

## **Pronostico de radioatenuación troposférica por lluvia en las ciudades de Bogotá Y Medellín - Colombia.**

**(Forecasting of Tropospheric Radio Attenuation by Rain for Bogotá & Medellin cities – Colombia)**

**Rafael Roncallo Kelsey**  
[rironcallo@hotmail.com](mailto:rironcallo@hotmail.com)

**Rosy Rosillo Martinez**  
[rossyrosillo@gmail.com](mailto:rossyrosillo@gmail.com)

**Cesar Montoya**  
Universidad Rafael Beloso Chacín – Venezuela  
[montoyamedero@gmail.com](mailto:montoyamedero@gmail.com)

**Carlos Alberto Durante Rincon**  
Universidad del Zulia - Venezuela  
[durincarlos@gmail.com](mailto:durincarlos@gmail.com)

**Jesús Cendros Guasch**  
Universidad Rafael Beloso Chacin  
[jcendros@urbe.edu](mailto:jcendros@urbe.edu)

**RECIBIDO JULIO 2011 ACEPTADO SEPTIEMBRE 2011**

### **RESUMEN**

Este proyecto de investigación tuvo como finalidad determinar el pronóstico de la radio atenuación troposférica por lluvia mensual, la cual es el factor que más afecta a las señales que se transmiten en frecuencias superiores a 10Ghz. Existen metodologías de predicción que son capaces de estimar la atenuación en cualquier punto del planeta. Se analizó la atenuación de dos ciudades del territorio colombiano, Medellín y Bogotá. Los datos pluviométricos usados en esta investigación fueron suministrados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) y procesados con un software desarrollado en MatLab. El estudio según el tipo de investigaciones de tipo Ex Post Facto, predictiva y de diseño no experimental. Para el desarrollo de esta investigación se tomaron en cuenta distintas fases tales como: la recopilación y validación de los datos de lluvia, esta fase fue la recaudación y el procesamiento de los registros de lluvias proporcionados por el IDEAM; en la segunda se analizaron los resultados del método de pronóstico ARIMA, La tercera fase, se evaluaron con detenimiento los resultados obtenidos con el método de pronóstico utilizado. De igual manera, se analizaron los resultados obtenidos resumidos en tablas y graficas y por último se determinó la radio atenuación troposférica a partir del pronóstico de lluvias, donde se efectúa el cálculo de la radio atenuación a partir de las intensidades de lluvia pronosticadas para obtener la radio atenuación anual a diferentes frecuencias de trabajo.

**Palabras clave:** pronóstico, lluvia, radio atenuación, troposfera, ARIMA.

## ABSTRACT

This research project aims to determine the tropospheric radio attenuation due to rainfall, which is the factor that most affects the signals that are transmitted at frequencies above 10Gh. Prediction methodologies exist that are able to estimate the attenuation at any point on the planet. For this study the radio attenuation of two cities of Colombia was analyzed, Medellin and Bogota. Rainfall data used in this research were provided by the IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) and processed with software developed by MatLab, the calculation of attenuation was based on ITU Recommendation 618-9. The study is Ex Post Facto, predictive and not experimental. For the development of this research was done following these steps: gathering and validation of rainfall data, collection and processing of rainfall records provided by the IDEAM, application and analysis of prognostic method ARIMA. In the second phase, the results obtained by the forecasting method were evaluated. Similarly, the results were summarized in tables and graphs and finally it was determined the tropospheric radio attenuation forecast by the calculation of the annual radio attenuation after predicted rainfall intensities for different frequencies.

Key words: forecast, rain, radio attenuation, troposphere, ARIMA.

## INTRODUCCIÓN

El espacio libre responde a un modelo ideal analógico a las condiciones de propagación en el vacío. En el entorno terrestre muy pocas situaciones se ajustan a este modelo. La presencia de la tierra, la atmósfera y la ionosfera alteran en la mayoría de los casos reales la condición de propagación. En la troposfera ocurren diferentes fenómenos causantes de la radio atenuación, entre ellos, están la atenuación por absorción atmosférica, atenuación por las nubes, niebla, granizo, nieve, despolarización por lluvia además de cristales de hielo, generan una pérdida de la señal casi despreciable.

Sin embargo, el principal factor que influye en el desvanecimiento de un enlace de comunicación implementando un medio no guiado es la lluvia. Debido a la dispersión y absorción producida por la reactividad de los iones en conjunto con las moléculas del agua ante una onda electromagnética. La radio atenuación causada por la lluvia se mide por dB/Km en función de la frecuencia para un trayecto próximo a la superficie de la tierra.

En este trabajo se muestran los niveles de atenuación troposférica que sufren las señales de radio a causa de la lluvia en la ciudad de Bogotá y Medellín de la República de Colombia. Para la realización de esta investigación.

El desarrollo de esta investigación permitirá a las empresas de telecomunicaciones tanto privadas como estatales de la República de Colombia, las cuales presten servicios a la ciudad de Medellín y Bogotá evaluar la vulnerabilidad de los posibles enlaces de transmisión a ser instalados en esta zona.

## ONDAS ELECTROMAGNETICAS

Son aquellas ondas que no necesitan un medio material para propagarse. Incluyen, la luz visible, las ondas de radio, de televisión y telefonía.

Todas se propagan en el vacío a una velocidad constante, muy alta (300 0000 km/s) pero no infinita. Gracias a ello podemos observar la luz emitida por una estrella lejana hace tanto tiempo que quizás esa estrella haya desaparecido ya. O enterarnos de un suceso que ocurre a miles de kilómetros prácticamente en el instante de producirse.

## TROPOSFERA

La troposfera es la capa más baja de la atmósfera de la Tierra. La troposfera comienza a nivel del suelo y sube a una altura de 7 a 20 sobre el nivel del mar. La mayor parte de la masa (cerca de 75-80%) de la atmósfera está en la troposfera. Casi todos los estados del tiempo ocurren en esta capa. El aire es más caliente en la parte inferior de la troposfera cerca del nivel del suelo. Más arriba, el aire se enfría. La presión y la densidad del aire también son menores en elevadas altitudes.

## REFRACCION

La refracción consiste en el cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en el que lo hace. Por consiguiente, hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro a distinta densidad.

Al observar la siguiente figura 1 se puede observar una refracción de un frente de onda en una frontera plana entre dos medios con distintas densidades.

