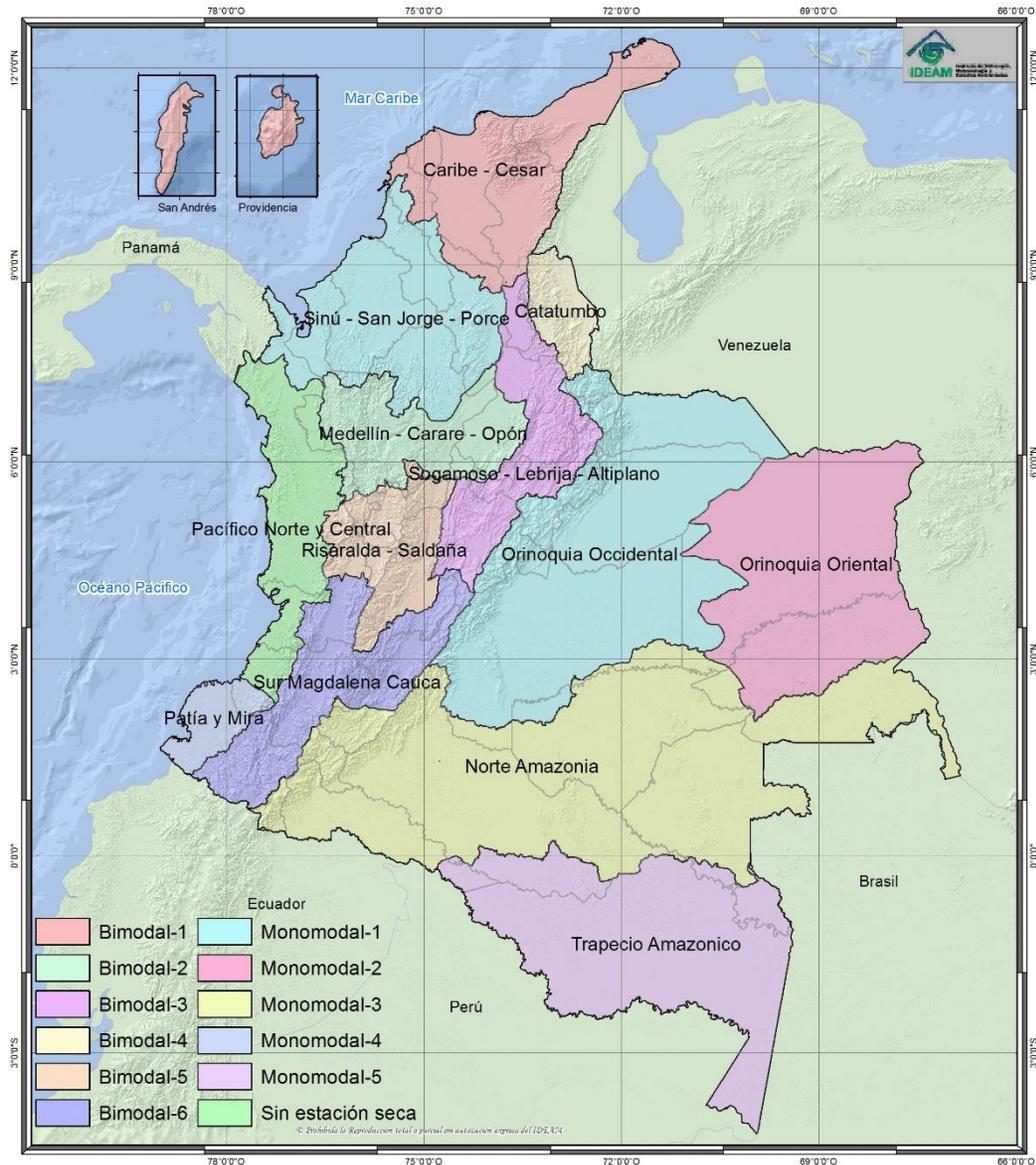


Figura 1 Zonificación de la lluvia por régimen pluviométrico (Bimodal y Monomodal)

