

CÁLCULO DE PRECIPITACIÓN MEDIA Y EVALUACIÓN DE LA RED PLUVIOMÉTRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO ATRATO EN EL DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ, COLOMBIA

CALCULATION OF AVERAGE RAINFALL AND EVALUATION OF NETWORK PLUVIOMETRIC OF THE RIVER ATRATO HIGH BASIN IN THE DEPARTMENT OF CHOCÓ, COLOMBIA

WILLIAM MURILLO LÓPEZ*, SAMIR CÓRDOBA MACHADO*, REINER PALOMINO LEMUS*

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es la estimación de la precipitación media a través de los modelos media aritmética (MA), polígonos de Thiessen (Th), isoyetas (ISO) y Thiessen modificado (ThM). También se evaluó la densidad de la red pluviométrica mediante el análisis de la distribución espacial de las lluvias, utilizando información disponible en la cuenca alta del río Atrato del departamento del Chocó. El modelo MA difiere significativamente en proporción (Th, ThM y Iso) con valores superiores a (700 mm). El cálculo del volumen medio anual de aportación hídrica en cuenca fue de (18,298'125.000,00 m³), mediante método de isoyetas. La red pluviométrica debe estar constituida como mínimo por nueve estaciones pluviométricas, con un espaciamiento de 21 km; sin embargo, se recomienda prestar atención a la ubicación, instalación y operaciones de las estaciones. Se comprueba, que la variación del ciclo anual de la precipitación describe una distribución de tipo bimodal, con dos períodos máximos y un dos mínimo, siendo uno de estos mínimos más bien un mes de transición.

Palabras clave: Climatología; Precipitación areal; Estudio pluviométrico; Redes pluviométricas; Métodos y errores de medición.

ABSTRACT

The aim of the research is the estimation of rainfall was made through the arithmetic average models (MA) of Thiessen polygons (Th), isohyet (Iso) and modified Thiessen (THM). They also assessed the density of the network by analyzing the rainfall spatial distribution of rainfall, using information available in the upper basin of the Atrato River in the Department of Chocó. The model (MA) differs significantly in proportion (Th, THM and Iso) with values above (700mm). The calculation of the average annual contribution in Water Basin was (18,298'125,000.00m³) by isohyet method. Rainfall network should consist of at least nine rainfall stations with a spacing 21 km. But it is recommended to pay attention to the location, installation and operation of the stations. It is found that the variation of the annual cycle of precipitation describes a type of bimodal distribution, with two periods of maximum and a minimum two, with a minimum of one month rather transitional.

Keywords: Climatology; Areal rainfall; Pluviometric study; Rainfall networks; Method and error of estimation.

INTRODUCCIÓN

El departamento del Chocó representa una de las fuentes hídricas más importantes del mundo, gracias a la gran cantidad de lluvias que se genera en la zona. Además, la precipitación en el departamento alcanza fácilmente entre 8,000 y 12,000 milímetros

al año, ubicándola como una de las zonas más lluviosas del planeta. Como consecuencia de las altas precipitaciones, la región tiene una gran cantidad de ríos (potencial hídrico), de los cuales la mayoría se caracterizan por sus tramos relativamente cortos y de alto caudal (Ramírez & Bustos, 1977). Además, la región del Chocó es *epítome de la selva húme-*

* Grupo de Investigación en Energías Renovables y Meteorología, Universidad Tecnológica del Chocó y Docente Investigador, Departamento de Matemáticas y Física, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia.
e-mail: wmlopez@hotmail.com samostv@hotmail.com cmaxtor@hotmail.com
Fecha de recibido: Noviembre 18, 2008 Fecha de aprobación: Marzo 7, 2009



Figura 1. Delimitación del área de la cuenca alta del río Atrato en el departamento del Chocó, Colombia (recuadro)

da tropical desde el punto de vista físico natural (Gentry, 1990). De acuerdo con la terminología de las biozonas de Holdridge, es el único lugar del neotrópico en donde se encuentra el verdadero «bosque pluvial tropical».

Al mismo tiempo el potencial hídrico presente en el departamento del Chocó, hace necesario estudios que permitan el desarrollo y aprovechamientos de estas fuentes naturales, pues son casi inexistentes los trabajos o investigaciones sobre el cálculo de la precipitación media y la evaluación o diseños de redes meteorológicas y pluviométricas, que permitan obtener una estimación real de las lluvias en la zona.

Eslavas (1994) en su estudio *Climatología del*

Pacífico colombiano, presentó valores medios de precipitación para el departamento del Chocó, «mostrando altos volúmenes de lluvias que se presenta en la zona», utilizando la red de estaciones pluviométricas y meteorológica perteneciente al Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). De otro lado Pabón & Armando (2002), presentan una propuesta para el rediseño de la red meteorológica en Colombia para obtener la representatividad de los procesos meteorológicos de meso-escala y la diversidad climática del país, además de suplir la necesidad de observaciones y mediciones meteorológicas para otras áreas (hidrología, ecología, agronomía edafología, etc.).

En vista de lo anterior resulta conveniente la elaboración del presente estudio, el cual además de generar conocimiento sobre este tipo de temas en la región, sirve de soporte metodológico para próximas investigaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio. La cuenca alta del río Atrato está ubicada en el Departamento del Chocó, Colombia (Figura 1). La delimitación de la cuenca se realizó teniendo en consideración la línea divisoria de aguas, curvas de nivel, afluentes y ramificaciones de la cabecera del río Atrato, entre los 5° 21' a 6° de latitud norte y a los 76° 44' a 76° 06' de longitud oeste.

Datos e información. Para el desarrollo del presente trabajo, inicialmente se obtuvieron datos mensuales de precipitación en milímetro (mm) de siete estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio, pertenecientes al IDEAM (Tabla 1).

Además, dada la escasez de datos de temperatura del aire, se optó por utilizar los datos globales del proyecto Reanalysis «National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research» (NCEP/NCAR) (Kalnay *et al.*, 1996), que presenta información de series continuas de temperatura del aire desde 1953 hasta 2005, en dife-

Tabla 1
Estaciones meteorológicas del IDEAM ubicadas en el departamento del Chocó. Período de registro utilizado 1983- 2003

Nombre estación	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación (msn)
Bagadó	5° 43'	76° 42'	500
Lloró	5° 51'	76° 52'	90
San Nicolás	5° 59'	76° 13'	2350
El Piñol	5° 70'	76° 31'	715
Ap Quibdó	5° 70'	76° 64'	53
Tutunendo	5° 77'	76° 53'	54
Carmen de Atrato	5° 90'	76° 19'	1850

rentes niveles isobáricos incluyendo superficie para el área de estudio, siendo utilizado el período comprendido entre 1983 y 2003.

