

VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN A DIFERENTES ESCALAS DE TIEMPO: Caso Zona embalse El Peñol-Antioquia (2000-2002)

Luis F. Carvajal, Luis A. Serna y Bibiana Osorio

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

lfcarvaj@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 03 de Junio de 2005 / Aceptación: 25 de Agosto de 2005 / Recibida versión final: 30 de Agosto de 2005.

RESUMEN

Se trabaja la caracterización espacial y particularmente temporal de la lluvia, y la relación a diferentes escalas de tiempo: 15 minutos, horaria y diaria, en 6 estaciones de la zona del embalse del Peñol-Antioquia. Además, se busca entender que frecuencias y fenómenos climáticos pueden estar presentes en cada escala de tiempo. Se aplicaron tres técnicas de análisis de series de tiempo: Transformada rápida de Fourier, Onditas (wavelets) y Análisis de Componentes Principales. Los resultados muestran que el ciclo de la precipitación diaria es unimodal, y se tienen períodos importantes del ciclo semianual. También períodos de 30 a 60 días correspondientes a las ondas de Madden Julian y de 4 a 6 días correspondiente a las ondas del este.

PALABRAS CLAVES: Variabilidad Espacial Precipitación, Variabilidad Temporal Precipitación, Análisis de Frecuencia, Transformada Rápida de Fourier, Onditas, Análisis de Componentes Principales.

ABSTRACT

This study shows the temporal and spatial variability of precipitation. It focused in temporal variability by using precipitation series with intervals of 1 day, 1 hour and 15 minutes for 6 rain stations. It looks for frequencies and climatic phenomena associated in each time scale. The applied methodology included three methods for time series analysis with Fast Fourier Transform, Wavelet decomposition and Principal Component Analysis. The results show semiannual cycle, periods of 30 to 60 days associated with Madden Julian waves and 4 to 6 days periods associated with east waves.

KEY WORDS: Precipitation Spatial Variability, Precipitation Temporal Variability, Frequency Analysis, Fast Fourier Transform, Wavelets, Principal Component Analysis.

1. INTRODUCCIÓN

Se presenta y analiza la variabilidad espacial y temporal de la precipitación mediante el uso de herramientas de carácter estadístico y de análisis de series de tiempo para caracterizar las frecuencias presentes en cada uno de los intervalos de tiempo considerados.

La aplicación se hizo a series de tiempo de intervalo diario, horario y de 15 minutos, en cada una de las estaciones de precipitación seleccionadas. La zona de estudio es una de las zonas de más alta pluviosidad en Colombia, entre 3000 y 5000 mm/año, con un área de 720 km² aproximadamente (120 km² /estación). En esta zona está ubicado el embalse del Peñol, el cual tiene una gran importancia en el Sistema Eléctrico Nacional, ya que es el único embalse de regulación anual del país y es fundamental en la confiabilidad del sistema, el cual tiene una componente hidráulica del 68 % y una componente térmica del 32%. Los registros de precipitación provienen de 6 estaciones con pluviómetros de cazoletas basculantes y telemetría (ver Tabla 1 y Figura 1). Esta información fue suministrada por las Empresas Públicas de Medellín y su programa de automatización de estaciones.

En estudios recientes se han hecho análisis en la zona de los Andes de Colombia (Poveda et al, 2005 y Poveda et al, 2003) en el cual se describe el comportamiento a nivel horario de la precipitación usando metodologías como Transformada de Fourier y onditas. Además se ha evidenciado la influencia directa de macrofenómenos atmosféricos sobre el ciclo diurno, como: El Niño Oscilación del Sur, Ondas del Este, Ondas de Madden Jualan. También se han realizado estudios de frecuencia con onditas a series de precipitación mensual y diaria (Hoyos, 1999).

Este trabajo muestra en la primera parte el comportamiento estadístico de la precipitación, luego un análisis de frecuencias y variabilidad del campo de la precipitación y por último los análisis de resultados y las conclusiones.

2. INFORMACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD

Las series de precipitación con intervalo de 15 minutos comprenden el período de enero de 2000 a mayo de 2002. A partir de la serie de 15 minutos, se construyeron las series horarias y diarias. Como un trabajo inicial se realizó el análisis de homogeneidad de la información para verificar la calidad de esta. Para este análisis se completaron las series con datos de precipitación mensual de enero de 1991 a diciembre de 1999. Para esto se aplicaron a las series de precipitación mensual un total de 5 pruebas que comprenden los aspectos de cambio en la media, cambio en la varianza y tendencia (ISA-UNAL, 1995; Salas et al, 1992), con un nivel de significancia del 5% y considerando un posible punto de cambio en enero de 2000, momento en el cual empezó la telemetría. Como conclusión general se encontró que la información de precipitación es consistente en la media, varianza y no se presenta tendencia, por lo tanto se considera que las series son homogéneas. Es importante considerar que aunque en Colombia se han encontrado evidencias de cambio climático, la información que se utilizó no se puede considerar representativa para concluir acerca de la existencia de una tendencia en la precipitación de la zona. También se ha encontrado que la precipitación en Colombia no presenta una tendencia de cambio definida (Mesa et al, 1997). En general el análisis de homogeneidad permite concluir que el cambio de equipos de medición no alteró los registros de precipitación.

TABLA 1. Información general de las estaciones empleadas-zona embalse El Peñol (Fuente Empresas Públicas de Medellín)

ESTACION	CODIGO	TIPO	MUNICIPIO	COTA msnm	COORDENADAS		LONGITUD REGISTRO
					X (m)	Y (m)	
Corrientes	2308044	PG	San Vicente	1980	1°189.270	868.970	Ene-90, may-02
Bizcocho	2308061	PG	San Rafael	1070	1°189.710	888.920	Ene-90, may-02
Tocaima	2308084	PG	Alejandría	1570	1°194.150	886.020	Ene-90, may-02
Río Abajo	2308034	PG	San Vicente	2070	1°181.920	863.540	Ene-90, may-02
Santa Rita	2308505	PG	Alejandría	1900	1°190.300	879.600	Ene-90, may-02
El Peñol	2308517	PG	El Peñol	1920	1°181.185	874.885	Ene-90, may-02

PG: estación pulviográfica
De enero de 1990 a diciembre de 1999 la información de precipitación es mensual y de enero de 2000 a mayo de 2002 la información es tomada cada 15 minutos.

