

Análisis estadístico de las precipitaciones en la cuenca del río de Bogotá (Colombia) incluyendo las variables del fenómeno El Niño y La Niña

Statistical analysis of precipitation in the basin river Bogota including the variables of the phenomenon of El Niño and La Niña

SÁNCHEZ, Juan M. ¹
RODRIGUEZ, Juan P. ²
RIVAS, Edwin³

Resumen

Las precipitaciones son de suma importancia en la agricultura debido a que afectan significativamente la producción. El objetivo de esta investigación fue encontrar un modelo explicativo que ayude a determinar el volumen esperado de las precipitaciones sobre la cuenca del río Bogotá. La metodología fue cuasi-experimental con enfoque cuantitativo, para lo cual, se tomaron muestras de las precipitaciones sobre el río Bogotá en tres zonas de la cuenca y se aplicó regresión lineal múltiple. Se concluyó que la variación del volumen de las precipitaciones depende de la zona dentro de la cuenca y los fenómenos de El Niño y La Niña.

Palabras clave: precipitaciones, fenómeno del Niño, fenómeno de la Niña, río Bogotá

Abstract

Rainfall is of utmost importance in agriculture, due to the consequences of production. The objective of this investigation was to find an explanatory model that helps determine the expected volume of rainfall over the Bogotá river basin. The methodology was quasi-experimental with a quantitative approach. For this, take samples of the precipitations on the Bogotá river in three areas of the basin and multiple linear regression was applied. It was concluded that the variation in the volume of rainfall depends on the area within the basin and the phenomena from El Niño y La Niña

key words: rainfall, El Niño phenomena, La Niña phenomena, river Bogotá

1. Introducción

El impacto de las precipitaciones en cualquier comunidad puede ser significativo por las consecuencias de estas en la economía, la salud, el medio ambiente, entre otras más. Por ejemplo, un aumento significativo en el

¹ Ingeniero Electrónico, Especialista en Teleinformática, Magister en Administración. Profesor Asociado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Bogotá-Colombia. Grupo de Investigación GIIRA y AQUAFORMAT. Correo electrónico: jmsanchezc@udistrital.edu.co

² Ingeniero Sanitario y Ambiental. Magister en Ingeniería Ambiental. PhD en Ingeniería. Profesor Titular. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del Medio Ambiente, Bogotá-Colombia. Director del grupo de investigación AQUAFORMAT. Correo electrónico: jprodriguez@udistrital.edu.co.

³ Ingeniero Eléctrico, Máster en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática. Grupo de Investigación Interferencia Electromagnética (GCEM), Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia. Correo electrónico: erivas@udistrital.edu.co

volumen de las precipitaciones puede ocasionar deslizamientos de tierra, inundaciones, aumentó de mosquitos y de enfermedades, que afectan el sector agropecuario, la infraestructura vial y la salud pública (IDEAM, et al., 2014), lo cuales son impactos negativos en el bienestar de los integrantes de la comunidad.

Sin embargo, una ausencia prolongada de lluvias, también trae consecuencia negativas en la sociedad, porque produce una disminución de la producción agrícola, y por ende un aumento de precios y de la inflación, que según algunos estudios el efecto de las precipitaciones en la agricultura puede incrementarla hasta en un 4% la inflación. (Banco de la República, 2007).

En Colombia, los efectos de las precipitaciones en la agricultura son significativos. La agricultura en Colombia corresponde al 6,19% del PIB en el 2015 (DANE, 2016). Con respecto al Río Bogotá, la agricultura se presenta principalmente en la cuenca alta, donde se encuentran ubicados los cultivos de papa, los cuales contaminan las aguas del río debido a los fungicidas utilizados (Ramos & Gónima, 2014).

Otra consecuencia en Colombia es la que se presenta en la generación de energía eléctrica, debido a que en el país, las principales fuentes de generación de energía son las hidroeléctricas las cuales generan el 70% del total (Unidad de Planeación Minero Energético, 2014); donde su principal insumo son los niveles de agua de sus embalses, entonces la ausencia de lluvias provoca una disminución de estos, y por ende puede provocar que se presenten cortes de energía eléctrica como en 1991.