Tratamiento y consistencia de las series. Para la evaluación espacial de la precipitación en el área de estudio, primero se verificó la consistencia y la homogeneidad de las series durante el período escogido (1983-2003), es decir, comprobar que las estaciones hayan permanecido en las mismas condiciones sin cambiar el instrumental o que las condiciones del predio no hayan sido alteradas significativamente durante el período de observaciones escogido. Para detectar esta homogeneidad y consistencia se empleó el método de curvas de doble masa (MDM) doble acumulada (CDA) (Thomas, 1963 y Gabriels *et al.*, 2004) y la prueba de Rachas (Thom, 1966) para cada estación, garantizando así la calidad de la información. Luego se descartaron datos erróneos y posteriormente se realizó la estimación y complementación de datos faltantes en las series, utilizando el paquete estadístico TRAMO, que utiliza modelos ARIMA (modelos auto regresivos integrados de medias móviles (Guerrero & Nieto, 1999).

Estimación de precipitaciones areales. Para la evaluación de la red pluviométrica existente en el área de estudio y cálculo de las precipitaciones me-

Tabla 2
Modelos de estimación de precipitaciones areales

Media Aritmética

$$Pmj = \left(\frac{1}{n}\right) \left(\sum_{i=1}^n P_{ij}\right)$$

Isoyetas

$$Vm = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(Pi + 1 + Pi)}{2} \right] [S_{i+1,i}]$$

Polígonos de Thiessen

$$Pm_j = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i)(P_{ij})}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Thiessen Modificado

$$Pm_j = \sum_{i=1}^n (K_i)(P_{ij})(R_i)$$

$$K_i = \frac{\bar{P}_{ai}}{P_{ei}}$$

$$R_i = \frac{S_i}{S}$$

donde:

Pmj = Precipitación media del área en estudio en el tiempo j (mm)

P_{ij} = Precipitación de la estación i en el tiempo j (mm)

n = Número de estaciones de precipitación en análisis

S_i = Superficie de influencia de la estación i (km²)

Vm = Volumen medio de aportación (m³)

P_{i+1} = Precipitación de la isoyeta $i+1$ (m)

P_i = Precipitación de la isoyeta i

$S_{i+1,i}$ = Superficie comprendida entre dos isoyetas secuenciales (m²)

R_i = Constante de proporcionalidad de superficies

K_i = Constante de proporcionalidad de precipitaciones de la estación i

Pai = Precipitación media del área de influencia de la estación i

Pei = Precipitación media de la estación i

S = Superficie total del área en estudio

dias areales, se utilizó la metodología propuesta por (Gandin, 1970 y Kagan WMO, 1966), aplicándose los modelos de estimación MA, Th, ISO y ThM (Tabla 2). Igualmente para el cálculo de la precipitación media fue necesario medir el área de la cuen-

Tabla 3
Ecuaciones de correlación espacial y determinación de la densidad de la red pluviométrica utilizando los criterios de error de la lluvia media y la interpolación espacial

<p>Error cuadrático medio relativo (Z_1)</p> <p>Ecuación 1</p> $Z_1 = Cv \sqrt{\frac{1 - \rho(o) + 0.23 \frac{\sqrt{S}}{do\sqrt{n}}}{n}}$
<p>Error relativo de interpolación lineal (Z_3)</p> <p>Ecuación 2</p> $Z_3 = Cv \sqrt{\frac{1}{3} [1 - \rho(o)] + 0.52 \frac{\rho(o)}{do} \sqrt{\frac{S}{n}}}$
<p>Función de correlación espacial</p> <p>Ecuación 3</p> $\rho(d) = \rho(o) \cdot e^{-d/do}$
<p>Espaciamiento entre estaciones (L)</p> <p>Ecuación 4</p> $L = 1.07 \sqrt{\frac{S}{n}}$

donde:

- Z_1 = Error cuadrático medio relativo
- Z_3 = Error relativo de interpolación lineal
- L= Espaciamiento entre estaciones
- $\rho(d)$ = Función de correlación espacial
- d_0 = Radio de correlación
- d = Distancia entre estaciones
- Cv= Coeficiente de variación promedio de todas las estaciones
- $\rho(o)$ = Coeficiente de correlación
- S= Área total de la cuenca en estudio
- n= Número de estaciones

ca, para lo cual se utilizó un planímetro electrónico digital marca Planix. 5 «Tamaya» con una resolución de 0.1 cm² y una precisión de ± 0.2%.

Evaluación del error e interpolación espacial de la precipitación media. Para el cálculo del error con el cual se estima la precipitación media en la cuenca alta del río Atrato, se utilizó las ecuaciones propuestas por Kagan, (1966), las cuales se basan en la representatividad de las estaciones en el área

de estudio y la precisión de la lluvia promedio. Ello se evaluó mediante el error cuadrático medio relativo (Z_1) ecuación 1 (Tabla 3). Esta ecuación permite determinar el número de estaciones n , para un nivel de error (Z_1) predeterminado y viceversa, conociendo los términos y $\rho(o)$. La ecuación 3 (Tabla 2), representa el error relativo (Z_3) asociado con una interpolación lineal entre dos puntos, o de una interpolación respecto centro de un triángulo, donde se presenta el máximo error posible, dado por Kagan para una distribución triangular.

Para la evaluación de Z_1 y Z_3 , primero se seleccionó como información básica, los datos de lluvias mensuales de 7 estaciones que disponen de información (período 1983-2003). Luego se calcularon las distancias entre estaciones y los coeficientes de correlación cruzada entre ellas para los períodos anuales; después se clasificaron los coeficientes de correlación para los rangos de distancia. Con base en la información adquirida como se indica en los pasos anteriores, se estableció la función de correlación espacial teórica para cada período de estudio dada en la ecuación 3, de la cual se obtuvieron los parámetros $\rho(o)$ y d_0 . Después de haber obtenido los parámetros y el área A , se utilizaron las ecuaciones 1, 2 y 3 para determinar Z_1 , Z_3 y el espacimento (L), respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cálculo de la precipitación media. Los resultados de los valores de precipitación media en la cuenca alta del río Atrato mediante el cálculo de la MA, Th, ISO y ThM, apreciándose que la precipitación estimada por la MA presentó el mayor valor con 6.711,7 mm y un gran margen de diferencia respecto a los otros tres modelos. Igualmente se aprecia que el modelo de ISO presentó el menor valor de precipitación media con 5 877,7 mm, mientras que el de Th y ThM fueron 6.029,1 mm y 5951,7 mm.