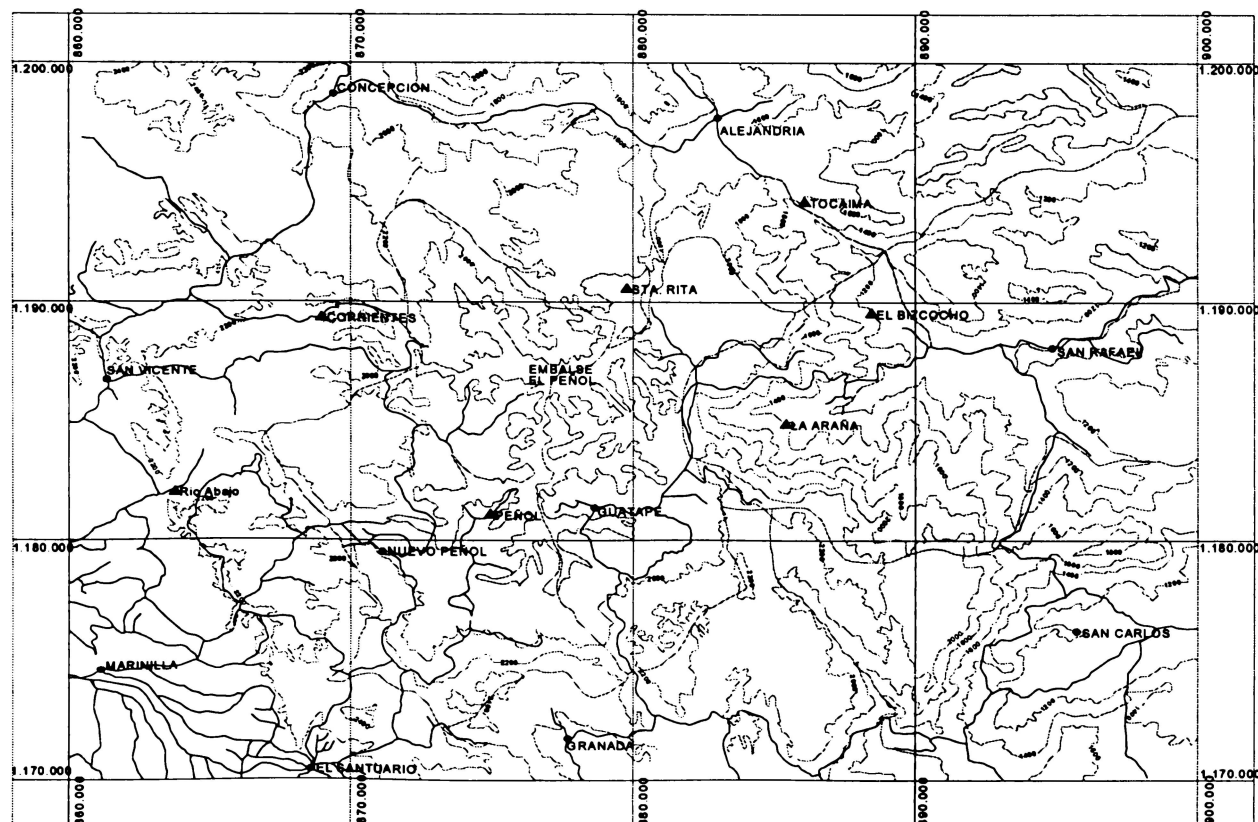


FIGURA 1. Localización de la zona de estudio y de las estaciones de registro de precipitación
(Fuente del mapa digital: Cornare).

3. COMPORTAMIENTO ESTADÍSTICO DE LA PRECIPITACIÓN

Para cuantificar la variabilidad de la precipitación se calcularon los histogramas de frecuencia acumulados de la intensidad de la lluvia y del número de intervalos de ocurrencia de la intensidad para las diferentes escalas de tiempo en las 6 estaciones, ver Figura 2 (como ejemplo se presenta la estación Río Abajo para el intervalo horario y de 15 minutos). También se calcularon las gráficas de fracción de tiempo de lluvia vs precipitación a nivel horario y de 15 minutos, ver Figura 3 (caso horario), e igualmente se graficó el ciclo diario de la lluvia para el intervalo horario y de 15 minutos (Cutrim et al, 2002). Los resultados muestran que a nivel horario en las estaciones Río Abajo, Tocaima, Santa Rita, Peñol y Bizcocho las intensidades de hasta 2 mm/h tienen una frecuencia relativa del 80%; y para la estación Corrientes es de un 70%. Las intensidades entre 2 y 10 mm/h tiene una frecuencia relativa del 20% y para valores entre 10 y 62 mm/h la frecuencia es del 10% en las estaciones de

Tocaima, Santa Rita y Bizcocho. Para las estaciones El Peñol, Río Abajo y Corrientes las intensidades entre 25 y 40 mm/h tienen una frecuencia relativa del 10%.

Hay que resaltar que todas las estaciones con excepción de Corrientes presentan el mismo comportamiento de la intensidad, el comportamiento de Corrientes es muy uniforme para el rango de intensidades, mientras que las restantes estaciones presentan un gradiente alto para el rango de intensidad entre 10 y 90 mm/h aproximadamente. Las estaciones como Bizcocho, Santa Rita y Tocaima, que están mas cercanas entre sí, corresponden a las de mayores intensidades a pesar de estar a diferente altitud (1070, 1900 y 1570 m.s.n.m., respectivamente).

Las gráficas de fracción de tiempo de lluvia vs precipitación ocurrida (ver Fig. 3) presentan altas coeficientes de determinación a nivel horario con valores entre 0,70 y 0,88, con excepción de la estación El Bizcocho. La pendiente de la regresión muestra gradientes

altos, siendo el mayor para la estación Santa Rita (1900 msnm) y un gradiente bajo para la estación El Bizcocho (1070 msnm). En las 6 estaciones la fracción máxima de tiempo de lluvia es similar con un valor menor de 0,4.

Se debe tener en cuenta que el tiempo de lluvia en fracción es el número de horas de lluvia con respecto al total de horas durante cada una de las 24 horas del día.

Con relación a la Figura 3, la estación Bizcocho no mostró una buena correlación en ninguno de los intervalos de tiempo. Esta estación presenta valores mínimos de frecuencia acumulada de lluvia del 90%, es decir, una distribución temporal de la lluvia en el día más uniforme que las demás estaciones, y un ciclo diario de la precipitación similar a las demás estaciones.

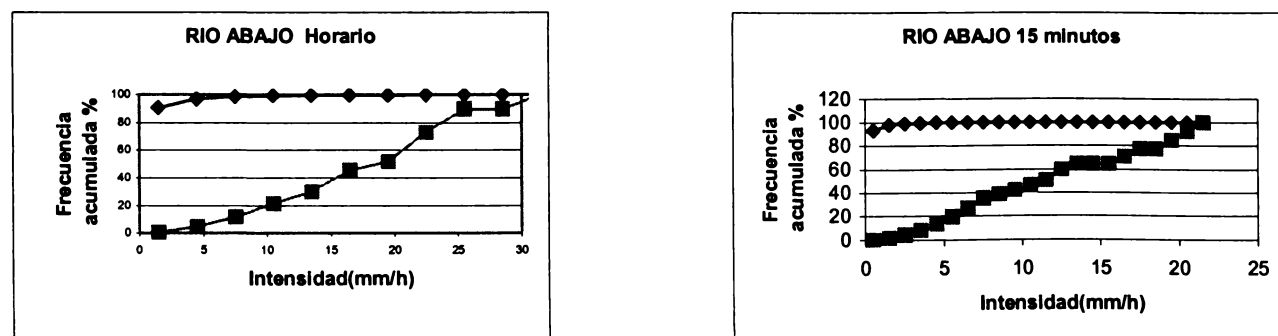


FIGURA 2. Frecuencia acumulada de lluvia (rótulo cuadrado) y de fracción de tiempo de lluvia (rótulo rombo) vs intensidad para intervalos de 1 hora y 15 minutos, estación Río Abajo.