1.1. Antecedentes

Se revisaron varios estudios, los cuales buscaban determinar las variables relevantes en el comportamiento de las precipitaciones en diferentes regiones. En el artículo titulado “Cambio Climático y Variabilidad Espacio – Temporal de la Precipitación en Colombia” se utilizaron funciones ortogonales empíricas, componentes principales y pruebas estadísticas de homogeneidad, y se concluye que el sistema montañoso de Los Andes influye en la variabilidad espacial de la precipitación en Colombia; lo cual permitió también entender mejor la variabilidad espacio temporal de la precipitación en el territorio colombiano (Hurtado Montoya y Mesa Sánchez, 2015). Otro estudio complementario fue el realizado por Mesa Sánchez y Peñaranda Vélez (2015) donde concluyen la importancia en avanzar en el conocimiento de las precipitaciones y la complejidad de la estructura espacio temporal de las precipitaciones, que muestran una gran variabilidad espacial en cortas distancias y cambios importantes a escala interanual, anual, intraanual y diaria; también plantean la necesidad de buscar mecanismos que ayuden a predecir las precipitaciones tomando en cuenta las variables mencionadas.

Internacionalmente se han realizado diferentes estudios sobre el comportamiento de las precipitaciones en diferentes regiones como el realizado por Zhao, Ye, Ding, & Yao (2011), quienes analizaron la variabilidad de las precipitaciones en el norte de China. También Campos-Aranda (2015), analizó las precipitaciones de los últimos 50 años en el estado de Zacatecas en México. Ambas investigaciones plantean la importancia de realizar estos estudios en cada una de las regiones, porque ayudarán al desarrollo de grandes proyectos de desarrollo relacionados con el cambio climático.

Con respecto al desarrollo de sistemas de predicción de precipitaciones, se han llevado a cabo diferentes investigaciones, en las cuales se han aplicado diferentes técnicas como redes neuronales, la cual fue utilizada por Taylan y Küçükyaman (2011), para predecir las precipitaciones en el lago Eğirdir en Turquía. Otro ejemplo fue el utilizado para predecir las precipitaciones en el estado de Iowa en Estados Unidos, el cual utilizó técnicas de machine learning (Di, Ding, Mu, Small, Islam, & Chang, 2015). Como último ejemplo, se presenta el realizado por Cai (2010), el cual utilizó cadenas de Markov para predecir las precipitaciones en la ciudad de Xianyang en China.

Otras investigaciones relacionadas con la influencia de las precipitaciones en las cuencas de los ríos, están las de Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia (González López,

Carvajal Escobar y Loaiza Cerón, 2016) y Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali (Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna, 2014).

Las investigaciones antes nombradas, plantean la necesidad de implantar diferentes sistemas de predicción de precipitaciones en regiones críticas para el desarrollo de una comunidad, en este caso en específico la cuenca del río Bogotá, en la cual como modelo de predicción se probó el método estadístico de regresión lineal múltiple.

2. Metodología

La metodología utilizada en la investigación fue primero ubicar tres muestras sobre la cuenca del río Bogotá, una por cada sector de la cuenca. Las cuencas y los municipios que la componen se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1
Cuenca del Río Bogotá

CUENCA	MUNICIPIOS
Alta	Villapinzón, Choconta, Suesca, Sesquilé, Gachabcpa, Tocancipa, Zipaquira, Cajica, Sopo, Chia, Cota, Nemocon, Cogua, Guatavita, Guasca, Tabio y Tenjo.
Media	Bogotá, Funza, Mosquera, Soacha, Sibaté, Subachoque, El Rosal, Madrid, Bojaca y Facatativa.
Baja	San Antonio del Tequedama, Tena, El Colegio, Anapoima, Apulo, Tocaima, Agua de Dios, Ricaurte, Girardot, Zipacon, Anolaima, Cahipai y Viotá.

Fuente: Elaboración Propia.