Los valores promedios de las áreas en km² obtenidos a través de los cuatro modelos en la cuenca

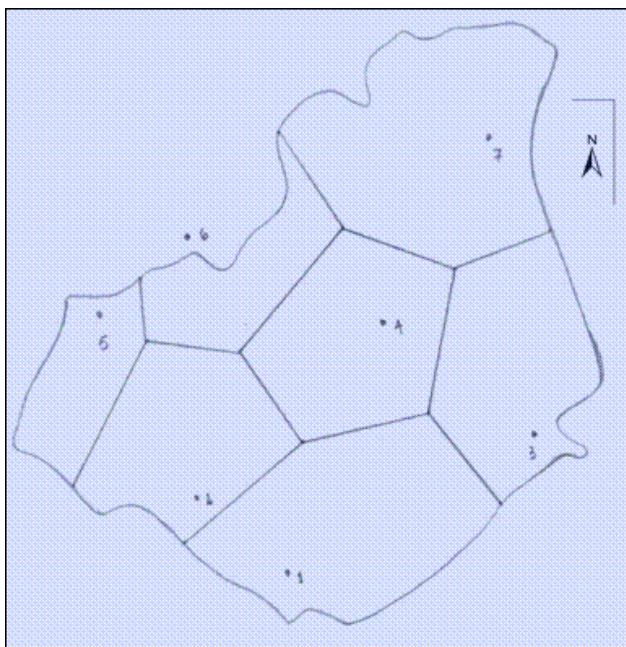


Figura 2. Área de representatividad para cada estación en la cuenca del río Atrato a través del método polígonos de Thiessen modificados. 1. Bagadó, 2. Lloró, 3. San Nicolás, 4. El Piñol, 5. Ap Quibdó, 6. Tutunendo, 7. Carmen de Atrato

son: el promedio del área total de la cuenca fue 3.118,90 km², siendo 3.120,00 km² el máximo valor medido directamente con el instrumento, y 3.117,50 km² el mínimo valor calculado con los PhM.

Método de isoyetas 3.118,70

En la Figura 2 se observa la distribución de las áreas modificadas, la ubicación de las estaciones sobre la cuenca y el área representatividad que obtiene cada una de ellas, a través del método ThM, para el cual se obtuvo un valor de (5.951,70 mm). De acuerdo con la (Tabla 4), la estación de Bagadó (A1) fue la que presentó el mayor área de representatividad con (580 km²), mientras que la estación de Tutunendo (A6), presentó el menor área con (238,75 km²). Igualmente se encuentra que la estación de Tutunendo fue la que presentó el mayor registro de precipitación media con un valor de (11.233,20 mm), mientras que la estación del Carmen de Atrato registró el menor valor con (2.473 mm).

Tabla 4
Áreas de representatividad para cada estación con la técnica ThM y la precipitación media

Método de polígonos de Thiessen modificado			
Nº	Estación	Área km ²	Precipitación media en (mm)
A1	Bagadó	580,00	7.701,00
A2	Lloró	381,25	7.739,00
A3	San Nicolás	476,25	2.520,00
A4	El Piñol	463,75	7.663,30
A5	Ap Quibdó	248,75	7.652,50
A6	Tutunendo	237,50	11.233,20
A7	Carmen de Atrato	730,00	2.473,00
Total		3.117,50	6.711,70

Al utilizar el método ISO (líneas trazadas en un plano que representan puntos de igual valor) (Figura 3) se aprecia que el régimen de precipitación aumenta hacia el occidente de la cuenca, donde se encuentran ubicadas las estaciones del AP-Quibdó y Tutunendo y disminuye hacia el Nor-oriente (Carmen de Atrato). El mapa de ISO se realizó para la cuenca considerando los datos de precipitación media de cada una de las estaciones. Aplicando la ecuación 2 para las áreas y las precipitaciones medias resultantes del método ISO (Tabla 5, se obtiene un valor de precipitación media para la cuenca del río Atrato de 5.877,70 mm en un área de 3.118,70.

La Tabla 5 muestra los datos de las 10 áreas resultantes del método ISO, siendo la zona A1 la de mayor área de representatividad con (1.172,50 km²), mientras que la región A7 fue la que presentó el menor área de representatividad con (40 km²). En cuanto a las precipitaciones medias resultantes, la zona A11 es la de mayor cantidad de precipitación media con (9.500,00 mm) de lluvia, siendo además la de mayor intensidad y la región A7 y A9 las que presenta menor cantidad de precipitación con 1,500 mm.

Tabla 5
Precipitación media y áreas obtenidas
a través de la técnica ISO

Método ISO		
Nº	Precipitación media (mm)	Área km ²
A1	7.500	1.172,50
A2	6.500	420,00
A3	5.500	332,50
A4	4.500	307,50
A5	3.500	315,00
A6	2.500	112,50
A7	1.500	40,00
A8	2.500	140,00
A9	1.500	93,75
A10	8.500	130,00
A11	9.500	55,00
Totales	5.877,7	3.118,70

De las cuatro técnica aplicadas para el cálculo de la precipitación media en el área de estudio cuenca alta del río Atrato en el departamento del Chocó resultó que la MA difiere significativamente de las otras técnicas con valores superiores a los 700 mm. Esto puede ser por la poca precisión que posee el método de MA en muchas ocasiones. En nuestro caso en particular, pudo haber afectado en esta técnica la cercanía del área de estudio con la cordillera. En cuanto a las técnicas polígonos de Thiessen, isoyetas y polígonos Thiessen modificado, estas no presenta diferencias significativas entre los valores de precipitación media, mostrando una mejor aproximación de esta variable en la zona. Por otro lado el cálculo del volumen medio anual de aportación hídrica en el área de estudio fue de 18.298'125.000,00 m³ mediante método de ISO.