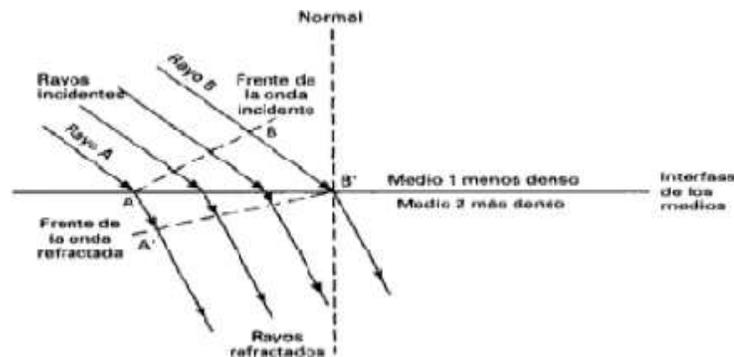


Figura 1. Refracción en una frontera plana entre dos medios. (Fuente: Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, 2003)

## DIFRACCIÓN

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un obstáculo. La tierra junto con sus irregularidades puede impedir la visibilidad entre antena transmisora y la receptora en ciertas ocasiones. La zona oculta a la antena transmisora se denomina la zona de difracción (figura 2). En esta zona los campos no son nulos debido a la difracción causada por el obstáculo y, por tanto, es posible la recepción, si bien con atenuaciones superiores a las del espacio libre.

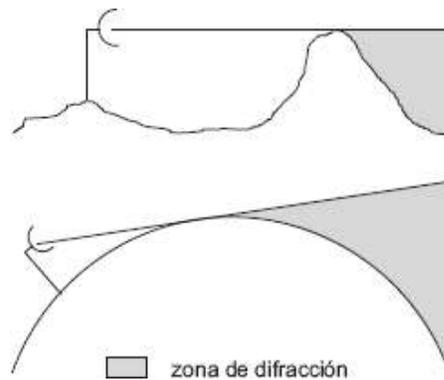


Figura 2. Obstrucción causada por tierra. (Fuente: Cardama, et. al, 2005)

## ATENUACION

Las señales de transmisión a través de largas distancias están sujetas a distorsión que es una pérdida de fuerza o amplitud de la señal. La atenuación es la razón principal de que el largo de las redes tenga varias restricciones. Si la señal se hace muy débil, el equipo receptor no interceptará bien o no reconocerá esta información. Esto causa errores, bajo desempeño al tener que transmitir la señal. Se usan repetidores o amplificadores para extender las distancias de la red más allá de las limitaciones del cable. La atenuación se mide con aparatos que inyectan una señal de prueba en un extremo del cable y la miden en el otro extremo.

## ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

La atmosfera produce atenuación en la señal que la está atravesando. Esto se debe fundamentalmente a la presencia de vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono. La atenuación debida a la atmósfera es en función del ángulo de elevación, por ello, normalmente se puede obtener de una gráfica el valor de atenuación correspondiente a un ángulo de elevación de  $90^\circ$ . En los radioenlaces troposféricos se producen atenuaciones de la señal durante su propagación, causadas por la absorción y dispersión en hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo o la niebla. Estos efectos son especialmente importantes en el caso de sistemas que trabajan a frecuencias milimétricas.

La grafica de la figura 3, corresponde a una trayectoria en dirección del cenit, o sea, directamente hacia arriba y siguiendo el camino más corto posible; de modo que si el ángulo de elevación de la estación terrena es otro, hay que corregir la estimación de dicha absorción atmosférica.

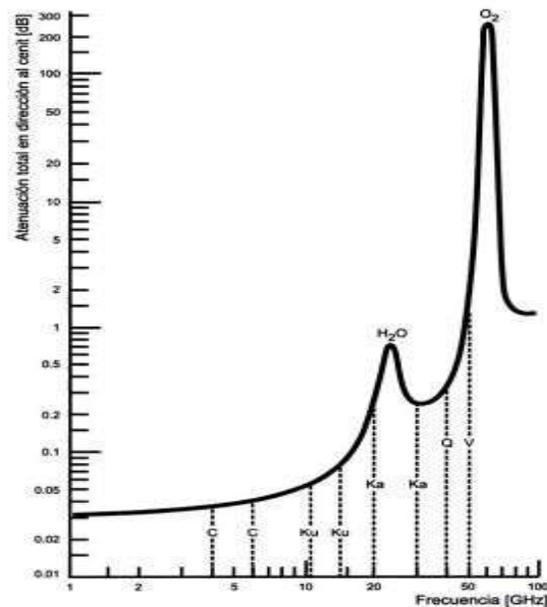


Figura 3. Atenuación producida por la absorción atmosférica, en dirección al cenit, a una temperatura de 20°C y densidad de vapor de agua de 7.5 g/m<sup>3</sup>. (Fuente: Neri, Comunicaciones por Satélite, 2003)

### PERDIDAS PRODUCTO DE LA LLUVIA

El efecto atmosférico más grave al que está expuesto un enlace satelital es el efecto de la atenuación producto de la lluvia. La lluvia atenúa las ondas radioeléctricas mediante dos mecanismos: dispersión y absorción.

La atenuación producto de la lluvia aumenta con la frecuencia, siendo especialmente perjudicial en la banda Ku, Ka y superiores, para lograr una disponibilidad adecuada del enlace se debe transmitir suficiente potencia adicional (margen de desvanecimiento) para contrarrestar la máxima atenuación causada por la lluvia. Como la predicción de dicha atenuación es un proceso estadístico, se han diseñado numerosos modelos cuyos resultados concuerdan bien con las observaciones experimentales, dichos modelos, son en función de la frecuencia de operación, las estadísticas pluviales según la ubicación geográfica de la estación terrena, la polarización, la temperatura ambiente.

Es muy conveniente hacer una predicción lo más exacta posible de la atenuación producto de la lluvia, para poder dotar al enlace del margen de desvanecimiento adecuado, garantizando así la disponibilidad requerida del enlace (99.9%).

Cuando llueve en la zona donde está instalada una estación terrena, ya sea transmisora o receptora, las señales portadoras son atenuadas conforme se propagan a través del aire en donde esté lloviendo; la distancia total  $d$  que las señales viajan a través del canal depende de la altura  $h$  de las nubes con relación al piso y del ángulo de elevación  $\theta$  de la antena de la estación (figura 4).