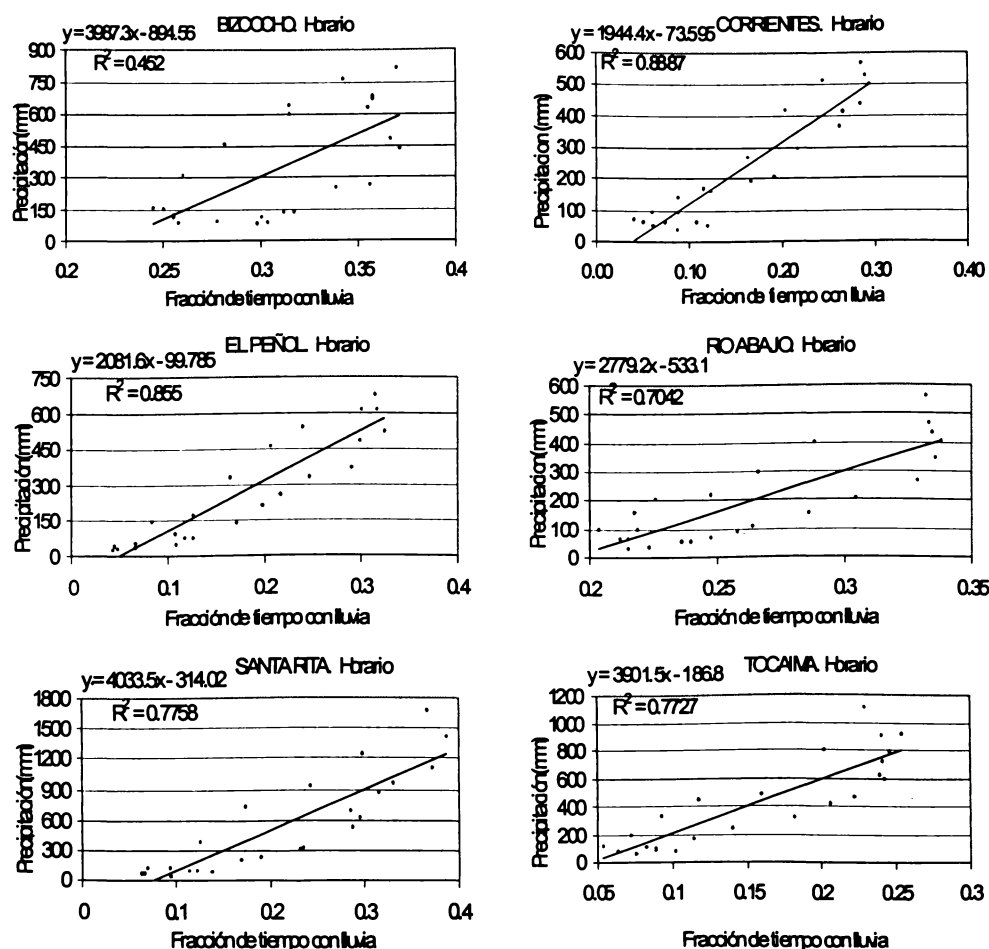


FIGURA 3. Relación entre la fracción de tiempo de lluvia vs precipitación, cada punto representa una hora del día.

La variabilidad horaria de la lluvia para las 6 estaciones, (ver Fig. 4 para El Bizcocho y Corrientes), muestra que el porcentaje de horas de lluvia a lo largo del día es similar para 4 de las 6 estaciones: El Peñol, Corrientes, Tocaima y Santa Rita. El período de mayor lluvia en el día se presenta entre las 19 horas y 5 horas del día siguiente, el período con menor lluvia se presenta al mediodía. La distribución en Tocaima (1570 msnm) y Santa Rita (1900 msnm) es de menor variabilidad, mientras que en El Peñol (1920 msnm) y Corrientes (1980 msnm) es de mayor variabilidad. Las estaciones Río Abajo y El Bizcocho presentan una distribución temporal de lluvia en el día

uniforme. La distribución de lluvia en el día presenta su máximo valor a las 23 horas en las estaciones Río Abajo, El Peñol y el Bizcocho. La estación Corrientes presenta el máximo a las 21 horas y las estaciones Tocaima y Santa Rita a las 20 horas. Los valores mínimos de precipitación se presentan entre las 11 y 14 horas del día para las 6 estaciones.

Adicionalmente se presenta en la Figura 4 el ciclo diario de la precipitación en intervalos de lluvia de 15 minutos para 2 de las 6 estaciones.

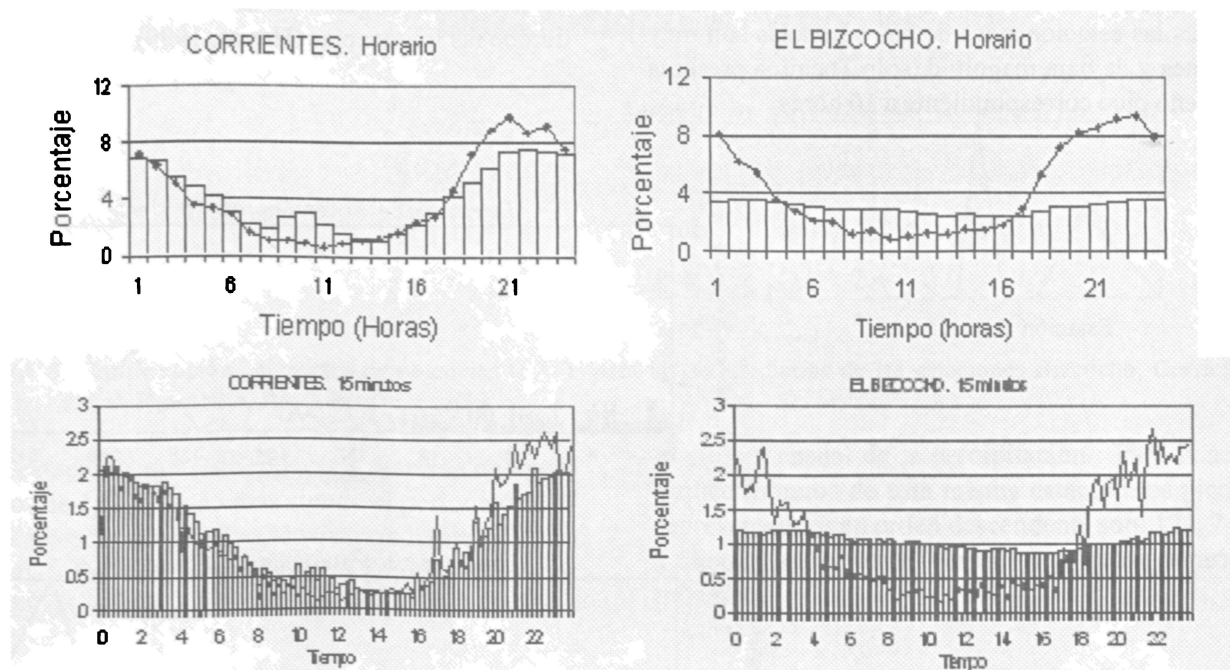


FIGURA 4. Variabilidad horaria y de 15 minutos para las estaciones El Bizcocho y Corrientes. La línea continua representa el porcentaje de precipitación en cada periodo del día y las barras el porcentaje de horas en cada periodo durante el día