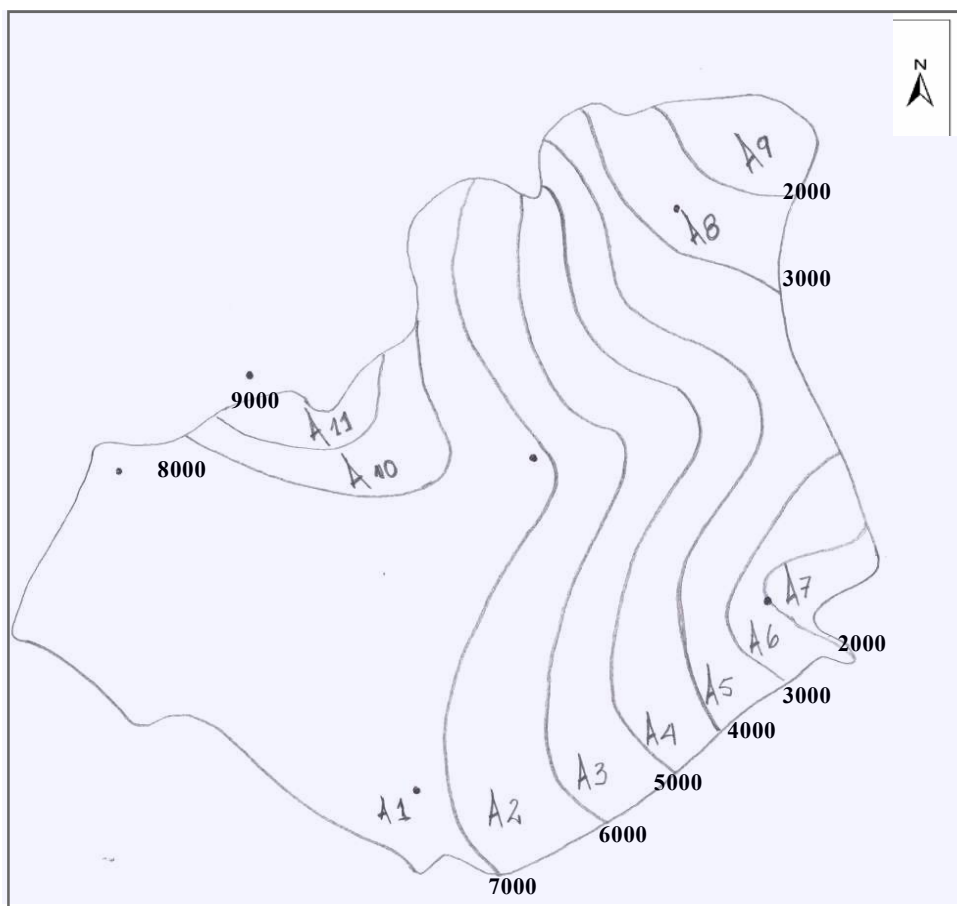
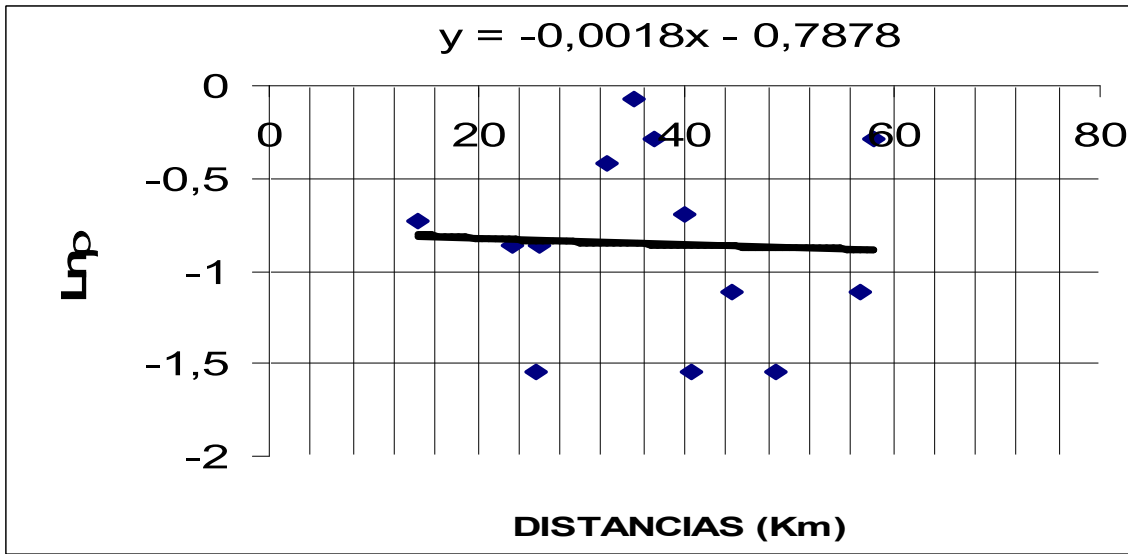


Figura 3. Trazado ISO sobre la cuenca del río Atrato

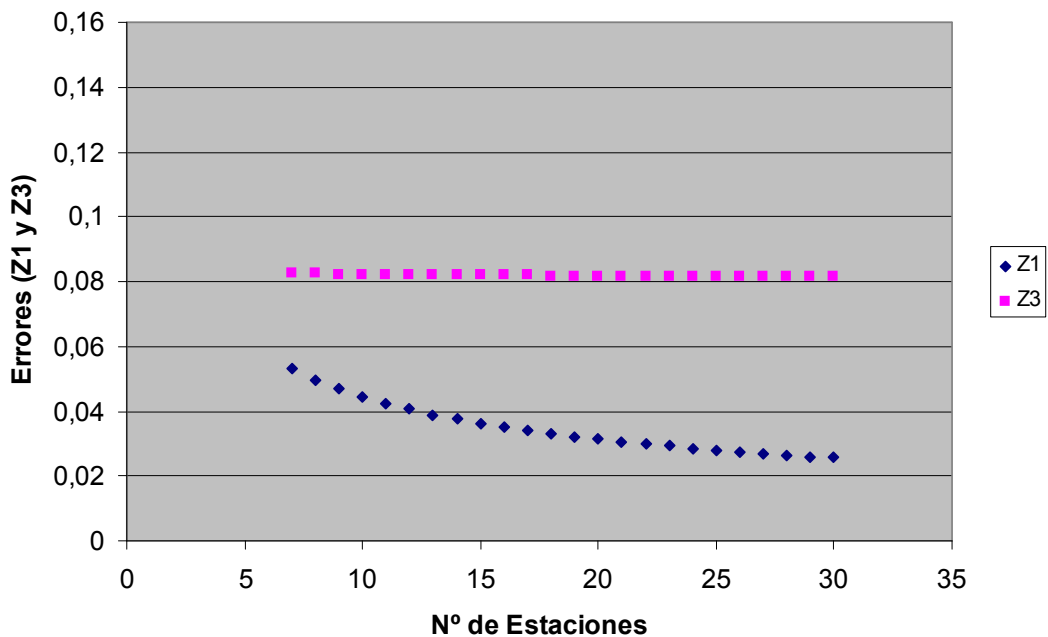


Gráfica 1. Relación entre el coeficiente de correlación y la distancia para cada par de estación del área de estudio, presentando la ecuación de la recta $y=ax+b$, aplicando la función estructural Kagan (1966)