Existen diferencias marcadas entre las temporadas secas y lluviosas de cada régimen, no solo en lo relacionado con las cantidades de lluvia observadas, sino en el tiempo de

ocurrencia de las mismas, el cual está influenciado por la variabilidad propia de la precipitación y por la acción de factores climáticos como la latitud, la distancia al mar, la orografía, entre otros, lo que da lugar a la aparición de diferentes subtipos dentro de cada régimen, como se describe a continuación:

Régimen monomodal

Monomodal 1 (Mm1). Este régimen es propio del piedemonte llanero y la Orinoquia occidental, también se presenta sobre el norte de la Región Andina y sur de la Región Caribe, en las cuencas del Sinú, San Jorge, Nechí y Tarazá. Se caracteriza por tener una temporada lluviosa continua entre abril y noviembre, con un periodo seco muy marcado de diciembre a marzo. En las zonas de la Orinoquia, el segundo semestre es un poco menos lluvioso y los volúmenes de precipitación empiezan a disminuir a partir de julio (Fig. 2).

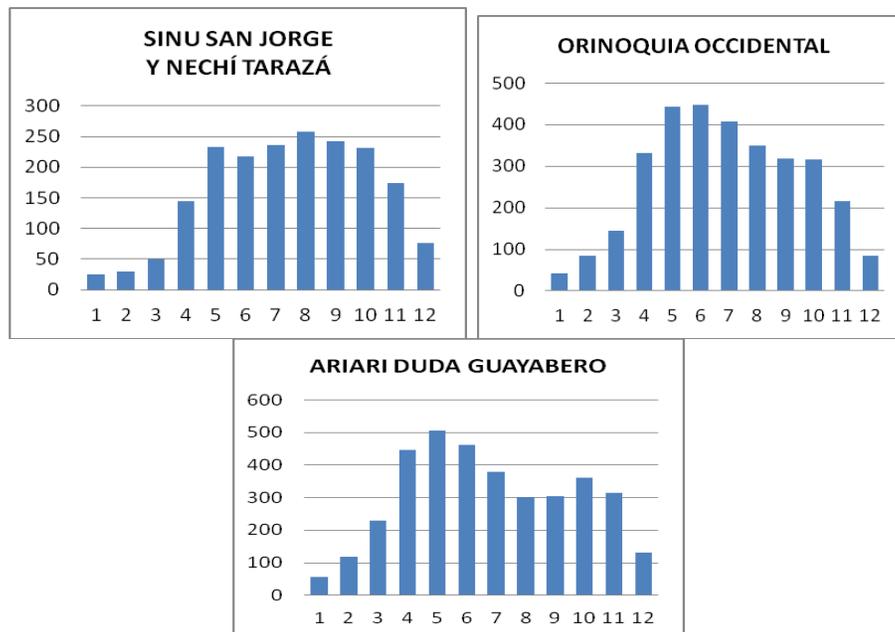


Figura 2 Régimen (Mm1): Cuencas Sinú, San Jorge, Nechí, Tarazá y Orinoquia Occidental

Monomodal 2 (Mm2). Es característico del oriente de Vichada y Guainía. Presenta una pronunciada estacionalidad, con una temporada seca muy marcada, de diciembre a marzo, lluvias máximas a mitad de año y paulatina reducción de precipitación hacia final de año (Fig. 3).

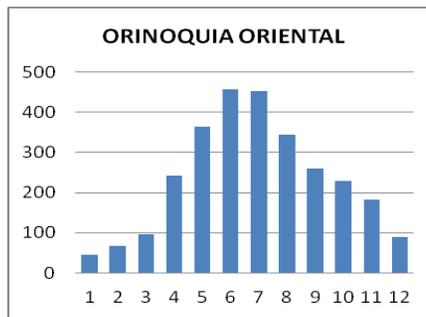


Figura 3 Régimen (Mm2): Orinoquia Oriental

Monomodal 3 (Mm3). Este régimen se observa sobre las cuencas de los Ríos del Piedemonte Amazónico, a lo largo de la franja norte de la Amazonia y en el nacimiento de los Ríos Magdalena y Caquetá. Tiene una temporada lluviosa hacia mitad de año, picos de precipitación entre abril y junio y un leve incremento de lluvias en octubre. Presenta una sola época seca de menores lluvias entre diciembre y febrero y se diferencia del anterior, porque ésta última no es tan marcada (Fig. 4).