También se calculó la distribución de las tormentas la cual presenta en las 6 estaciones aproximadamente un 50% de tormentas con duración de 1 hora y luego en 5 de las 6 estaciones se presenta un 20% con duraciones de tormenta entre una y dos horas, solamente la estación El Peñol presenta el 10% de eventos con duración de 2 horas. Se puede considerar que en todas las estaciones se han presentado eventos de hasta 15 horas de duración aproximadamente y solamente en la estación el Bizcocho se han registrado eventos de 24 horas de duración. La duración del interludio o tiempo sin lluvia muestra que las estaciones de Corrientes, Santa Rita y Tocaima presentan un interludio de 5 horas con frecuencias relativas de 58, 62% y 60% respectivamente. La estación Río Abajo presenta un interludio de 25 horas con una

frecuencia relativa de 90%. Posteriormente el segundo interludio en frecuencia es el de 20 horas con frecuencias relativas de 7% a 22% aproximadamente para las 6 estaciones.

4. ANÁLISIS DE LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN

4.1. Análisis de Fourier para las series diarias, horarias y de 15 minutos

La mayor utilidad de la aplicación de esta transformada radica en que permite obtener el espectro de potencias (amplitud al cuadrado vs frecuencia) y de esta

forma identificar las frecuencias fundamentales (Jenkins and Watts, 1969).

Las series diarias del Bizcocho, El Peñol y Tocaima muestran frecuencias muy similares y de baja periodicidad. Para las estaciones de Río Abajo y Corrientes se presentan valores del espectro de potencias considerables, para periodos cortos de entre 2 y 7 días y para periodos de 30 a 60 días. En la estación Santa Rita se observa mayor variación en la frecuencia con periodos de 30, 60 y 90 días, ver Figura 5 para Santa Rita.

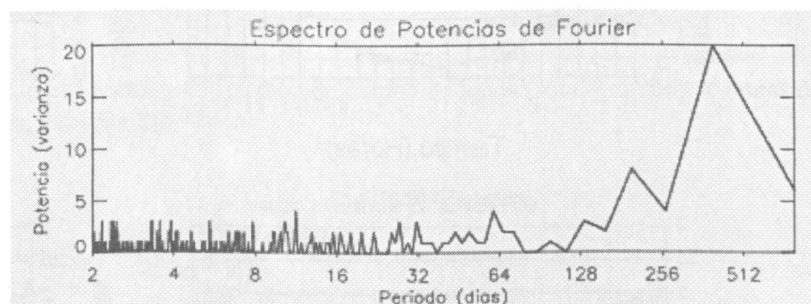
En las series horarias para todas las estaciones, la potencia mayor es la que corresponde al ciclo diurno, en casi todas las estaciones las demás potencias son muy semejantes y de baja magnitud, solo Tocaima presenta un pequeño pico correspondiente a 16 horas.

Para las series de 15 minutos en las estaciones de Bizcocho, el Peñol, Río Abajo y Santa Rita se alcanzan a apreciar una frecuencia baja correspondiente a un periodo de 16 horas.

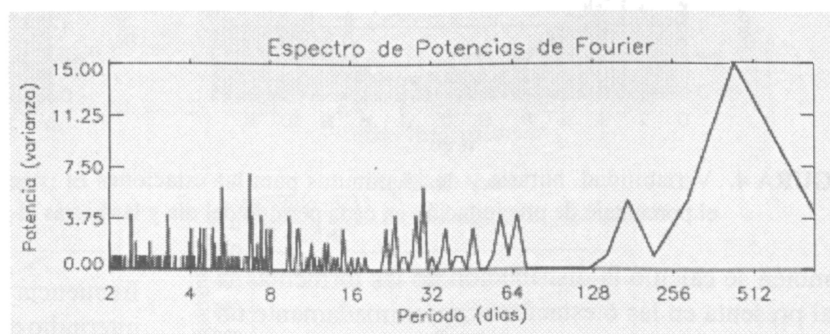
4.2. Análisis de Transformada de Onditas (wavelets) para las series diarias, horarias y de 15 minutos

El análisis de frecuencia de onditas es una técnica que permite encontrar un amplio espectro de frecuencias ya que la transformada u ondita que se usa es de baja varianza, es decir, altamente concentrada; y con la característica fundamental de que permite localizar en el tiempo las frecuencias (Hoyos, 1999).

Estación Bizcocho



Estación Corrientes



Estación El Peñol

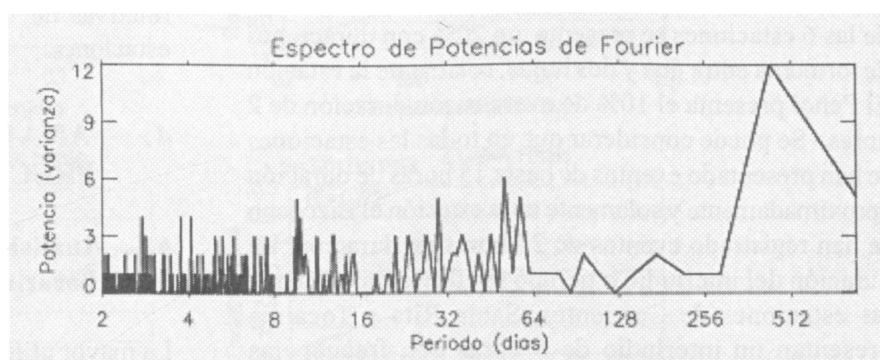


FIGURA 5. Espectro de potencias (FFT) para las series diarias de las estaciones Bizcocho, Corrientes, el Peñol, Río Abajo, Santa Rita y Tocaima.