Tabla 6
Valores de los errores Z1 y Z3, con un n=7 estaciones en la cuenca del río Atrato

Errores	Valor	%
Z1	0,053	5
Z3	0,082	8

Evaluación de la red pluviométrica en la cuenca y cálculo del error para la precipitación media. La función estructural propuesta por Gandin (1970) y Kagan (1972) ecuación 3, se obtienen valores para $\rho(o)=0,45$ y $d_o=555,50$, siendo $=Exp(-0,7878)$ y $d_o = -1/(-0,0018)$, que presenta una relación exponencial entre las correlaciones de las estaciones y la distancia de cada estación. Esta ecuación



Gráfica 2. Estimación de los errores Z1 y Z3 para la cuenca Río Atrato, en relación con el número de estaciones

Tabla 7
Radios de representatividad (L) para cada estación en la cuenca del río Atrato para un Z₃ de 30%, 20% y 15%

Estación	CV	Z ₃ =30% L (km)	Z ₃ =20% L (km)	Z ₃ =15% L (km)
Bagadó	0,12	16.150,47	6.926,34	3.697,89
Lloró	0,16	2.154,84	706,06	198,98
San Nicolás	0,15	5.146,18	2.035,54	946,82
El Piñol	0,27	3.935,93	1.497,65	644,26
AP Quibdó	0,48	19.013,86	8.198,95	4413,74
Tutunendo	0,22	6.495,09	2.635,06	1284,05
Carmen de Atrato	0,15	5.146,12	2.035,52	946,80

Tabla 8
Radios de representatividad (L) en kilómetros para un Z₃ entre 7% y 8%

Estación	L en kmZ ₃ = 6%
Bagadó	211,20
AP Quibdó	325,70

ción es transformada a través del logaritmo para obtener la relación lineal y la ecuación de la recta (Gráfica 1).

Vale decir que en esta función estructural cumple la condición que a mayor distancia entre las estaciones la correlación es menor. Igualmente la Gráfica 2 muestra la ecuación de la recta para $y = -0,0018x - 0,7878$ en relación con la ecuación 3.

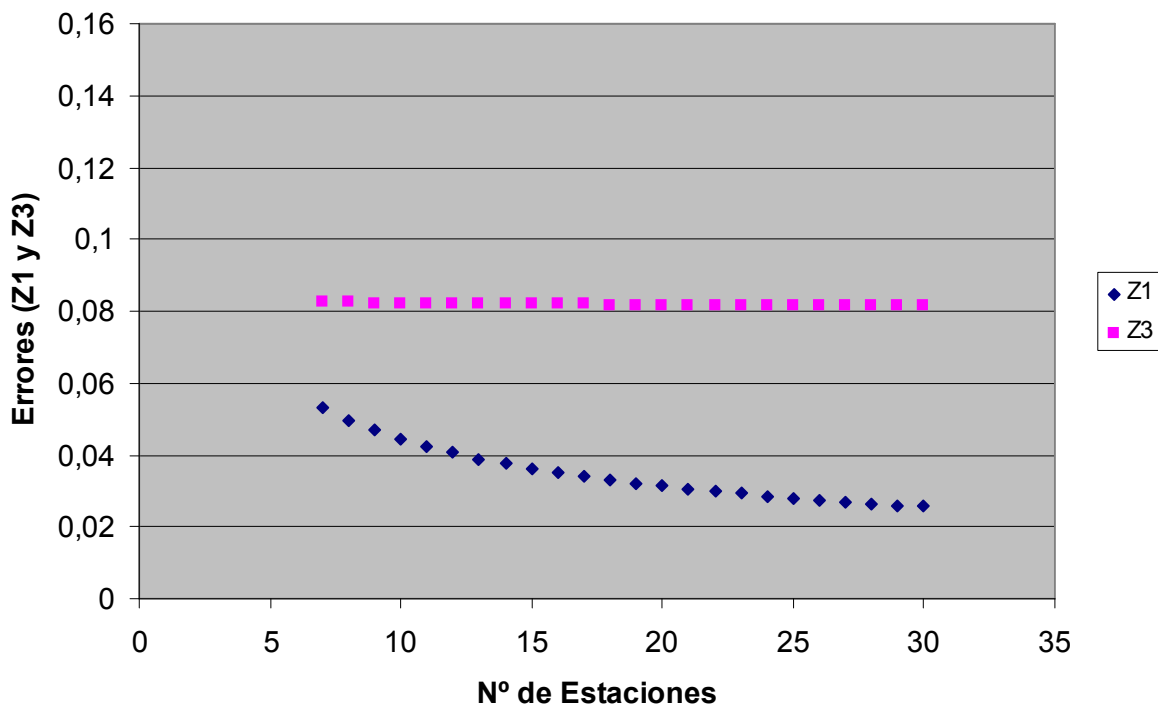
Además, el área de estudio de la función estructural propuesta por Gandin (1970) y Kagan (1972), presentó algunas dificultades porque se debió excluir una estación que presentaba correlaciones negativas y como se puede observar, la nube de puntos representada por la Gráfica 1), muestra una dispersión entre los puntos; sin embargo, con estas dificultades se pudo estimar los errores (Z_1 y Z_3) para la precipitación media en la cuenca del RíoRiorío Atrato (Tabla 6).

Como se puede observar en la Tabla 6, Z_1 presenta

el error con el cual se estima la precipitación sobre toda la cuenca del río Atrato y es tan sólo de 5%, mientras que el Z_3 fue del orden de 8%, un valor apropiado tratándose de estas variables. En muchos estudios se recomienda que para ser aceptable el error Z_1 debe estar por debajo de 20%. De otro lado, se realizó una estimación de los errores Z_1 y Z_3 , variando el número de estaciones necesaria (Gráfica 2) con el fin de saber cuál es el número de estaciones (n) conveniente para estimar la precipitación media en la cuenca del río Atrato con un error (Z_1 y Z_3) aceptable.

Por otro lado la Gráfica 2 muestra como a medida que se aumenta el número de estaciones (n) en el área de estudio, disminuyen los errores Z_1 y Z_3 . Esto errores siguen disminuyendo hasta lograr cambios poco significativos con el aumento de n; además se puede observar cómo la variación es más significativa en Z_1 que en Z_3 .