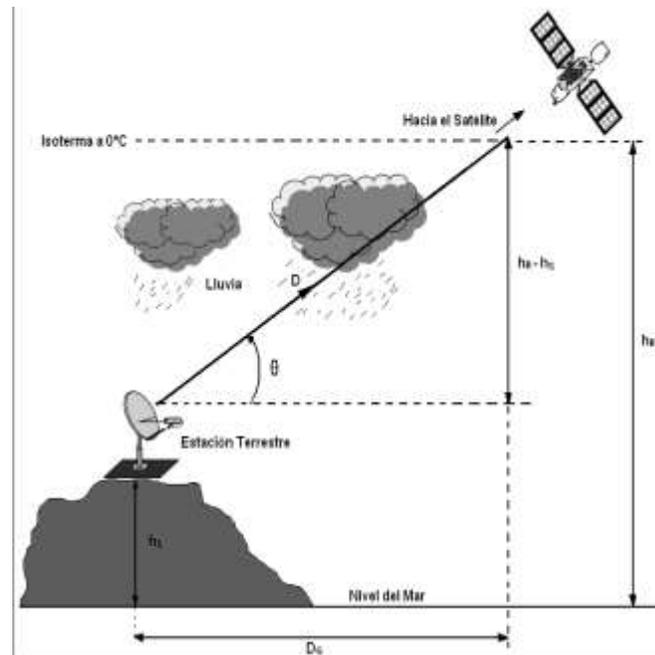


Figura 4. Representación parcial de un trayecto tierra-espacio con algunos de los parámetros empleados para la predicción de atenuación por lluvia.

Fuente: Rosado, 1999

## METODO ARIMA

El modelo ARIMA de Box Jenkins ajusta a una serie de tiempo, representa realizar pasos de filtraje hasta que solo haya ruido aleatorio, se usa para generar pronósticos. Box y Jenkins (1976), para ajustar un modelo ARIMA a una serie de tiempo proponen un método iterativo que incluye:

- (a) Identificar el modelo aplicando el juicio del analista.
- (b) Estimar los parámetros.
- (c) Verificar la adecuación del modelo.
- (d) Hacer pronósticos de ser necesario.
- (e) Examinar la gráfica de serie de tiempo para si es necesaria una transformación para tener varianza constante.
- (f) Examinar la función de auto correlación (ACF) para ver si las auto correlaciones no decaen, indicando que se pueden requerir diferencias para dar una media constante.

Un patrón de estacionariedad que se repite cada  $k$ -ésimo intervalo de tiempo sugiere tomar una diferencia  $k$ -ésima para eliminar una porción del patrón. La mayoría de las series no requieren más de dos operaciones de diferencias u órdenes. Si los picos de la ACF decaen rápidamente, no hay necesidad de diferencias adicionales. Una indicación de sobre diferenciación de una serie es que la primera auto correlación es cercana a  $-0.5$  y pequeños valores dondequiera.

## PROCEDIMIENTO

A continuación se resumen las cuatro fases llevadas a cabo durante el desarrollo de esta investigación para el cálculo de la radio atenuación troposférica pronosticada para los años 2011 hasta el 2014.

## RECOLECCIÓN DE DATOS DE LLUVIA

En esta fase se obtuvo los datos de las precipitaciones para la ciudad de Bogotá y Medellín, necesarios para realizar el pronóstico de los periodos 2011 al 2014, los mismos fueron extraídos de la base de datos del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia).

Los valores suministrados por IDEAM corresponden a datos desde enero del año 2000 hasta diciembre de 2010. Todos los datos obtenidos constituyen valores de lluvia reales expresados por mes y años en la ciudad de Bogotá y Medellín.

## APLICACIÓN DEL METODO DE PRONOSTICO ARIMA

En la segunda fase, se ingresan los datos recolectados en la fase I y se detallan los resultados obtenidos con el método de pronóstico empleado. También, se dan a conocer las tablas y gráficas de los valores pronosticados con el método ARIMA el cual es el método de pronóstico que mas se ajusta a la realidad y a lo que desea obtener en la investigación.

Par a ello fue necesario establecer un análisis de la serie de datos temporal mediante la metodología de Box-Jenkins. Por otro lado, se realiza la verificación y comparación de los registros de lluvia diaria y mensual desde el año 2000 hasta el 2011.

## DETERMINACIÓN DE LA RADIO ATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

En esta fase, después de haber realizado los cálculos para determinar el pronóstico de la lluvia en la ciudad de Bogotá y Medellín, se muestran los resultados del pronóstico de los 4 años subsiguientes, es decir, comenzando desde el año 2011 hasta el año 2014.

Para la observación y determinación de la radio atenuación pronosticada se cuenta con el software Matlab, el cual es un programa que permite obtener las gráficas de radio atenuación a partir de los pronósticos de lluvias y las variaciones de la frecuencia. La realización de los diagramas espectrales permitió identificar la estacionalidad de las localidades estudiadas y la determinación de sus períodos.

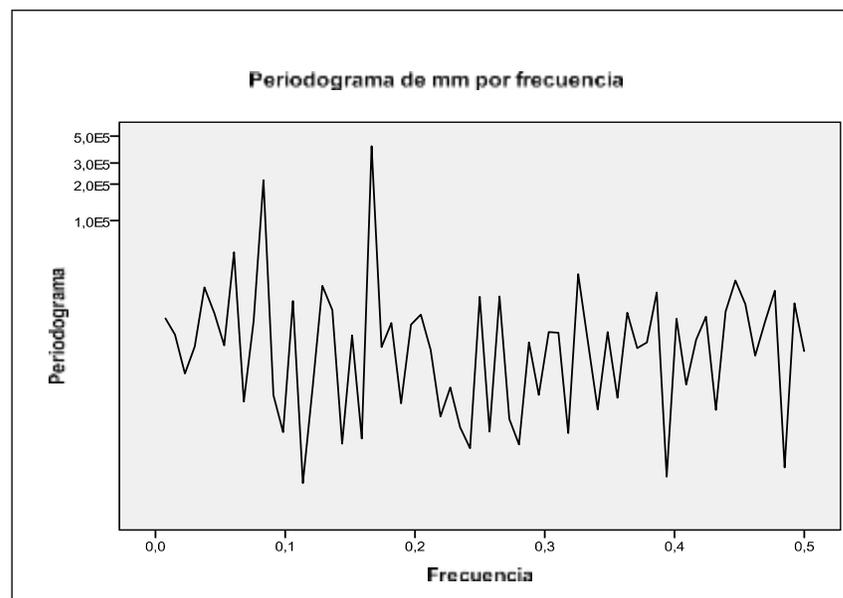


Figura 5. Periodograma para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real para la ciudad de Bogotá. (Fuente: propia, 2011)