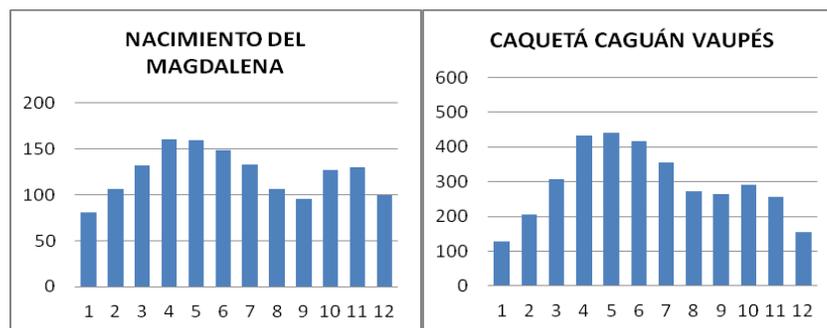


Figura 4 Régimen (Mm3): Nacimiento del Magdalena y Piedemonte Amazónico

Monomodal 4 (Mm4). Este régimen es propio de la Cuenca Baja de los Ríos Patía y Mira, al sur del Litoral Pacífico. Las precipitaciones se distribuyen a lo largo del año, con una temporada más lluviosa durante el primer semestre y un segundo semestre de menores lluvias (Fig. 5).

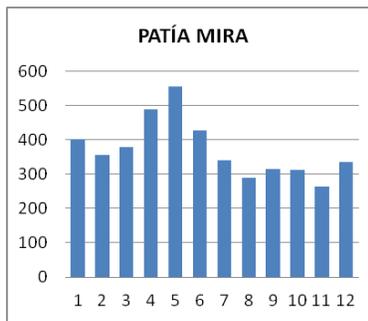


Figura 5 Régimen (Mm4): Sur del Litoral Pacífico

Monomodal 5 (Mm5). Característico de la transición hacia el Hemisferio Sur del Continente, en Leticia, con lluvias a lo largo del año, interrumpidas por una breve temporada seca entre junio y agosto (Fig. 6).

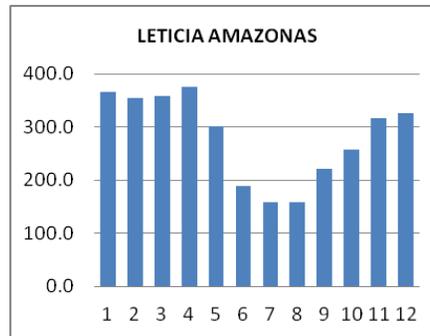
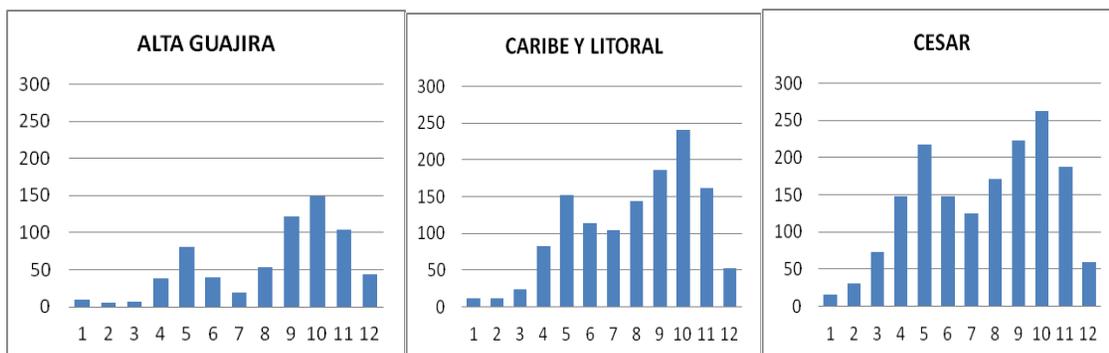