Radio de representatividad. Utilizando la ecuación 4 se calculó el radio de representatividad del espaciamiento (L), para cada una de las estaciones en la cuenca del río Atrato, para un error Z_3 (Tabla 7). Como se puede observar, los valores Z_3 correspondiente al 30%, 20% y 15%, de la estación de Lloró presentaron los menores radios de representatividad (L) dentro del área de estudio. También se observa, cómo la estación de AP Quibdó obtiene



Gráfica 3. Radio de representatividad (L) en la cuenca del río Atrato para distintos Z₃, variando los Cv

los mayores valores de L, siendo esta la estación más representativa en la cuenca. Para la cuenca del río Atrato, se encontró que con un Z₃ de 6%, las estaciones de AP Quibdó y Bagadó, obtienen radios de representatividad grandes (Tabla 8), y para obtener valores de L en las 7 estaciones se debe emplear un Z₃ ≥ 12%.

La Tabla 8 muestra que los radios de representatividad para el cálculo de la precipitación media en la cuenca del río Atrato, de las estaciones AP Quibdó y Bagadó, con un error Z₃ de 6%, los cuales logran una cobertura total del área de estudio, siendo los radios (L) de estas dos estaciones demasiado grandes. Estos resultados indican que la red pluviométrica existente necesita contar con dos estaciones más, ubicada en las coordenadas de las estaciones de Bagadó y San Nicolás (estaciones generadas), con el fin de obtener una cobertura total en la cuenca, y así tener una estimación de la precipitación media en la zona, acorde con la realidad.

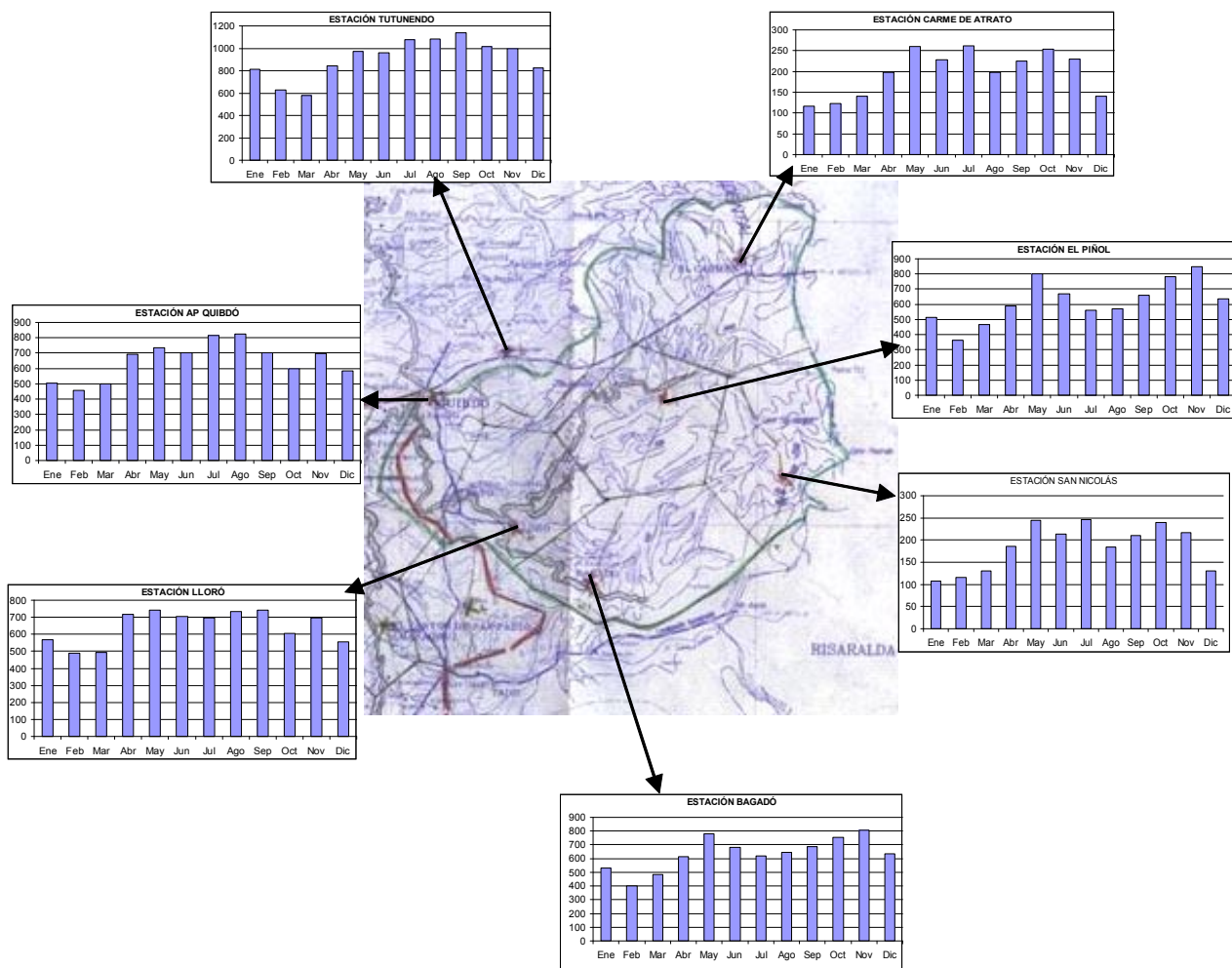
De otro lado, se calculó de espaciamiento (L) para

los errores Z₃ de 6%, 10%, 15%, 20%, 30% y 50%, con distintos valores de Cv (coeficiente de variación) en el área de estudio (Gráfica 3). Se encuentra que a medida que el error Z₃ aumenta para un mismo Cv el radio de representatividad L es mayor. Dicho en otras palabras, si aumenta el error con el que se va a calcular la precipitación media en una estación, el radio de representatividad de dicha estación también aumenta.