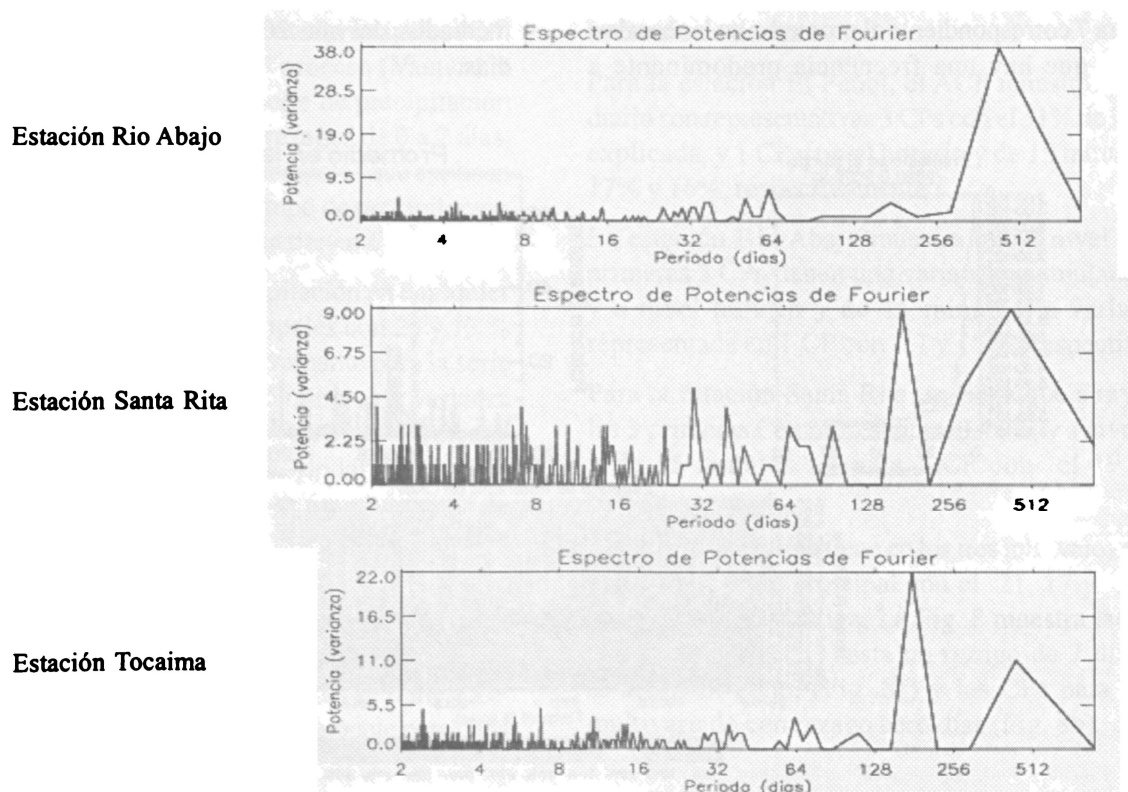


FIGURA 5. Continuación. Espectro de potencias (FFT) para las series diarias de las estaciones Bizcocho, Corrientes, el Peñol, Río Abajo, Santa Rita y Tocaima.

Para la estación Santa Rita en la serie diaria se observan periodos de 187, 67 y 35 días siendo el periodo de 187 días el más representativo, correspondiente al ciclo semianual. En la serie horaria se presentan periodos de 173, 72 y un máximo en 30 días, se resaltan por lo tanto

el ciclo mensual de la precipitación. Para la serie de quince minutos de ésta misma estación los picos más representativos en orden descendente son: 171, 74, 32 y 1 día respectivamente (ver Fig. 6 y 7, caso horario y 15 minutos).

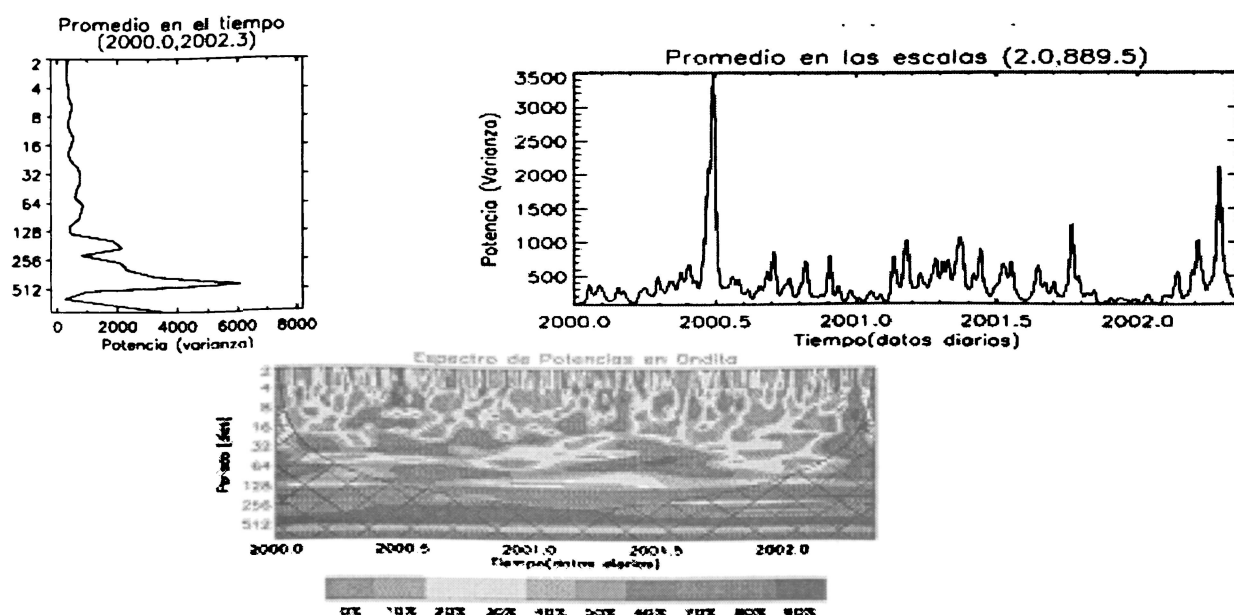


FIGURA 6. Estación Santa Rita intervalo diario a) Promedio en el tiempo, b) Promedio en las escalas, c) Espectro de potencias

En la Figura 7 correspondiente al promedio en las escalas, se observa que hay una frecuencia predominante a

mediados del año 2001 con un período entre 41 y 62 días.