La forma de determinar las muestras de las estaciones que se utilizaron, fueron las que tuvieron la mayor cantidad de datos históricos de precipitaciones; por lo cual, se usó en la cuenca alta la estación de Nemocon, en la cuenca media la estación de Funza y en la cuenca baja la estación de Apulo. Luego de determinar los puntos de muestreo se promedió el volumen de precipitaciones en cada una de las 4 estaciones climáticas en el año, que se han determinado; las cuales son: Diciembre, Enero y Febrero (DEF); Marzo, Abril y Mayo (MAM), Junio, Julio y Agosto (JJA); Septiembre, Octubre y Noviembre (SON).

El valor promedio obtenido será el utilizado para la variable dependiente, la cual es precipitación; ya con la variable dependiente es necesario determinar las variables independientes, para ello se tomó de base la premisa que la variación de las precipitaciones depende principalmente de la estación del año en el cual se encuentre y también depende de la presencia o no de los fenómenos de El Niño ó La Niña.

La ecuación (1) plantea el comportamiento de las precipitaciones a partir de las variables independientes mencionadas. Donde los pesos de las variables (P1 a P6), resuelven las preguntas de investigación.

$$\text{Precipitaciones} = P_1 * \text{DEF} + P_2 * \text{MAM} + P_3 * \text{JJA} + P_4 * \text{SON} + P_5 * \text{Niño} + P_6 * \text{Niña} \quad (1)$$

A continuación se explica los pesos (P1 a P6) y el significado del valor esperado.

- P1: Este peso representa al volumen promedio esperado de precipitaciones en el primer trimestre correspondiente a la primera estación del año (DEF).
- P2: Este peso representa al volumen promedio esperado de precipitaciones en el segundo trimestre correspondiente a la segunda estación del año (MAM).
- P3: Este peso representa al volumen promedio esperado de precipitaciones en el tercer trimestre correspondiente a la tercera estación del año (JJA).
- P4: Este peso representa al volumen promedio esperado de precipitaciones en el primer trimestre correspondiente a la primera estación del año (SON).
- P5: Es la variación en el volumen de precipitaciones que es afectado por la presencia del fenómeno de El Niño en la cuenca.

- P6: Es la variación en el volumen de precipitaciones que es afectado por la presencia del fenómeno de La Niña en la cuenca.

Los valores que pueden tomar las variables independientes son de tipo binario, en el cual 1 representa presencia del fenómeno o situación y 0 la ausencia de este, por ejemplo si el valor de la muestra de la precipitación se realizó en abril y había presencia del fenómeno de El Niño, el valor de las variables serán: (DEF: 0; MAM: 1; JJA: 0; SON: 0; Niño: 1; Niña: 0).

Es claro recordar que los fenómenos El Niño y La Niña son mutuamente excluyentes. La información utilizada para completar los valores de las variables de El Niño y La Niña fue tomada del artículo del IDEAM titulado “Evolución de Precipitación y Temperatura Durante los fenómenos el Niño y la Niña en Bogotá - CUNDINAMARCA (1951 - 2012)”, estos se pueden observar en las Figuras 1 y 2.

Figura 1
Fenómeno de El Niño (1951-2012)



Fuente: (IDEAM, et al., 2014)

Figura 2
Fenómeno de la niña (1951-2012)



(*) Terminó en enero de 1956

Fuente: (IDEAM, et al., 2014)

Para el modelamiento de las variables del fenómeno El Niño y La Niña se tomaron los valores categóricos de intensidad Muy fuerte, Fuerte y Moderado, y no se usó el de intensidad Débil, por su poca influencia en el comportamiento de las precipitaciones.

Ya con los valores de la variable dependiente y las variables independientes, el siguiente paso fue decidir la herramienta a utilizar para determinar los diferentes pesos de la ecuación, por lo cual se decidió que la herramienta sería la de regresión lineal múltiple.

3. Resultados

Luego de realizar el procesamiento de los datos utilizando regresión lineal múltiple, en la Tabla 2, se observa los valores obtenidos de R^2 y R^2 ajustado, para los tres casos analizados.