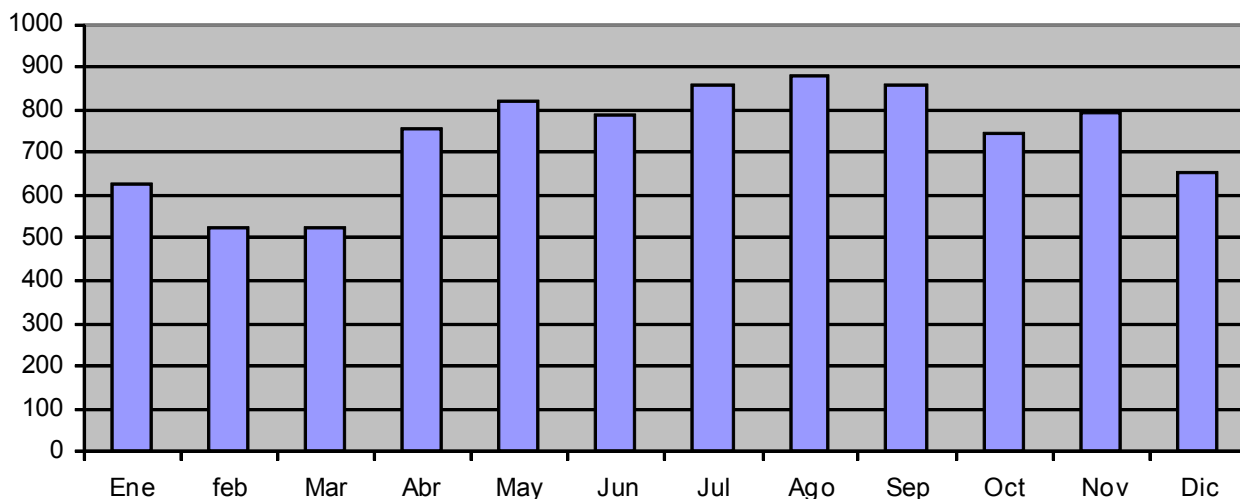
Comportamiento de la precipitación en la cuenca alta del río Atrato. La Tabla 9 y la Gráfica 4 muestran el comportamiento típico de la precipitación acumulada obtenida por los valores medios mensuales para la cuenca alta del río Atrato durante el período 1983-2003, para cada una de las estaciones dentro del área de estudio cuyo orden se encuentra denotado de la siguiente forma: 1. Bagadó, 2. Lloró, 3. San Nicolás, 4. El Piñol, 5. AP Quibdó, 6. Tutunendo, 7. Carmen de Atrato. La cuenca alta del río Atrato en general presenta una precipitación media de 6,711.7 mm (MA de todas las estaciones).

Tabla 9
Precipitación media mensual en mm, durante el período 1983-2003, para las estaciones de la
cuenca alta del río Atrato

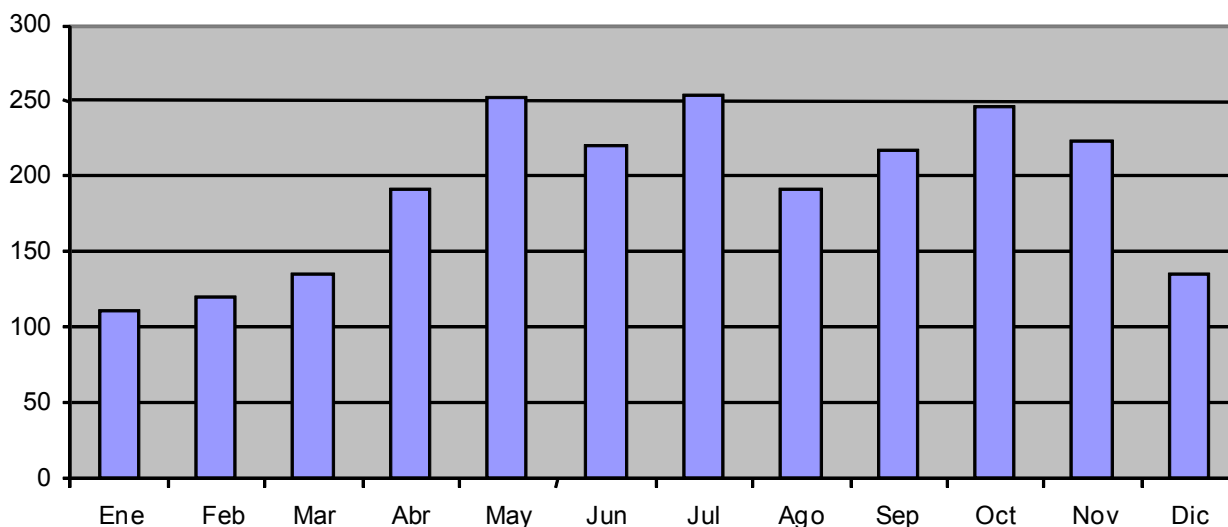
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Bagadó	530,6	401,8	485,8	614,3	781,6	680,8	620,8	644,4	684,5	755,0	806,0	636,8
Lloró	566,9	489,4	494,5	715,6	741,8	703,3	696,5	732,1	741,5	606,1	696,2	555,2
San Nicolas	106,9	115,0	130,7	185,4	244,9	214,1	246,3	184,4	210,6	238,9	216,6	130,4
El Piñol	514,2	362,2	467,2	589,9	800,9	669,2	561,3	568,8	658,6	783,2	850,5	638,4
Ap Quibdó	505,9	458,6	498,2	690,8	736,5	704,3	814,0	826,7	701,0	598,1	697,8	584,3
Tutunendo	811,9	628,3	579,5	843,9	975,3	959,1	1074,3	1082,1	1137,9	1018,0	994,3	826,0
Carne de Atrato	116,1	123,6	140,2	198,0	260,0	228,0	261,7	198,6	224,8	253,4	230,6	141,0



Gráfica 4. Distribución espacial de la precipitación media mensual en la cuenca del río Quito, durante el período 1983-2003. 1. Bagadó, 2. Lloró, 3. San Nicolás, 4. El Piñol, 5. AP Quibdó, 6. Tutunendo, 7. Carmen de Atrato



Gráfica 5. Valores medios mensuales de precipitación acumulada en zona alta de la cuenca alta del río Atrato años 1983-2003



Gráfica 6. Valores medios mensuales de precipitación acumulada en zona oriental de la cuenca alta del río Atrato años 1983-2003

Como se puede apreciar la precipitación media mensual en todas las estaciones presenta un comportamiento de tipo bimodal durante el año, siendo menos marcados en Lloró, Apto Quibdó y Tutunendo (zona baja). Además su primer máximo se encuentra entre los meses de abril y mayo, y su primer mínimo entre los meses de enero y febrero, siendo febrero el de menor valor para todas, a excepción de Tutunendo en abril. El segundo máximo se encuentra entre los meses de julio y agosto, agosto para las estaciones de AP Quibdó, Tutunendo y Lloró, en cambio para el resto de estaciones este co-

mienza entre los meses de septiembre y octubre.

Este comportamiento de tipo bimodal que se registra en la cuenca, puede estar relacionado con el doble desplazamiento latitudinal de la zona de confluencia intertropical sobre nuestro país (Eslava 1994). Las mayores precipitaciones que se registran en la cuenca se presentan al occidente, a una altitud menor de 800 metros (en la zona baja), mientras que al oriente de la cuenca (parte alta) el régimen de precipitación decrece considerablemente con la altura hasta en 72% en comparación a la zona baja. Las mayo-

res precipitaciones anuales en la zona de estudio son registrados en la estación de Tutunendo con valores de 1093,60 mm, seguido de la estación Apto de Quibdó con valores de 7816,2 mm. Las menores cantidades de precipitación anual se presentan en la estación del Carmen del Atrato con valores de 2376,10 mm.