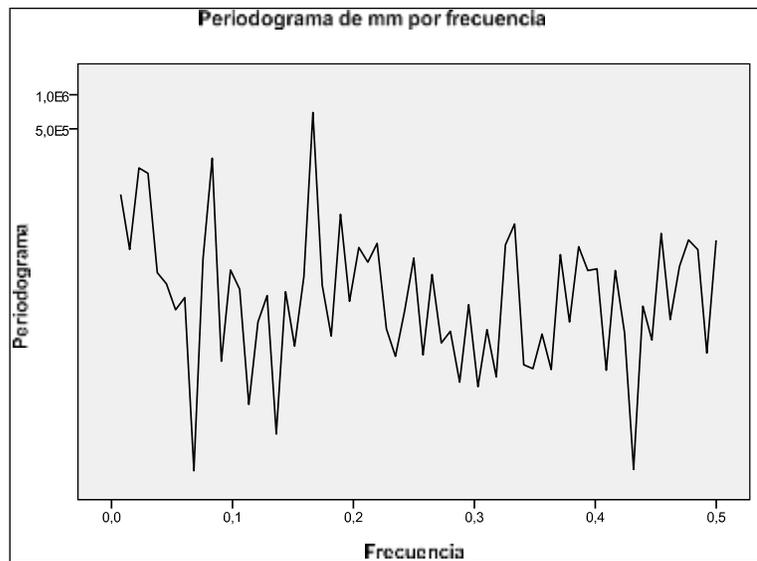


Figura 6. Periodograma para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real para la ciudad de Medellín. (Fuente: propia, 2011)

Se puede observar en ambos periodogramas la estacionalidad la cual indica que hay un periodo de lluvia anual, esto especifica la frecuencia del ciclo de la serie datos. En la figura 6 se observa que el periodograma, el cual indica un periodo de lluvia semestral para la ciudad de Medellín, nos lleva a afirmar que existe estacionariedad en la serie. De igual manera, la figura 6 se puede observar en el periodograma un periodo de lluvia semestral para la ciudad de Medellín de 12 meses, lo cual indica que hay estacionalidad en la serie.

Por otro lado, no se aprecia la condición de estacionariedad la cual se observa el valor de las medias y las varianzas posteriormente en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. Medias y varianzas para los años de estudio Ciudad de Bogotá

Año	Media	Varianza
2000	69,93	6372,91
2001	59,43	3587,68
2002	48,76	1080,60
2003	46,44	537,68
2004	44,81	2668,96
2005	36,35	1050,99
2006	39,86	1439,60
2007	53,66	1647,24
2008	21,66	1114,54
2009	68,48	816,25
2010	109,64	4574,99

Cuadro 2. Medias y varianzas para los años de estudio Ciudad de Medellín

Año	Media	Varianza
2000	374,083	29606,63
2001	160,502	13532,96
2002	199,002	40076,73
2003	185,617	20467,32
2004	199,501	10401,00
2005	197,967	9745,744
2006	230,333	17949,15
2007	243,168	19969,53
2008	296,167	17027,79
2009	197,000	9193,455
2010	271,167	22525,79

Fuente: propia, 2011

En la cuadro 1 y el cuadro 2 se revela que existen variaciones crecientes y decrecientes a lo largo de los años, lo que indicó que hay variación en cuanto a la media y la varianza de un año para otro, lo que quiere decir que no hay estacionariedad en la serie. Debido a la existencia de estos cambios en la varianza se debe transformar la serie para estacionarla, y para estacionar las medias se debe diferenciar. En razón de la existencia de ciclos como se mencionó anteriormente en el periodograma, se aplica la diferenciación en los mismos.

Posteriormente, se recurren a las gráficas de las auto correlaciones simples y parciales con el fin de determinar el modelo ARIMA específico para el cálculo del pronóstico en la ciudad de Bogotá. Tal como se muestra en la figura 7 se observa que al utilizar los datos de lluvia, no se visualiza un patrón valido para identificar un modelo apropiado ARIMA ya que la auto correlación simple no decae exponencialmente a 0.

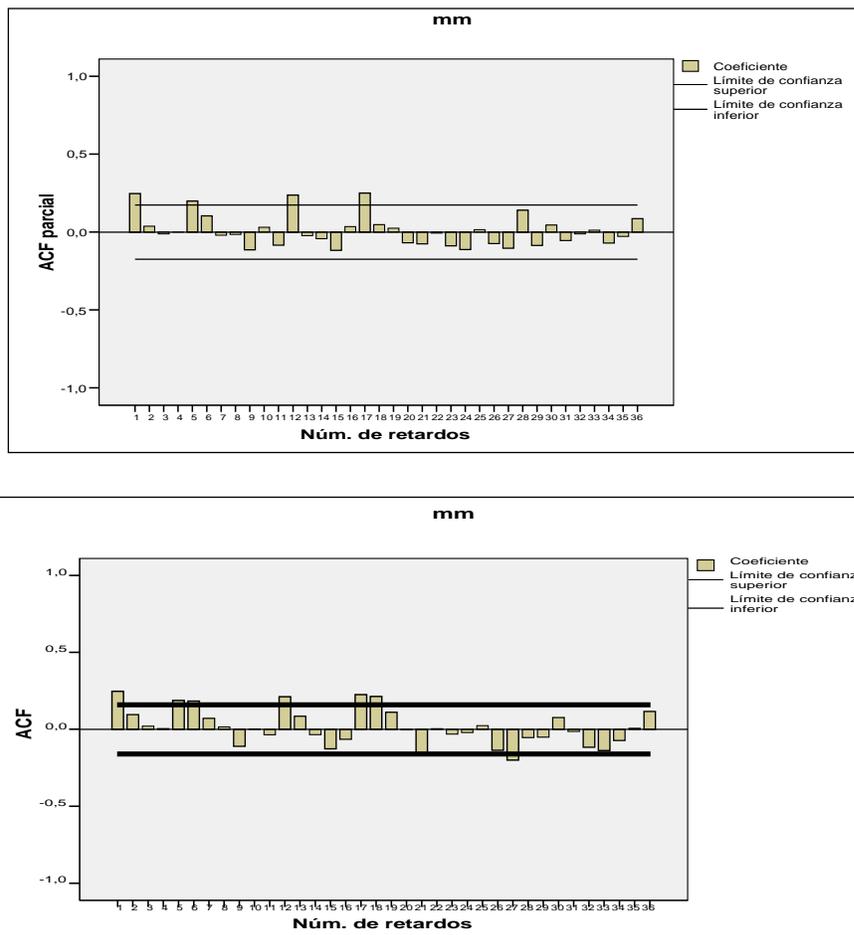


Figura 7. Función Auto correlación Simple y Parcial de la serie de datos de lluvia real en la ciudad de Bogotá. (Fuente: propia, 2011)

La figura 7 de auto correlación confirma la necesidad de transformar y diferenciar puesto que las gráficas ni decaen exponencialmente ni disminuyen progresivamente. Luego, como se explicó con anterioridad, se realiza la auto correlación aplicando las transformaciones correspondientes. La figura 8 muestra los resultados de la auto correlación aplicando la transformación Logaritmo Natural y la Diferenciación de orden 1 para la serie y el ciclo. La razón por la que se transforma es porque las varianzas cambian, y se diferencia porque las correlaciones no decaen bruscamente lo que indica indudablemente una variación de la media.