Tabla 2
Valores R de las regresiones

Sector	Municipio	R2	R2 Ajustado
Cuenca Alta	Nemocon	0,408397367	0,383329459
Cuenca Media	Funza	0,487557207	0,464680297
Cuenca Baja	Apulo	0,343959087	0,269408984

Fuente: Elaboración Propia.

Los valores de los pesos que se obtuvieron a partir de los coeficientes de la regresión para las muestras de las tres cuencas se pueden observar en la tabla 3.

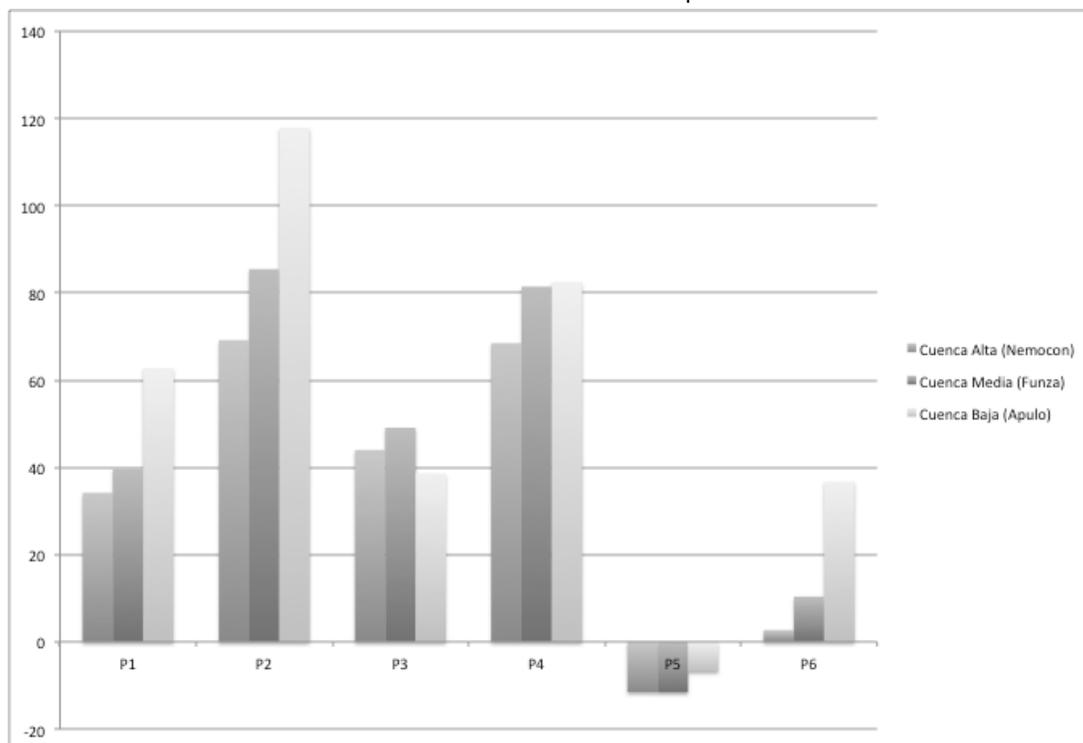
Tabla 3
Valores P de las ecuaciones de Precipitaciones.

Sector	Municipio	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Cuenca Alta	Nemocon	34,17861	69,16368	43,98515	68,49653	-11,4852	2,70097
Cuenca Media	Funza	39,64398	85,46049	49,0963	81,45897	-11,55368	10,36963
Cuenca Baja	Apulo	62,77095	117,83735	38,58165	82,49228	-6,71491	36,74337

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3, se puede observar las magnitudes de los valores P de las ecuaciones de las precipitaciones.

Figura 3
Valores P de las ecuaciones de Precipitaciones.



Fuente: Elaboración Propia.