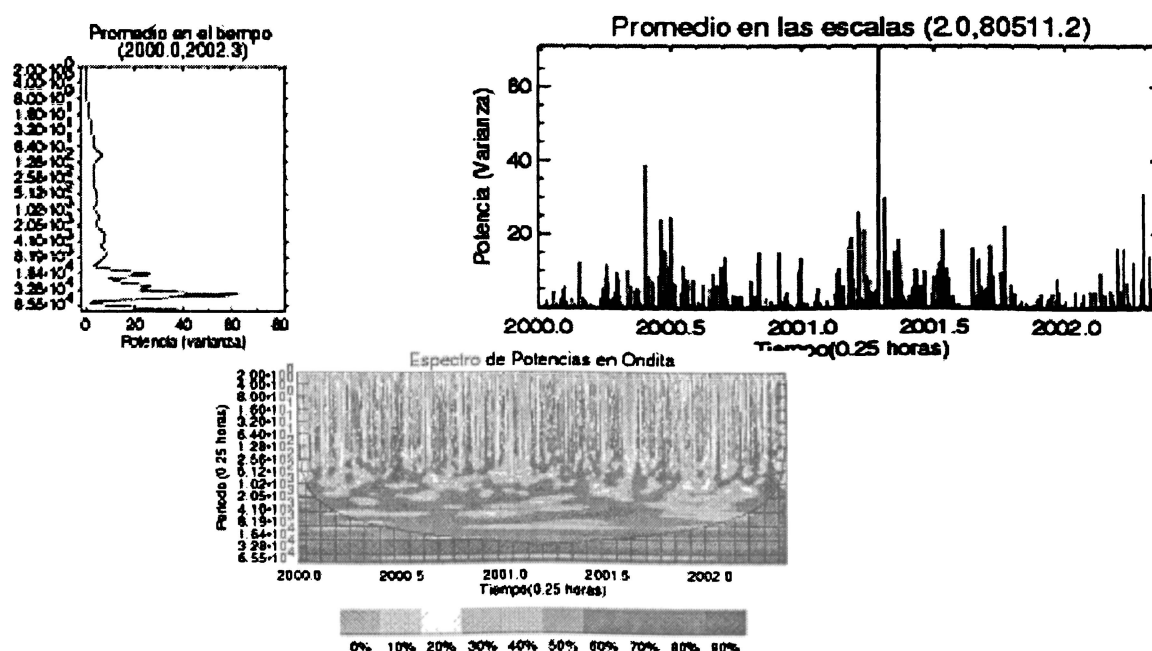


FIGURA 7. Estación Santa Rita intervalo 15 minutos a) Promedio en el tiempo, b) Promedio en las escalas, c) Espectro de potencias.

En la estación Bizcocho para la serie diaria en el promedio en el tiempo solo se aprecian dos picos importantes, el primero con periodo de 189 días y el siguiente en 61 días. En la serie horaria se presentan periodos de 224, 68 y 1 día. En la serie de quince minutos pueden apreciarse periodos importantes correspondientes a 177, 64, 10 y 1 día. En cuanto a al promedio en las escalas, para la serie diaria se presenta un comportamiento similar al anterior con un periodo de 36 a 68 días.

La estación Corrientes presenta para la serie diaria en el promedio en el tiempo periodos considerables de 192, 64 y 25 días. Para la serie horaria se encontraron los siguientes periodos: 65, 27, 1 día. Para la serie de 15 minutos los periodos encontrados fueron: 171, 64 días, 27 días y el periodo diario. En el promedio en las escalas es común para las tres series un periodo muy marcado entre mayo y junio del 2001.

La serie diaria de la estación El Peñol presenta en el promedio en el tiempo periodos de 178, 92, y 52 días; siendo el primero y el tercero los máximos. Para la escala de tiempo horaria se obtuvieron periodos representativos de 171 (máximo), 62 (máximo), 11, 1 y 0.4 días. En la serie de quince minutos los periodos son similares a los

obtenidos para la serie horaria. En el promedio de las escalas para la serie de quince minutos se aprecia que el periodo de 21 a 60 días, es más notorio que en las demás series, observándose esto a lo largo del año 2000 y en el segundo semestre del año 2001.

Para la estación Río Abajo se hacen presentes periodos que corresponden a 21 y 85 días respectivamente, estos periodos son más visibles en la serie de quince minutos para el tercer trimestre del 2000 y segundo trimestre del 2001; a lo largo de esta, también se observan periodos frecuentes de 2 y 4 días.

En la estación Tocaima muestra que en la serie de quince minutos se nota más la presencia de los periodos de 20 a 60 días a mediados del año 2001 y se hacen presente nuevamente a lo largo de toda la serie los periodos de 2 y 4 días observados en las otras estaciones. El máximo de esta serie se encuentra en 173 días.

4.3. Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales permite proyectar la información en una base ortogonal con ejes independientes descomponiendo la señal en componentes principales y conocer el porcentaje de la varianza que

representa cada una de las componentes principales (CP) con respecto a la varianza total del proceso (Vautard et al, 1992). El ACP se hizo a cada serie de precipitación para cada intervalo de tiempo con rezagos de 0 a 7 días, es decir, se tienen 8 componentes principales que explican el 100% de la varianza y para el campo de precipitación se hizo con rezago cero, es decir, se tienen 6 CPs.

En la estación El Bizcocho la precipitación en cualquier escala de tiempo tiene 2 CPs principales con 25 y 13 % de varianza representativa respectivamente para la serie diaria y en las series horaria y de 15 minutos la varianza es del 17 y 12,6 % y el 15 y 12,6 %, respectivamente. Hay que anotar que los autovalores de las demás CPs tienen un valor muy cercano a 1 con una varianza de 62%, esto para cada una de las tres series a nivel diario, horario y de 15 minutos.

La estación Corrientes muestra que a nivel diario la lluvia tiene 4 CPs representativas y una varianza acumulada del 64%, a nivel horario y de 15 minutos se tiene 1 CP representativa con 17 y 16 %, respectivamente para cada

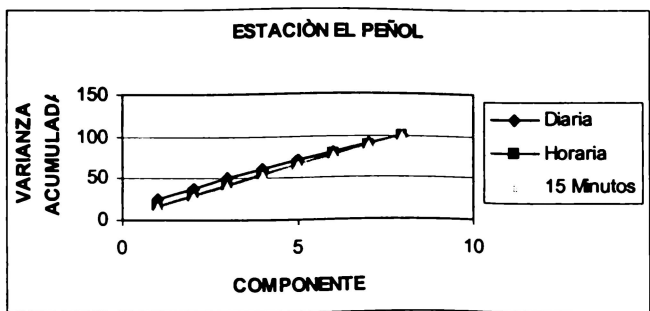
intervalo de tiempo.

Para la estación El Peñol, el ACP muestra que a nivel diario son representativas 3 CPs con el 51% de la varianza explicada, y 1 CP a nivel horario y de 15 minutos con el 17% y 16%, respectivamente.

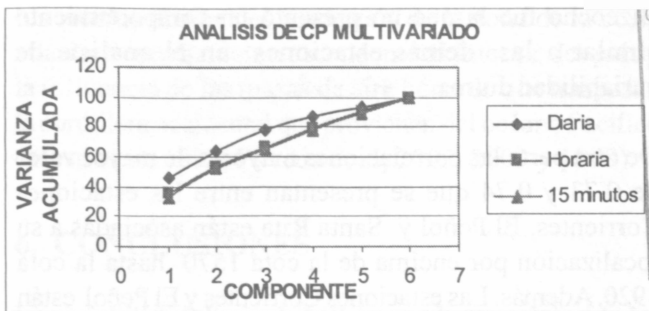
La estación Río Abajo muestra que a nivel diario las primeras 3 CPs tienen una varianza acumulada de 54% y a nivel horario y de 15 minutos la varianza está representada en 1 CP con 17 y 15 %, respectivamente.

Para la estación Santa Rita se tiene que a nivel diario las 3 primeras CPs representan el 48%, y a nivel horario y de 15 minutos se tiene 1 CP con el 19 y 17 %, respectivamente.