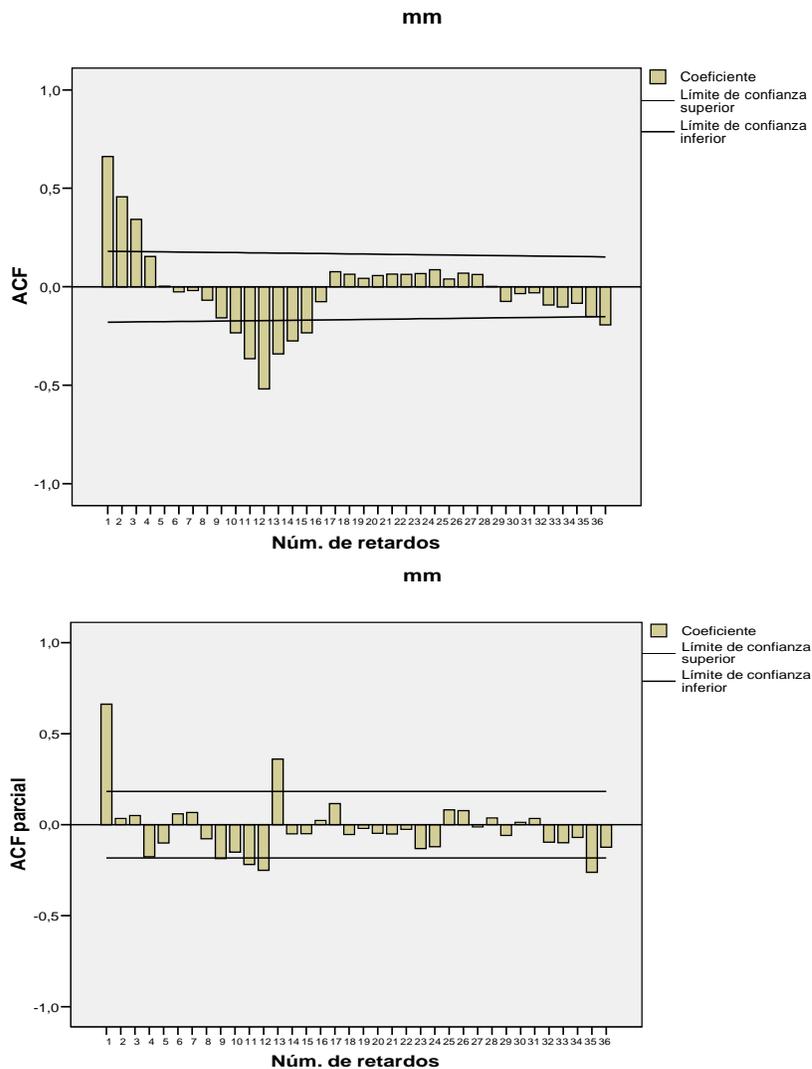


Figura 8. Auto correlación simple y parcial para la ciudad de Bogotá con datos trasformados y diferenciados. Fuente: propia, 2011

De igual manera para la ciudad de Medellín al establecer la periodicidad igual a 12 meses, se recurren a las gráficas de las auto correlaciones simples y parciales para determinar el modelo ARIMA específico para el cálculo del pronóstico para dicha ciudad. Tal como se muestra en las figuras 9 y 10, se observa que al utilizar los datos de lluvia real de la ciudad de Medellín, se visualiza un patrón valido para identificar un modelo apropiado ARIMA al igual que el caso de la ciudad de Bogotá.

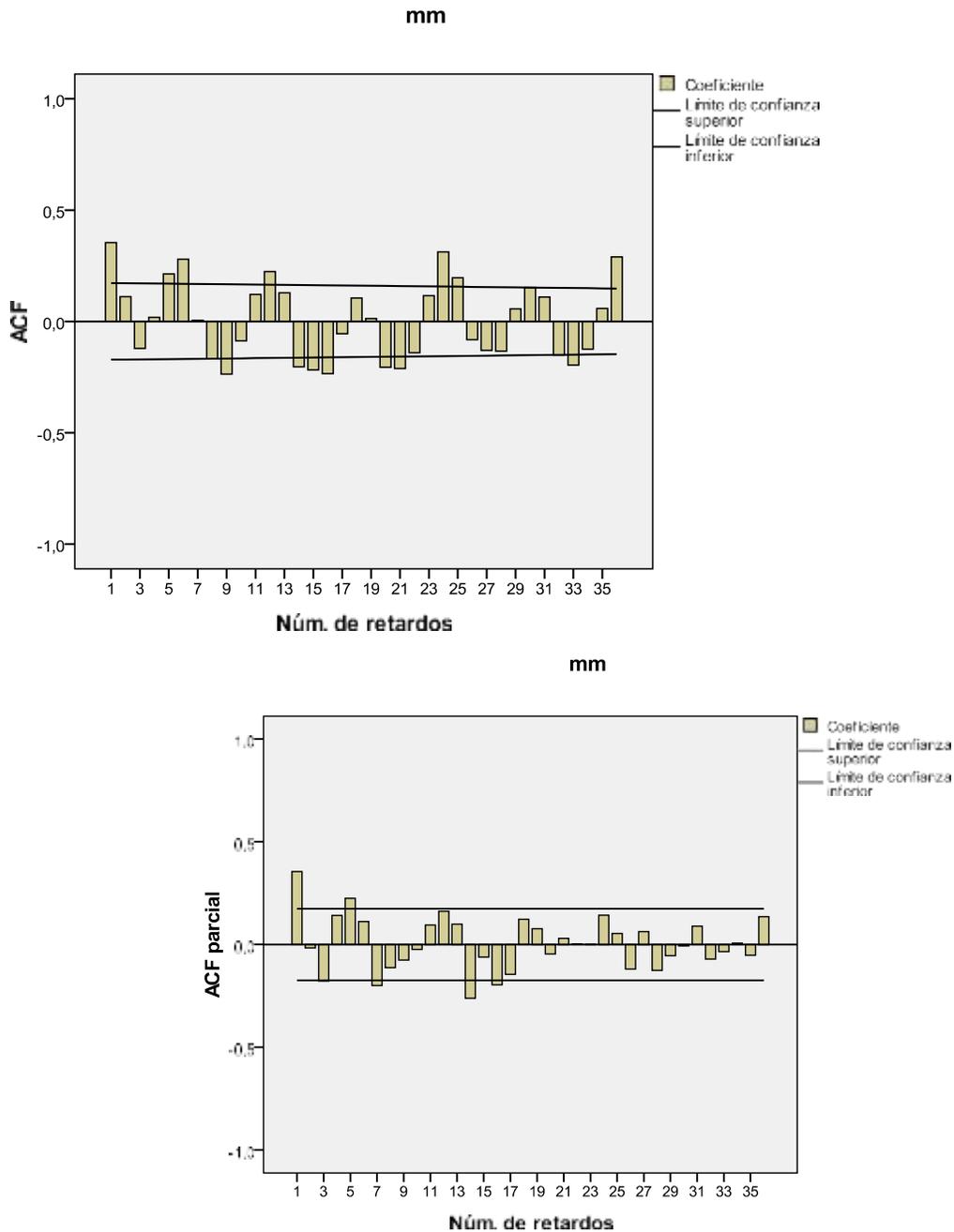


Figura 9. Auto correlación simple y parcial para la ciudad de Medellín con datos reales de lluvia de la ciudad de Medellín. Fuente: propia, 2011