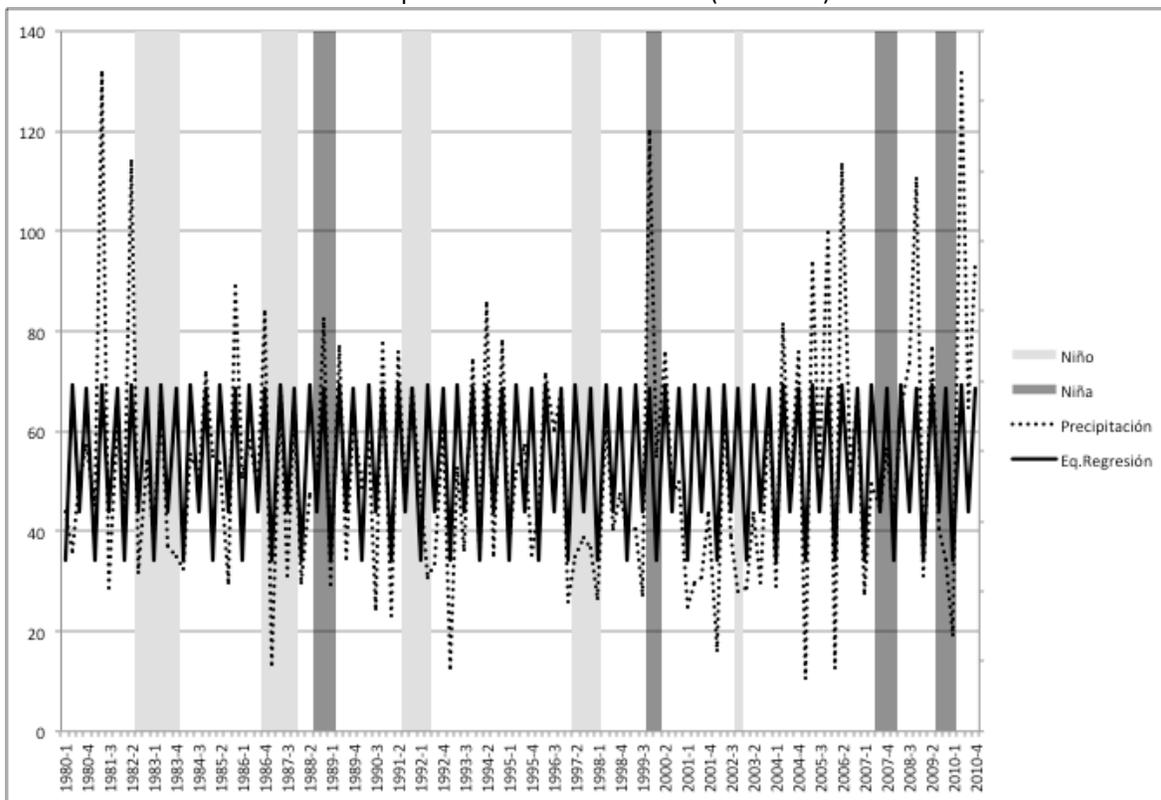
3.1. Análisis de resultados

Al observar los pesos obtenidos, se puede determinar que de las cuatro estaciones hay dos tipos de estados: uno que se puede llamar de invierno en cual hay un volumen considerable de lluvias, el cual corresponde a los trimestres MAM y SON; y el otro estado el de verano en el cual se presentan pocas precipitaciones que corresponde a los trimestres de DEF y JJA. El comportamiento de las estaciones de verano en las cuencas alta y media son similares, donde el trimestre DEF para ambas se presenta un verano más intenso; en cambio, para la cuenca baja el primer trimestre presenta un verano leve. El tercer trimestre JJA en las tres cuencas tiene comportamientos similares. Para las estaciones de invierno, el segundo trimestre MAM, el invierno más intenso se presenta en la cuenca baja, el invierno con intensidad intermedia se presenta en la cuenca media y en la cuenca baja se presenta el invierno más leve de las tres cuencas; con respecto al trimestre SON, que también es de invierno el comportamiento de las precipitaciones es muy similar en las cuencas baja y media, y en la cuenca alta las precipitaciones son inferiores comparativamente. Al observar P5 correspondiente al fenómeno de El Niño se evidencia que si provocan una disminución en las precipitaciones sobre las cuencas, en las cuales la influencia del fenómeno es mayor en las cuencas alta y media, con respecto a la baja. En relación al fenómeno de “La Niña”, la influencia de este es el aumento de las precipitaciones; en la cuenca alta la influencia del fenómeno de “La Niña” es prácticamente nula; en la cuenca media si provoca un aumento en las precipitaciones, y por último en la cuenca baja la influencia del fenómeno de la niña es muy alta, por lo cual induce un aumento muy significativo en las lluvias.