Figura 6 Régimen (Mm5): Sur del Amazonas

Régimen bimodal

Bimodal 1 (Bm1). Es el régimen característico de la Costa Caribe y el norte de la cuenca del Cesar, con dos temporadas secas, la primera de ellas mucho más marcada, de diciembre hasta abril y la segunda a mitad de año; las temporadas lluviosas ocurren en cada semestre del año, pero la segunda, entre septiembre y noviembre es más lluviosa que la del primer semestre.



En esta zona se diferencia el régimen correspondiente a La Sierra Nevada de Santa Marta, que por sus características particulares y su orografía, no tiene la temporada seca de mitad de año (monomodal) y Diciembre es un poco más lluvioso; también se distingue el régimen de la zona insular de San Andrés y Providencia, en donde la época de mayor déficit se presenta entre febrero y abril (Fig. 7).

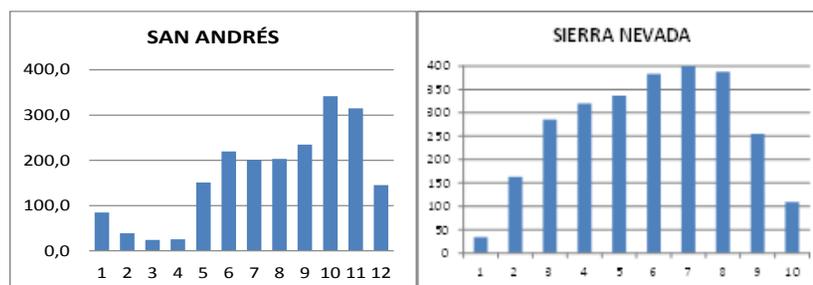


Figura 7 Régimen (Bm1): Costa Caribe, norte del Cesar, San Andrés y Sierra Nevada

Bimodal 2 (Bm2). Corresponde a cuencas ubicadas en Antioquia y Santander, como las de los ríos Medellín y Carare-Opón. La característica principal de este régimen es que la temporada seca de mitad de año es poco marcada. Las temporadas lluviosas se ubican en los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre (Fig. 8).

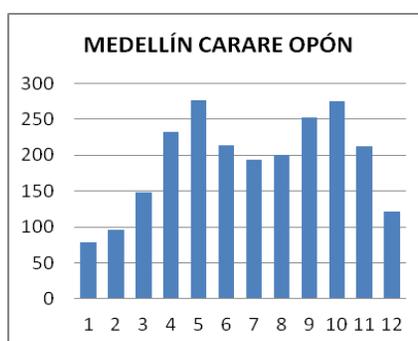


Figura 8 Régimen (Bm2): Cuencas Medellín y Carare-Opón

Bimodal 3 (Bm3). Es característico del Nororiente de la Región Andina, se presenta en los Santanderes, Boyacá y El Altiplano Cundiboyacense, sobre las cuencas de los Ríos Lebrija, Chicamocha, Sogamoso y Bogotá. También tiene dos épocas secas y dos de mayores lluvias; a diferencia del anterior, la primera temporada seca es menos prolongada y más deficitaria que la de mitad de año y las épocas de mayores lluvias son similares, la del primer semestre tiene como meses lluviosos abril y mayo y en el segundo semestre el mes más lluvioso es octubre seguido por noviembre (Fig. 9).

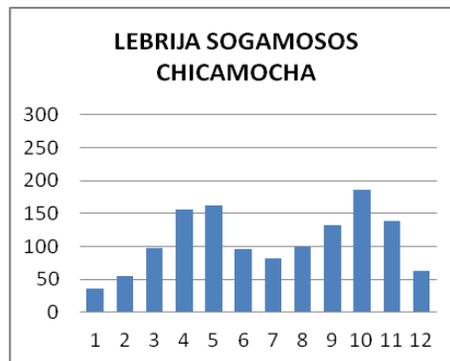


Figura 9 Régimen (Bm3): Santanderes, Boyacá y Altiplano Cundiboyacense

Bimodal 4 (Bm4). Es el régimen típico del centro occidente de la Región Andina, se presenta sobre las cuencas de los Ríos Risaralda-Saldaña y Otún y es similar al anterior, pero las dos temporadas secas de inicio y mitad de año tienen el mismo comportamiento (Fig. 10).