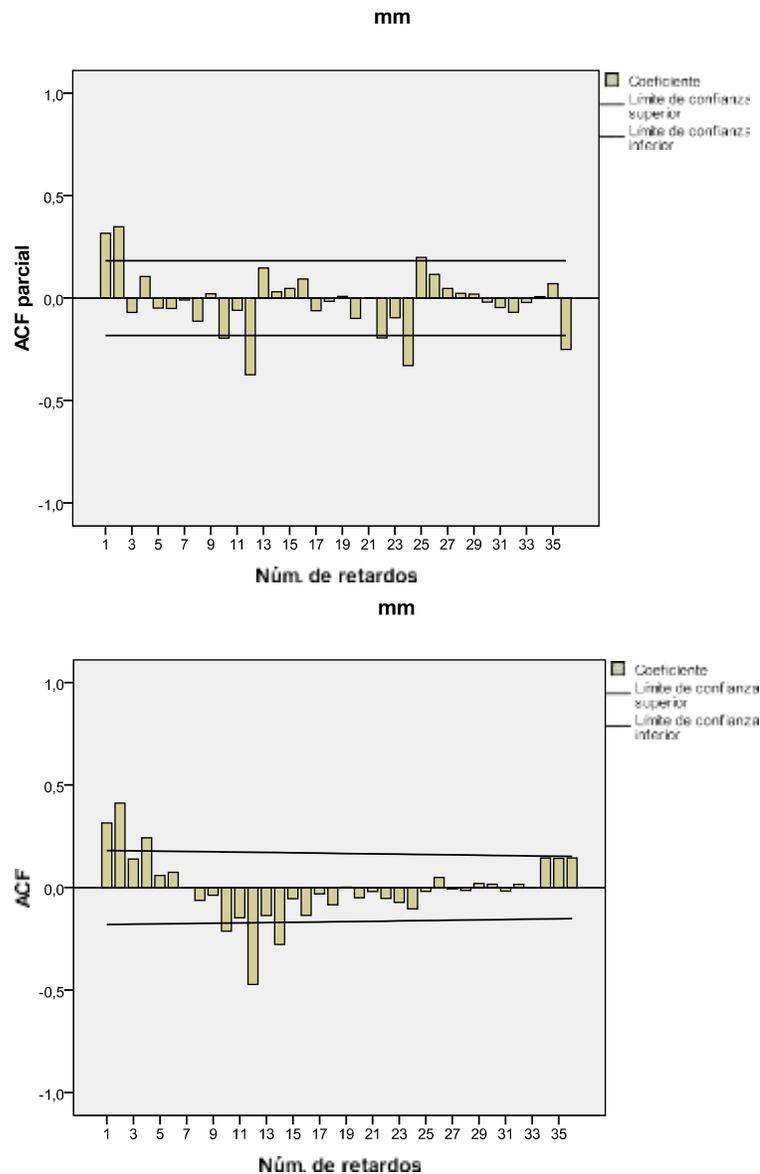


Figura 10. Auto correlación simple y parcial para la ciudad de Medellín con datos transformados y diferenciados. Fuente: propia, 2011.

De acuerdo a los gráficos de auto correlaciones de la figuras 8 y 10, tanto en la serie como el modelo se ajusta para ambas ciudades colombianas con los parámetros  $(1,0,0),(0,1,1)$  y para Medellín  $(1,0,1)(1,1,0)$ , a pesar de que las gráficas no sean evidentemente concluyentes se puede apreciar que el coeficiente va decayendo exponencialmente a cero, especificando un comportamiento al cual aplica el modelo  $AR(1),MA(1)$  para Bogotá y  $AR(1),MA(1)$  para Medellín, con diferenciación estacional de orden 1, los cuales se pueden verificar en las estimaciones paramétricas del cuadro 3 y cuadro 4.

A continuación en el cuadro 5 se demuestra una vez más que el  $(1,0,0)$   $(0,1,1)$  con la constante es el mejor modelo para la ciudad de Bogotá al observar sus coeficientes óptimos, donde los retardos son significativos  $(0,000)$ , es decir, menores a 0.05.

Cuadro 3. Estimaciones de los parámetros con la constante para la ciudad de Bogotá.

**Estimaciones de los parámetros**

		Estimaciones	Error típico	t	Sig. aprox.
Retardos no estacionales	MA1	,912	,048	18,918	,000
Retardos estacionales	Seasonal MA1	,826	,134	6,160	,000
Constante		,398	,155	2,561	,012

Se ha utilizado el algoritmo de Melard para la estimación.

Fuente: propia, 2011.

A continuación en el cuadro 4 se demuestra que el modelo (1,1,0) (1,1,0) sin constante, es el mejor modelo para la ciudad de Medellín al observar sus parámetros, donde los retardos son significativos (0,000), es decir, menores a 0.05.

Cuadro 4. Estimaciones de los parámetros con la constante para la ciudad de Medellín.  
Estimaciones de los parámetros

Estimaciones de los parámetros			Estimación	ET	t	Sig.
mm-Modelo_1 mm Sin transformación AR	Retardo 1		,892	,081	11,067	,000
	MA	Retardo 1	,694	,126	5,525	,000
	AR, estacional	Retardo 1	-,572	,078	-7,303	,000
	Diferenciación estacional		1			

Nuevamente se concluye que los modelos mostrados dan significativo tanto los parámetros MA(1), MA(1) de la ciudad de Bogotá como para los parámetros AR(1),AR(1) de la ciudad de Medellín. Finalmente en el cuadro 5 y 6 se presentan los valores pronosticados de intensidad de lluvia a partir del año 2011, calculados utilizando los datos de lluvia real desde el año 2000 hasta el año 2010 de las ciudades estudiadas.

Cuadro 5. Valores de lluvia pronosticada aplicando el método ARIMA (1,0,0) (0,1,1) para la ciudad de Bogotá.