Para profundizar el análisis de la influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña, sé graficó el comportamiento real de las precipitaciones en los 3 puntos analizados; comparándolo con el graficó de la ecuación de precipitaciones hallada sin P5 y P6, y así observar las precipitaciones esperadas sin la presencia de los fenómenos de El Niño y La Niña. Para complementar el análisis, en los periodos de tiempo que se presentó los fenómenos de El Niño y La Niña se graficaron usando franjas en dos tonalidades. Este diagramación se realizo para

determinar si en el momento que se presente una variación significativa entre los datos reales y los obtenidos por la ecuación de regresión se podían relacionar con la presencia de los fenómenos climáticos. Las Figura 4,5 y 6 se presentan las figuras descritas en cada uno de las cuencas.

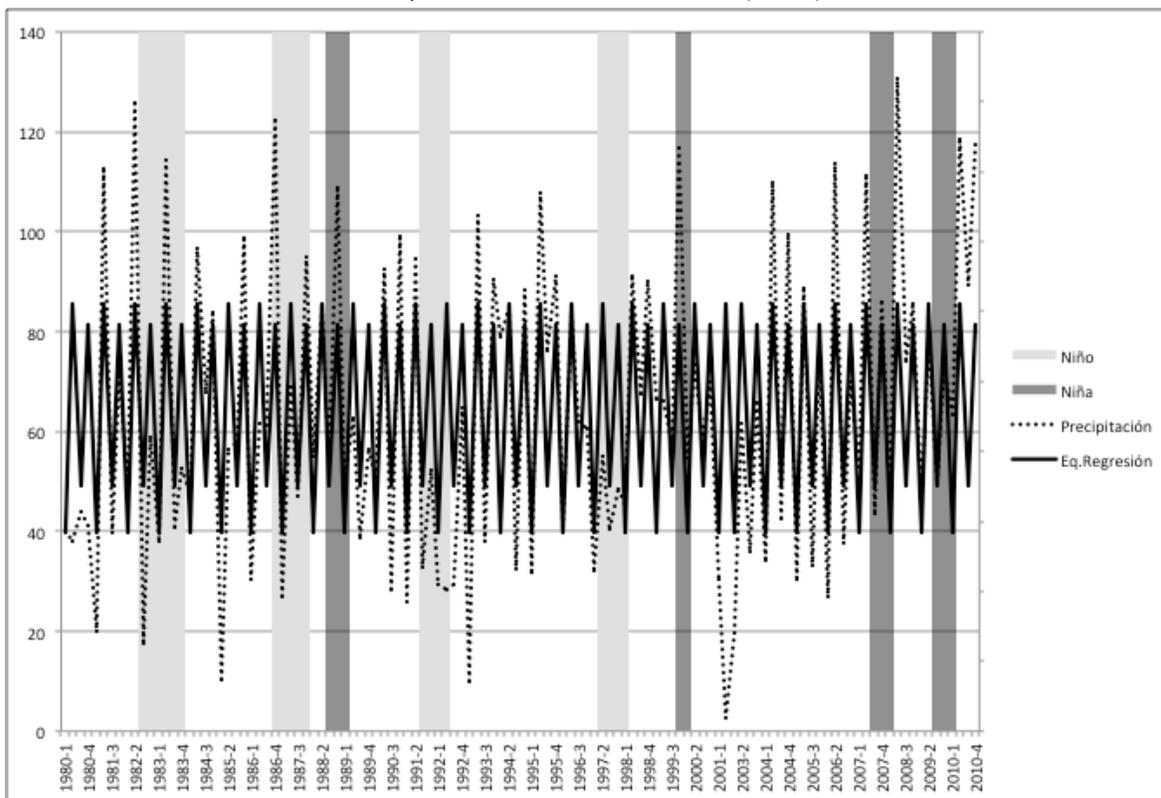
Figura 4
Precipitaciones en la Cuenca Alta (Nemocon)