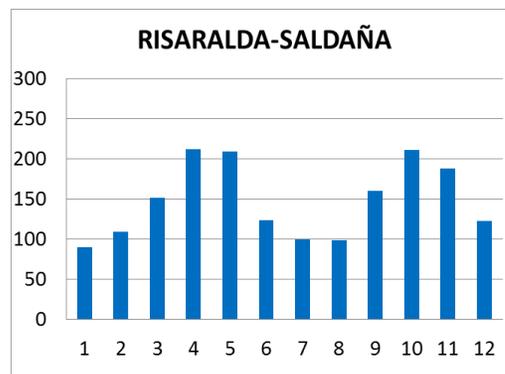


Figura 10 Régimen (Bm4): Risaralda, Saldaña y Otún

Bimodal 5 (Bm5). Es característico de la Cuenca del Catatumbo. Este régimen tiene dos épocas secas similares a lo largo del año, con trimestres menos deficitarios y con el segundo periodo de lluvias mucho más intenso y prolongado que el primero (Fig 11).

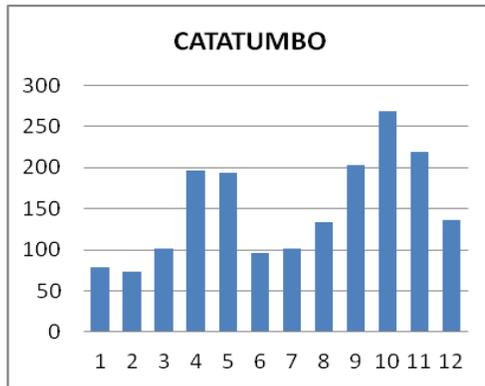


Figura 11 Régimen (Bm5): Catatumbo

Bimodal 6 (Bm6). Es el régimen presente hacia el sur o parte alta de la Cuenca Magdalena Cauca, también se caracteriza por las dos temporadas de menores lluvias a inicio y mitad de año; la diferencia radica, en que la época seca entre junio y agosto, es mucho más deficitaria que la del primer trimestre y adicionalmente las temporadas lluviosas son similares a lo largo del año (Fig. 12).

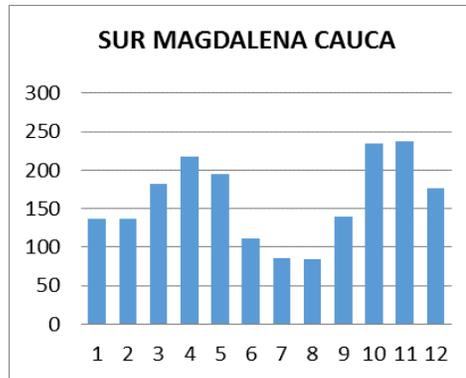


Figura 12 Régimen (Bm6): Sur del Magdalena Cauca

Sin estación seca (Se). Finalmente hay un régimen que no tiene características unimodales o bimodales, sin épocas secas o lluviosas definidas y se diferencia del resto del país, por presentar precipitaciones continuas a lo largo del año; es típico del Norte y Centro de la Región Pacífica (Fig. 13).

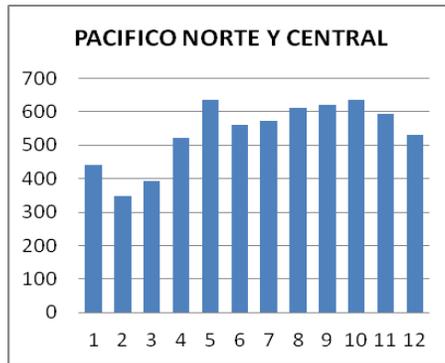


Figura 13 Régimen (Bm6): Norte y Centro del Pacífico

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Betolli, M., Rivera, J.A., Penalba, O., (2009). Regionalización de los días secos en Argentina. Un enfoque metodológico. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN-UBA. Vol. 35 N° 2 (2010) 67-80.