Fecha	Predicciones mm/h	Fecha	Predicciones mm/h
ENE-2011	47,74873	ENE-2013	61,72092
FEB-2011	48,03946	FEB-2013	62,44848
MAR-2011	48,33904	MAR-2013	63,18433
ABR-2011	48,6473	ABR-2013	63,92819
MAY-2011	48,96406	MAY-2013	64,67977
JUN-2011	49,28918	JUN-2013	65,43882
JUL-2011	49,62249	JUL-2013	66,20507
AGO-2011	49,96382	AGO-2013	66,97829
SEP-2011	50,313	SEP-2013	67,75822
OCT-2011	50,66988	OCT-2013	68,54465
NOV-2011	51,0343	NOV-2013	69,33734

DIC-2011	51,4061	DIC-2013	70,13609
ENE-2012	53,43408	ENE-2014	72,68687
FEB-2012	53,93382	FEB-2014	73,64118
MAR-2012	54,4429	MAR-2014	74,60201
ABR-2012	54,96106	ABR-2014	75,56909
MAY-2012	55,48805	MAY-2014	76,5422
JUN-2012	56,02363	JUN-2014	77,52111
JUL-2012	56,56754	JUL-2014	78,5056
AGO-2012	57,11954	AGO-2014	79,49546
SEP-2012	57,67942	SEP-2014	80,49049
OCT-2012	58,24693	OCT-2014	81,49051
NOV-2012	58,82186	NOV-2014	82,49533
DIC-2012	59,404	DIC-2014	83,50478

Cuadro 6. Valores de lluvia pronosticada aplicando el método ARIMA (1,10) (1, 1,0) para la ciudad de Medellín.

Fecha	Predicciones mm/hr	Fecha	Predicciones mm/hr
ENE-2011	0,257435484	ENE-2013	0,219955645
FEB-2011	0,20744494	FEB-2013	0,180105655
MAR-2011	0,282043011	MAR-2013	0,261583333
ABR-2011	0,390055556	ABR-2013	0,377688889
MAY-2011	0,518774194	MAY-2013	0,534817204
JUN-2011	0,535008333	JUN-2013	0,523855556
JUL-2011	0,373055108	JUL-2013	0,424997312
AGO-2011	0,318837366	AGO-2013	0,338764785
SEP-2011	0,372755556	SEP-2013	0,435323611
OCT-2011	0,513301075	OCT-2013	0,524627688
NOV-2011	0,426575	NOV-2013	0,458976389
DIC-2011	0,211625	DIC-2013	0,246604839
ENE-2012	0,155926075	ENE-2014	0,184813172
FEB-2012	0,125344828	FEB-2014	0,152809524
MAR-2012	0,223169355	MAR-2014	0,240791667
ABR-2012	0,350972222	ABR-2014	0,363497222
MAY-2012	0,547505376	MAY-2014	0,543026882
JUN-2012	0,500847222	JUN-2014	0,5115625
JUL-2012	0,487517473	JUL-2014	0,46152957
AGO-2012	0,359205645	AGO-2014	0,351134409
SEP-2012	0,513305556	SEP-2014	0,480570833
OCT-2012	0,534833333	OCT-2014	0,531002688
NOV-2012	0,497772222	NOV-2014	0,481670833
DIC-2012	0,289474462	DIC-2014	0,271563172

Como se puede observar los cuadros 5y 6, se observan los resultados obtenidos con el método ARIMA utilizando los valores de los datos pluviométricos reales de la ciudad de Bogotá, se destaca que los valores se aproximen a los obtenidos o que sean similares, esto se puede observar en los grafico 8 y 9, donde se observa que la lluvia real es similar a la lluvia pronosticada, demostrando la confiabilidad del método ARIMA.

Para observar claramente los resultados que se muestra a continuación en el grafico 8, donde se manifiestan los valores observados, los valores ajustados y sus respectiva predicción desde 2011 hasta el 2014.

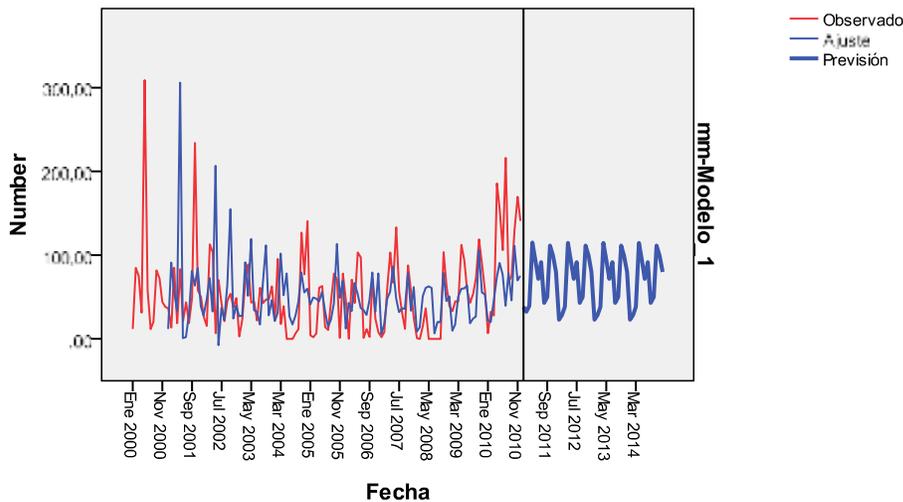


Grafico 11. Valores de lluvia real y pronosticada aplicando el método ARIMA (1,0,0)(0,1,1) para la ciudad de Bogotá. Fuente: propia,

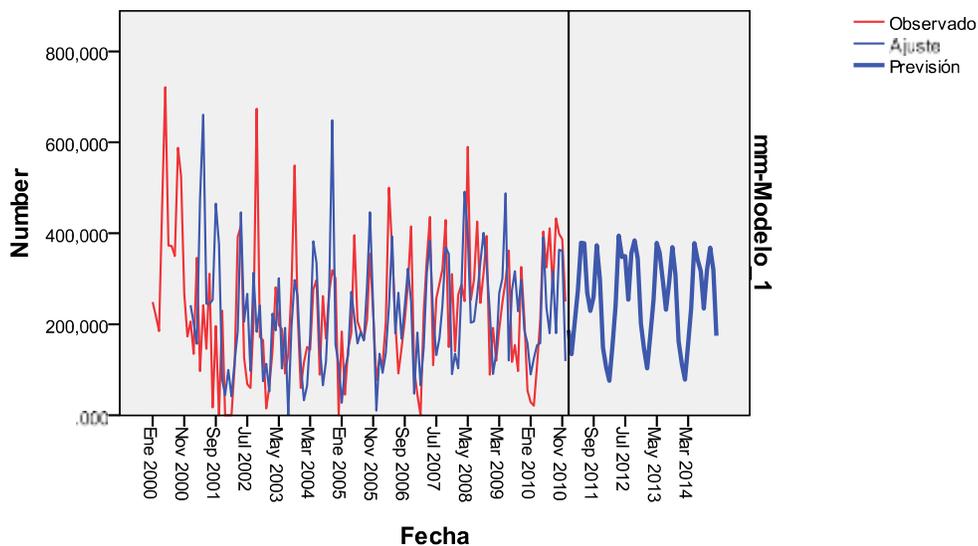


Grafico 12. Valores de lluvia real y pronosticada aplicando el método ARIMA (1, 0,1) (1, 1,0) para la ciudad de Medellín. Fuente: propia, 2011.