Fuente: Elaboración Propia

Como ya se mencionó, en la cuenca alta el fenómeno de El Niño tiene una influencia en la disminución de las lluvias y el fenómeno de “La Niña” su influencia es prácticamente nula. Al observar la figura 4 se corrobora la influencia de los fenómenos climáticos en la cuenca, pero también muestra épocas de verano y de inviernos con mayor frecuencia que no pueden ser atribuibles a dichos fenómenos.

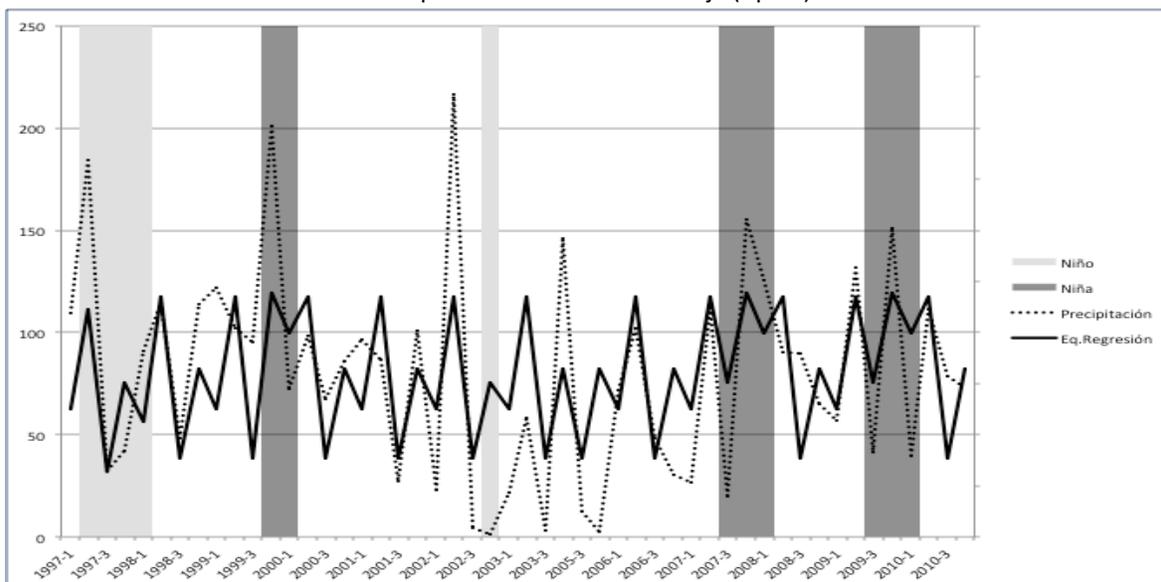
Figura 5
Precipitaciones en la Cuenca Media (Funza)



Fuente: Elaboración por los autores

En la cuenca media se encontró que si hay influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña en las precipitaciones de la zona. En la figura 5 se ve claramente esta situación; pero también se observa que en algunos casos hay un aumento o disminución de las lluvias con respecto a las esperadas, aunque no presente algunos de los dos fenómenos.

Figura 6
Precipitaciones en la Cuenca Baja (Apulo)



Fuente: Elaboración por los autores

Por último, en la cuenca baja, se había encontrado que la influencia del fenómeno de El Niño era baja, en cambio, la de La Niña era alta, lo cual es coherente con lo que muestra la Figura 6; pero también se observan algunos casos que hay cambios del comportamiento de las precipitaciones, que no se relacionan con los fenómenos climáticos.

4. Conclusiones

Se evidencia que efectivamente hay cuatro periodos de estaciones, los cuales se clasifican en dos épocas de invierno y verano.