Cedeño, J., & Cornejo, M.P., (2009). Regionalización de la precipitación en el Ecuador usando EOFs. Memorias del Primer Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima Auditorio EMPREUDEC, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Casas, A., (2005). Regionalización del territorio colombiano de acuerdo a la precipitación. Nota Técnica IDEAM, IDEAM –Contrato 105-05, Bogotá D.C.

Carvajal, Y., Marco, J., (2002). Aplicación de métodos estadísticos para la regionalización de precipitación mensual en el Valle del Cauca. a Meteorol. Colomb. 5:13-21. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

Comrie A.C., Glenn E.C., (1998). Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research* 10: 201-215.

Dalrymple, T., (1960). Flood Frequency analyses” Water Supply Pap. 1543-A, U.S. Geological Survey, Reston, Va.

Englehart PJ, Douglas AV. (2004). Characterizing regional-scale variations in monthly and seasonal air temperature over Mexico. *International Journal of Climatology* 24:1897-1909.

Englehart P.J., Douglas A.V., (2002). Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera* 15:147-164.

Gong, X., & Richman, M.B., (1982). An examination of methodological issues in clustering North American precipitation. (pp J103-J108). Proceedings of the 12 th conference on probability and statistics in the atmospheric sciences. Toronto, Canada. American meteorological Society.

Green, P. E., (1978). *Analysing Multivariate Data*. The Dryden Press: Illinois, USA, 519 pp.

Hurtado, G., (2000). La precipitación en Colombia. Nota Técnica IDEAM, IDEAM - METEO/006-00, Bogotá D.C.

Johnson, Dallas., (2000). Applied multivariate methods for data analysis. International Thompson Publishing.

Jolliffe, I. T., (1986). Principal Component Analysis. Springer-Verlag. 271 pp.

Kaiser H.F., (1958): The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23: 187–200.

Karl, T R., Koscielny, A. J. y Diaz, H. F., (1982). Potential errors in the application of principal component (eigenvector) analysis to geophysical data. *J. Appl. Meteorol.* 21, 1183-1186.

Pacheco, Y., & G. León. 2001: Clasificación climática de la Orinoquia Colombiana a partir de los patrones de circulación atmosférica. *Meteorol. Colomb.* 4:117-120. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

Poveda, G., (1994). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* Vol XXVIII, Número 107.

Richman M & Lamb P (1985) Climatic Pattern Analysis of Three and Seven Day Summer Rainfall in the Central United States. Some Methodological Considerations and a Regionalization. Climate and Meteorological Section. Illinois State Water Survey. American Meteorological Society.

Richman, M., (1986). Rotation of Principal Components. *J. Climatol*, 6, 293-335.

Ruiz, F., Arango, C., Dorado, J., & Guzmán, D. (2012). Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del siglo XXI respecto al clima presente.: Nota Técnica IDEAM. Bogotá D.C.

Salas-Flores, M.A., Salas-Cruz, A., Gay, C., Patiño, R., (2011). Regionalización de la temperatura media en México utilizando componentes principales. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC-UNAM). México, D.F.

Snow, J. W., (1976). The climate of northern South America, En: Schwerdtfeger, W. (ed.), *Climates of central and South America*, Elsevier, Amsterdam.

Terra, R., Pisciotano, G., (1994). Regionalización del Uruguay según el ciclo anual de precipitaciones mediante "Cluster Analysis". Instituto de mecánica de los fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Wiltshire S., (1986). Identification of homogeneous regions for flood frequency analysis" *J. Hydrol.*, 84, 287 – 302.

Zea mazo, j. A., León Aristizábal, G., & Eslava Ramirez, J. (2000). *Influencia de sistemas extratropicales en colombia*. Bogotá d.c.: Meterología Colombiana 1:9-15. ISSN .