La estación Tocaima tiene en los tres intervalos de tiempo una componente principal con el 21, 17 y 15% de la varianza representativa. La Fig. 8 muestra las CP vs la varianza acumulada hasta un rezago de 7 días para la estación El Peñol (Fig. 8a) y las CPs para el campo multivariado con rezago cero días (Fig. 8b).



a



b

FIGURA 8. Componentes principales vs varianza explicada, a) estación El Peñol, b) Análisis multivariado (6 estaciones).

El ACP multivariado (Figura 8b) muestra que las 2 primeras CPs son las más importantes con una varianza representativa acumulada del 64 %. Comparando los tres intervalos de tiempo (diario, horario y 15 minutos). Hay que tener en cuenta que para análisis futuros de

modelación de la lluvia no es suficiente considerar las dos primeras componentes ya que las restantes 4 CPs representan una varianza del 35%, lo cual es importante en este tipo de procesos en el cual la variabilidad espacial y temporal es muy alta, ver Tabla 2.

TABLA 2. Análisis de CP multivariado para la precipitación zona Embalse El Peñol.

CP	Diaria			Horaria			15 minutos		
	Auto valor	% Varianza	% Var Acum	Auto valor	% Varianza	% Var Acum	Auto valor	% Varianza	% Var Acum
1	2.7680	46.130	46.130	2.1160	35.272	35.272	2.0191	33.652	33.652
2	1.0550	17.584	63.714	1.1080	18.467	53.739	1.0943	18.238	51.890
3	0.8270	13.783	77.497	0.7794	12.990	66.729	0.8255	13.759	65.649
4	0.5760	9.5990	87.096	0.7218	12.030	78.759	0.7364	12.273	77.922
5	0.3990	6.6530	93.749	0.6869	11.431	90.190	0.6912	11.521	89.443
6	0.3750	6.2500	100.00	0.5886	9.810	100.00	0.6335	10.568	100.00

En la Tabla 3 se puede apreciar que las correlaciones espaciales entre las primeras CPs están entre 0.54 y 0.73, estos valores se pueden considerar buenos para

explicar la estructura espacial de la lluvia en esta zona a nivel diario, esto debido a que la primera CP es la que mayor varianza aporta en cada serie.

TABLA 3. Correlaciones espaciales de la CP 1 entre las series de precipitación diaria en la zona del Embalse del Peñol.

Estación	Bizcocho	Corrientes	El Peñol	Río Abajo	Santa Rita	Tocaima
Bizcocho	1.00	--	--	--	--	--
Corrientes	0.58	1.00	--	--	--	--
El Peñol	0.53	0.73	1.00	--	--	--
Río Abajo	0.67	0.68	0.70	1.00	--	--
Santa Rita	0.60	0.74	0.57	0.60	1.00	--
Tocaima	0.73	0.63	0.59	0.57	0.70	1.00

Con respecto a la correlación de menor valor de 0.53 entre las estaciones el Bizcocho y el Peñol, esta se puede explicar por el alto desnivel en cota que hay entre las estaciones el cual es de 850 m; además de que ambas estaciones están localizadas en vertientes opuestas con respecto a la localización del embalse. Adicionalmente esta baja correlación se apoya en que la estación Bizcocho fue la que no presentó un comportamiento similar a las demás estaciones en el análisis de variabilidad diurna.

De otra parte las correlaciones mayores de mayor valor de 0.73 y 0.74 que se presentan entre las estaciones Corrientes, El Peñol y Santa Rita están asociadas a su localización por encima de la cota 1570 hasta la cota 1920. Además. Las estaciones Corrientes y El Peñol están ubicadas en el flanco occidental con respecto a la localización del embalse. Estos dos aspectos explican desde el punto de vista topográfico la alta correlación entre estas estaciones en la CP 1.

Es importante considerar que entre las estaciones Tocaima y Bizcocho se tiene una correlación espacial del 0.74, una diferencia de cota de 500 m, y están localizadas en el flanco oriental con respecto a la posición del embalse del Peñol. Esto muestra unas condiciones de carácter orográfico que prevalecen en la precipitación de la zona, lo que podría permitir inferir que la precipitación reciclada es una alta componente de la precipitación total.

5.ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fue común para todas las estaciones un periodo que oscila entre los 171 y 180 días para todos los intervalos de

tiempo, esté comportamiento esta asociado con la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), es decir, representa el ciclo semianual o el paso de dos veces en el año de la ZCIT por la geografía Colombiana, lo cual da origen a los dos inviernos típicos (septiembre-noviembre y abril-mayo) de la zona Andina o ciclo anual bimodal en Colombia. Además depende de la actividad convectiva combinada con el paso de este frente intertropical y de su interacción con las circulaciones de los Océanos Pacífico, Atlántico y de la cuenca del Amazonas. En el verano del hemisferio sur, época en la que la ZCIT se encuentra más al sur, se reduce la precipitación en la costa Caribe colombiana, y viceversa para la zona sur durante el verano del hemisferio norte (Mesa et al, 1997). Para todas las series también fue común un periodo alrededor de los 365 días que corresponde al ciclo anual. Esta frecuencia se encuentra por debajo del cono de influencia en el espectro de potencias de onditas lo que la hace poco representativa para que sea analizada estadísticamente, esto debido a que se necesitan registros más extensos.

La presencia de una banda de periodos entre 21 y 74 días es clara para las series de todas las estaciones, siendo más notoria en el tercer trimestre del 2001 en todas las estaciones y para el segundo semestre del 2000 para las estaciones de Corrientes, Río Abajo y Santa Rita. Estas bandas que se presentan de manera intermitente están asociadas a la oscilación Madden-Julian (MJO). Esta oscilación esta caracterizada por anomalías en convección y vientos tropicales a escalas de tiempo intraestacionales entre 30 y 60 días (Poveda et al, 1998; Hoyos, 1999; Poveda, 2005, 2002 y 1998).

De los resultados obtenidos de los espectros en ondita se observó una banda de frecuencia entre 4 y 6 días, dicha banda esta presente para todas las estaciones pero no con la misma intensidad en las diferentes escalas de tiempo. Además, los espectros de potencia muestran que la presencia de estas bandas es completamente intermitente, mientras que la presencia de las bandas entre 30 y 74 días aunque también es intermitente, afecta periodos de tiempo mayor. Estas bandas están asociadas con las ondas tropicales del este las cuales son patrones de circulación ciclónica que se desplazan desde el occidente de África hacia el océano Atlántico con un período aproximado de 4 días.

Es obvio que las series de 15 minutos reflejaron mejor los eventos de corta duración en el tiempo, que las series diaria y horaria. A medida que se tengan más registros aumenta la representatividad de la repercusión de fenómenos climáticos locales especialmente por la variación de la radiación solar diaria a intervalos cortos de tiempo.

En cuanto al ACP los rezagos 0, 1, 2 y 3 días tienen más importancia o peso en la CP 1 de las 6 estaciones y el rezago 8 (rezago 7 días) en la CP 2 para las series diarias. Para las series a nivel horario también los 4 primeros rezagos (0, 1, 2 y 3 días) son los representativos.