En la zona occidental de la cuenca (Gráfica 5) las dos temporadas lluviosas que se presentan, demuestran porcentualmente diferencias significativa que hay que tener en cuenta, en la primera temporada lluviosa, cerca de 60% de la precipitación total anual; en cambio en la segunda temporada lluviosas sólo se presenta 10% (transición); en la temporada menos lluviosa (enero-marzo) sólo se presenta 20% de la precipitación total anual, y en la segunda temporada que cubre sólo un mes (octubre) se presenta 9% del total anual; este mes se puede considerar como una temporada de transición entre dos períodos más lluvioso para la zona occidental de la cuenca. Con respecto a la zona oriental, la primera temporada lluviosa sólo representa 40% de la precipitación total anual; en cambio, en la segunda temporada lluviosa se presenta 30%; en la temporada de menos lluvia (enero-marzo) se presenta 16% de la precipitación total anual, y en la segunda temporada que cubre agosto septiembre 18% del total anual (Gráfica 6).

En promedio para las estaciones del occidente de la cuenca, los valores máximos no superan los 1137,9 mm de lluvia y los valores mínimos están por encima de los 362 mm de lluvia; en cambio para la zona oriente los valores máximos no superan los 260 mm y los mínimos no bajan de 106 mm (Tabla 9).

CONCLUSIONES

La precipitación media en la cuenca del alta del río Atrato, presenta valores de 6711,7, 6029,1, 5951,7 y 5877,7 mm, a través de los modelos media aritmética, Poligonos de Thiessen, Thiessen modificado e isoyetas de forma respectiva. Se encuentra

que las diferencias entre estos tres últimos valores no son significativas, exceptuando el valor presentado por media aritmética, el cual supera en más de 830 mm al de isoyeta. De otro lado las diferencias respecto a las otras técnicas no superaron los 151 mm.

El error Z_1 (error con el cual se estima la precipitación en un área determinada) fue 5%, siendo apropiado tratándose de esta variable. Se evidenció que la red pluviométrica de la cuenca alta del río Atrato, para poder suministrar la suficiente información básica, debe estar constituida como mínimo por 9 estaciones pluviométricas, con un espaciamiento de 21 km. Vale afirmar que para obtener este valor se deben utilizar o implementar estaciones pluviométricas en las coordenadas de las estaciones (Bagadó y San Nicolás «estaciones con valores estimados»), lo que indica que es necesario ampliar la red pluviométrica actual, ubicando dos estaciones en dichos puntos para obtener una mejor representación de la precipitación media en el área de estudio.

Se encontró que con las estaciones AP Quibdó y Bagadó se obtiene una total cobertura de la cuenca del río Atrato, a través sus radios de representatividad, para un error Z_3 de 7% (el error con el cual se calcula la precipitación para un punto determinado) en la estimación de la precipitación media. Para realizar una estimación espacial de la precipitación media en la cuenca del río Atrato con las 7 estaciones, se debe emplear un error Z_3 mayor a 15%, en el cual todas las estaciones obtendrán radios de representatividad logrando una cobertura total de la cuenca.

Se comprueba, que la variación del ciclo anual de la precipitación describe una distribución de tipo bimodal, con dos períodos de valores máximos y un dos mínimo, siendo uno de estos mínimos más bien un mes de transición. En cambio para las estaciones de la zona oeste o parte alta encontramos dos períodos máximo y dos períodos mínimos muy

bien definidos. Se encontró que las mayores precipitaciones que se generan en la cuenca, se presentan en la zona baja hasta en 75% en promedio, mientras que la zona alta recibe sólo 25% del promedio total.

Se evidencia que las mayores cantidades de precipitación se presentan en los meses de agosto, junio y julio, y septiembre en la zona baja, mientras que en la zona alta en los meses de mayo a julio en promedio. Con respecto a los valores mínimos, ambos reciben las menores cantidades en el mes de febrero y marzo, siendo febrero el mes con menor cantidad de precipitación sobre la cuenca, y el segundo valor mínimo se presenta en el mes de octubre en la zona baja y en agosto en la zona alta, siendo un período de transición para ambas zonas con respecto a la segunda temporada de mayor cantidad de precipitación. Igualmente se comprueba que la estación de Tutunendo fue la que presentó los mayores valores de precipitación seguido de la estación AP Quibdó, y las menores en la estación Carmen de Atrato.

LITERATURA CITADA

- Eslava J.A.** 1994. *Climatología del Pacífico colombiano*. Colección Eratóstenes, N° 1, Santa Fe de Bogotá DC: Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas. 79 p.
- Gandin, L.** 1970. *The planning of meteorological station networks*. Technical Note N° 111. Geneva: WMO. p. 149.
- Gentry, A.** 1990. Selva húmeda tropical. En: Villegas B. (ed.) *Selva Húmeda de Colombia*. Bogotá, DC: Villegas Editores. p. 13-52.
- Guerrero, V.,** Nieto, F.H. 1999. Temporal and contemporaneous disaggregation of multiple time series. *Test*. **8** (2): 459-89.
- Gabriels, D.,** Ovalles, F., Santibáñez, F., Moyano M.C., Aguilera, Raúl., Pizarro, R., *et al.* 2004. *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe*. París: CAZALAC ORG. p. 1-59.
- Kalnay E.,** M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc.* **77**: 437-71.
- Pabón J.D.,** Saavedra H.A. 2002. Propuesta para el rediseño de redes meteorológicas en Colombia. *Rev Meteorol Colomb.* **5**: 123-9.
- Ramírez, A.,** N. Bustos. 1977. *Estudio preliminar de precipitación y caudales medios en la vertiente del Pacífico*. Fund. Univ. Bogotá «Jorge Tadeo Lozano», Facultad de Ingeniería Geológica (proyecto de grado).
- Searcy, J. K.,** Hardison C. H. 1960. *Double mass curves*. US Geological Survey, Water-Supply Paper 1541-B. p. 66.
- Reynolds, R.,** J., D. Joseph. 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc.* **77**: 437-71.
- Trojer, H.** 1958. Meteorología y climatología de la vertiente del Pacífico colombiano. *Rev Acad Colomb Cie Ex. Fis Nat.* **10** (40): 199-219.
- Thom, H.C.S.** 1966. *Some methods of climatological analysis*. Technical Note N° 81. WMO N° 199. 53 pp.
- Tukey, J.W.** 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.