Las épocas de verano son más fuertes en las cuencas alta y media del Río Bogotá que en la baja. También se determina que la influencia de el fenómeno de El Niño genera una fuerte disminución en las lluvias en las cuencas alta y media.

El trimestre de invierno MAM es mucho más fuerte en la cuenca baja que en la media, y en la cuenca media es más alta que la cuenca alta. Esta situación es muy coherente con la influencia del fenómeno de La Niña, donde influye significativamente en la cuenca baja, su influencia es media en la cuenca media y es prácticamente nula en la cuenca alta.

Se puede afirmar que hay una relación del aumento o disminución de las lluvias y de la influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña según su ubicación geográfica, en la cual la cuenca alta se ve mayormente afectada por las estaciones verano, en cambio, en la cuenca baja se ve fuertemente influenciada en las estaciones de invierno.

Se confirmó lo encontrado por anteriores investigaciones, en el cual se observa la complejidad espacio temporal de la precipitaciones y la variabilidad de estas en cortas distancias.

4.1. Recomendaciones

Se recomienda para trabajos futuros aplicar otras herramientas de predicción como redes neuronales, lógica difusa, sistemas neuro-difusos, en conjunto con técnicas de econometría espacial, porque se observa la relación e influencia en el comportamiento de las precipitaciones según su ubicación geográfica.

Es importante analizar otras variables independientes que puedan influir en las variaciones fuertes del comportamiento de las lluvias, aparte de los fenómenos de El Niño y La Niña.

Referencias bibliográficas

- Ávila Díaz, I. J., Carvajal Escobar, Y., & Gutiérrez Serna, S. E. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *TECNURA*, 18 (41), 120-133.
- Banco de la República. (Enero de 2007). El fenómeno de El Niño y su posible impacto en Colombia. Recuperado de http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/92.pdf
- Cai, M. (August de 2010). Study on variation in wet and low water of precipitation prediction based on Markov with weights theory. 2010 Sixth International Conference on Natural Computation, 4296 - 4300.
- Campos-Aranda, F. (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16 (3), 355-368.
- DANE. (2016). Cuentas Trimestrales. Recuperado de <http://www.dane.gov.co/index.php/pib-cuentas-nacionales/cuentas-trimestrales>

- Di, Y., Ding, W., Mu, Y., Small, D. L., Islam, S., & Chang, N.-B. (Abril de 2015). Developing machine learning tools for long-lead heavy precipitation prediction with multi-sensor data. 2015 IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC) , 63-68.
- González López, N., Carvajal Escobar, Y., & Loaiza Cerón, W. (2016). Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia. *TECNURA* , 20 (48), 101-114.
- Hurtado Montoya, A. F., & Mesa Sánchez, O. J. (2015). Cambio Climático y Cariabilidad Espacio-Temporal de la Precipitación en Colombia. *Revista EIA* , 12 (24), 131-150.
- IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguvio, Instituto Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP. (2014). Evolución de precipitación y temperatura durante los fenómenos El Niño y La Niña en Bogotá - Cundinamarca. Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC). Bogotá.
- Mesa Sánchez, Ó. J., & Peñaranda Vélez, V. M. (2015). Complejidad de la estructura espacio-temporal de la precipitación. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* , 39 (152), 304-320.
- Ramos, E., & Gónima, N. (2014 de Julio de 2014). Cuenca alta del río Bogotá. Recuperado de <http://blogs.elespectador.com/el-rio/2014/07/24/cuenca-alta-del-rio-bogota-donde-empiezan-los-problemas/>
- Taylan, D., & Küçükyaman, D. (Junio de 2011). Artificial neural networks for precipitation prediction: A case study on Eğirdir. 2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) , 310-314.
- Unidad de Planeación Minero Energético. (2014). ESTUDIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BAJO ESCENARIO DE CAMBIO CLIMATICO. Recuperado de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/generacion_electrica_bajo_escenarios_cambio_climatico.pdf
- Zhao, C., Ye, B., Ding, Y., & Yao, S. (2011). Analysis the Variability and Trends of Precipitation during 1959–2008 in Northwestern, China. 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE) , 80-83.