Los valores de las CPs aumentan en magnitud a medida que la escala de registro disminuye. Esto desde el punto de vista de proyección de la información en los ejes de las direcciones principales, muestra que la precipitación registrada a intervalos cortos de tiempo tiene combinaciones no lineales en el rango positivo que determinan mayor variabilidad temporal.

También todas las estaciones presentan un alto porcentaje de varianza que no es representativa para el campo de lluvia si se toma como criterio los autovalores con magnitudes mayores o iguales a 1. La estación Corrientes con 4 CPs a nivel diario es la que mayor número de CPs tiene como representativas para una varianza acumulada de 64%, esta estación es la que presenta mayor número de CPs significativas. Para los demás intervalos de tiempo en las 6 estaciones se tiene en general una varianza significativa del 15 a 40 %. La mayor diferencia en varianza se presenta entre los intervalos diario y horario y es menor entre el horario y de 15 minutos, en parte se puede explicar por el número de intervalos de registro

de una serie a otra. En el intervalo de una hora es obvio que el ciclo diario de la precipitación hace una diferencia importante y que se puede considerar que participa en un porcentaje de varianza del 17 al 29 %, dependiendo de la ubicación geográfica y cota de la estación. Es claro que las series de intervalos de 15 minutos son útiles para el estudio de las intensidades de la lluvia durante eventos máximos, lo cual es el trópico es muy importante, ya que por lo general las lluvias en esta zona no superan en gran porcentaje la duración de 2 horas, pero si presentan intensidades altas. El poder tener series de precipitación a menores intervalos de tiempo, por ejemplo 5 minutos, permite hacer un análisis más exhaustivo de eventos de lluvia, análisis de curvas intensidad-frecuencia-duración y caracterizar mejor las frecuencias altas involucradas.

En general la precipitación como proceso físico de la atmósfera es muy variable y más aún cuando los patrones de comportamiento están altamente influenciados por dinámicas locales y sistemas de mesoescala, debido a la topografía y masas de aire húmedo transportadas por los vientos alisios del noreste y de la zona de la costa atlántica con dirección ascendente al interior del país y la influencia de las masas de aire húmedo que traspasan la cordillera occidental que provienen del océano Pacífico (Mesa et al, 1997; Poveda et al, 2005, 2002 y 1998).

6. CONCLUSIONES

La variabilidad diaria de la lluvia en la zona del embalse del Peñol para el período enero de 2000 a mayo de 2002 es unimodal con las precipitaciones máximas entre las 21 y 23 horas. La precipitación vs fracción de tiempo de lluvia presenta linealidad con coeficientes de correlación entre 0,7 y 0,85, esto muestra una buena homogeneidad del campo de lluvia, especialmente en las estaciones que están ubicadas a más de 1500 m.s.n.m, este hecho está relacionado con el óptimo pluviográfico que por lo general está entre los 1500 y 2000 m.s.n.m. La estación Bizcocho presenta la más baja correlación de 0,40, esto debido a que esta localizada a una altura de 1070 m.s.n.m. lo que hace que esta sea un punto de monitoreo en la vertical de ascenso de las masas de aire.

Los eventos de lluvia no superan la duración de una hora en el 50 % de los casos y se tienen eventos entre 1 y 2 horas en un 20%. Los interludios de 5 horas se presentan en las estaciones de Santa Rita, Tocaima y Corrientes

con una frecuencia relativa del 60% y de 25 horas en la estación Río Abajo con un frecuencia relativa de 90%.

El análisis de Fourier, y onditas muestra consistencia en las frecuencias halladas: ciclo semianual (6 meses), período de 30 a 70 días correspondiente a la oscilación de Madden-Julinas, el ciclo de 4 a 6 días de período correspondiente a las ondas del este y períodos de 1 día (ciclo diario).

El Análisis de Componentes Principales de la series de precipitación en cada estación muestran 2 CPs representativas, pero los demás autovalores están cercanos a la unidad, por lo tanto la varianza de la precipitación está muy distribuida en el conjunto de CPs.

El análisis de componentes principales del campo de precipitación muestra que las CPs representativas son las dos primeras y que la variabilidad difiere en un 10% entre las escalas de tiempo diaria y horaria. La diferencia entre la escala diaria y de 15 minutos es de 14 % y entre las escalas horaria y de 15 minutos es del 3%; esta última diferencia de variabilidad es baja pero se debe considerar que un registro de precipitación aún menor, por ejemplo de 5 minutos sería interesante para el análisis. La variabilidad representativa a escala de tiempo diaria es 63,7%, a escala horaria es 53,7 % y a nivel de 15 minutos es 52%.

7. BIBLIOGRAFIA

CORNARE, 1996. Levantamiento del mapa digital de cobertura y de uso actual de la tierra de San Rafael, Alejandría y Concepción en el Departamento de Antioquia.

Cutrim, E. M. C. et al. 2000. Pilot Analysis of Hourly Rainfall in Central and Eastern Amazonia. *Journal of climate, Notes and Correspondence*, Vol. 13, pp. 1326 – 1334, American Meteorological Society.

Hoyos, C. D. 1999. Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y descomposición en onditas a señales hidrológicas y sísmicas. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín, p.150.

ISA-UNAL. 1995. Análisis de Homogeneidad de las Series del Sector Eléctrico Colombiano. Volúmenes en varias paginaciones, Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional, tomos I, II y III.

Jenkins, G y Watts, D. 1969. *Spectral Analysis and its applications*. Holden Day Ed., San Francisco, California. p. 525.

Mesa, O., Poveda, G. y Carvajal, L. F. 1997. *Introducción al Clima de Colombia*. Editorial Universidad Nacional de Colombia, Medellín. p.390

Poveda, G., Mesa, O., Salazar, L., Arias, P., Moreno, H., Vieira, S., Agudelo, P., Toro, V., y Alvarez, F. 2005. The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Mon. Wea. Rev.*, 133, pp. 228-240.

Poveda, G., Mesa, O. J., Agudelo P. A., Álvarez J. F., Arias P. A., Moreno, H. A., Salazar, L. F., Toro, V. G., Vieira, S. C. 2002. ENSO, Madden-Julian Oscillation, East Waves, Hurricanes and Moon Phases Influence on the Diurnal Cycle of Precipitation in the Colombian Tropical Andes. *Meteorología Colombiana* (ISSN 0124-6984) N° 5. pp.3-12. Bogotá.

Poveda, G., Gil, M. y Quiceno, N. 1998. The relationship between ENSO and the annual cycle of Colombia's hydro-climatology. *Proc. of second international conference on climate and water*, Helsinki, August 17-20, pp. 1323-1331.

Salas, J. D. et al. 1992. *Statistical computer techniques in Hydrology and Water Resources*. Volúmenes en varias paginaciones, Department of Civil Engineering, Colorado State University, tomos I y II.

Vautard, R. et al. 1992. Singular-spectrum análisis: A toolkit for short, noisy chaotic signals. *Physica D*, no 58, pp. 95-126, Elsevier Science Publisher.