En el mismo orden de ideas, tanto en el grafico 8 como en el 9 se aprecia el comportamiento de las lluvias reales y las lluvias pronosticadas el cual se consideran que son similares al mantener la

misma cuantificación o parámetro, igualmente no se puede apreciar que existan variaciones significativas e importantes entre ambos datos. Lo que si se puede observar con claridad es la tendencia de las lluvias a incrementarse el cual sigue aumentando exponencialmente en los últimos años en todo el país.

### ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA POR HORA

El procedimiento consistió en dividir los valores de lluvia pronosticados expresados en mm/mes, por el número de días correspondientes al mes, y multiplicarlo por el número de horas de un día (24 horas). Las unidades de los valores resultantes se expresan en mm/hr.

A continuación en el cuadro 7 y 8 se muestran los resultados del pronóstico realizado para los años 2010-2014 para las ciudades de Bogotá y Medellín

Tabla 7. Pronóstico de lluvia mensual 2010-2014 para Bogotá. En mm/hr

AÑO	2011	2012	2013	2014
enero	0.11125	0.15515	0.20547	0.26221
febrero	0.14159	0.17233	0.22318	0.28045
marzo	0.15641	0.20138	0.25277	0.31058
abril	0.21748	0.26299	0.31491	0.37326
mayo	0.21308	0.25912	0.31158	0.37046
junio	0.18446	0.23103	0.28403	0.34344
julio	0.18274	0.22985	0.28338	0.34333
agosto	0.15378	0.20143	0.25549	0.31598
septiembre	0.16827	0.21645	0.27105	0.33207
octubre	0.25174	0.30046	0.35559	0.41714
noviembre	0.21434	0.26359	0.31926	0.38135
diciembre	0.20773	0.25752	0.31372	0.37634

Fuente: propia, 2011

Cuadro 8. Pronóstico de lluvia mensual 2010-2014 para la ciudad de Medellín. En mm/hr

AÑO	2011	2012	2013	2014
Enero	0.25251	0.39690	0.59435	0.79067
Febrero	0.25427	0.37674	0.57487	0.77279
Marzo	0.25754	0.40178	0.60311	0.80149
Abril	0.36966	0.53680	0.72966	0.93379
Mayo	0.33654	0.52430	0.70973	0.91913
Junio	0.37616	0.57850	0.75924	0.97268
Julio	0.37936	0.58387	0.76553	0.98047
Agosto	0.29934	0.46760	0.66759	0.87614
Septiembre	0.45702	0.68275	0.85862	1.08
Octubre	0.31686	0.48225	0.68737	0.89740
Noviembre	0.36384	0.56383	0.75517	0.97336

Diciembre	0.38747	0.58501	0.77938	0.99810
-----------	---------	---------	---------	---------

Fuente: propia, 2011.

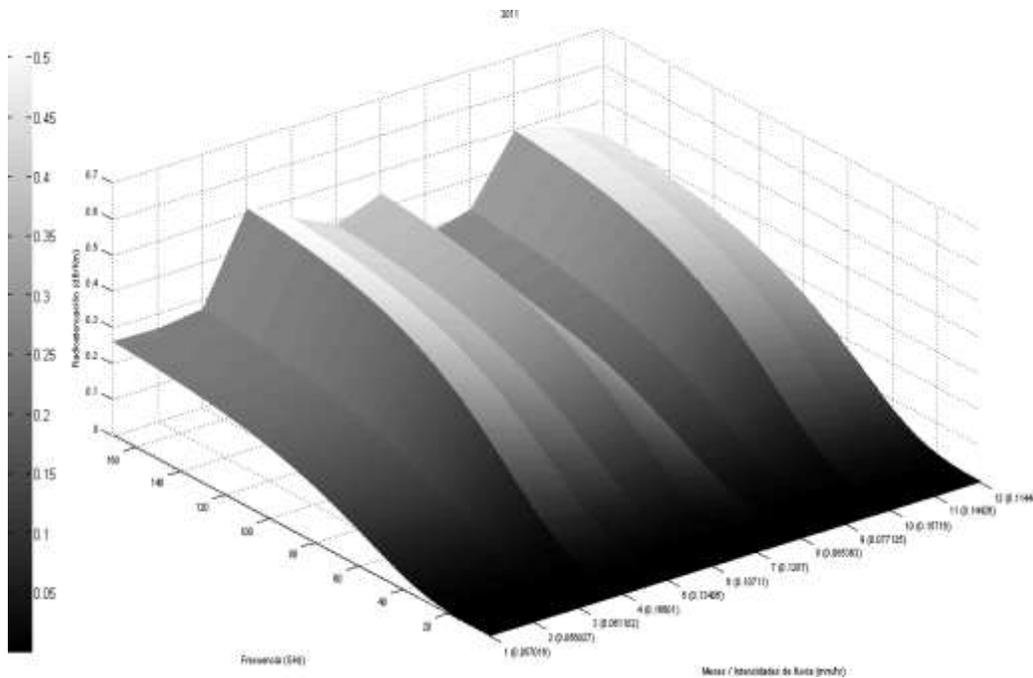
La tabla 6 refleja la mayor intensidad de lluvia durante los meses de abril, octubre y diciembre de los años pronosticados. Y en la tabla 7 refleja la mayor intensidad de lluvias en septiembre.

### DETERMINACIÓN DE LA RADIO ATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

Esta última fase de la investigación, consistió en realizar los pronósticos de radio atenuación por lluvia de los años 2011 hasta el 2014 teniendo los años pronosticados de lluvias en las ciudades de Bogotá y Medellín. Dicho pronóstico fue posible mediante la aplicación de cómputo MATLAB utilizando la recomendación de la ITU-R P.838-3, el cual arroja como resultados las gráficas para el parámetro de atenuación en función de la frecuencia y de la cantidad de lluvia en la zona.

Dado a que siempre se visualizó una tendencia positiva en todos los gráficos de los distintos años, solo se muestran 2 gráficos de superficie con la radio atenuación troposférica por lluvia mensual estimada para los años 2011 y 2014 para la ciudad de Bogotá y Medellín respectivamente.

A continuación se muestran las figuras con al radio atenuación troposférica por lluvia mensual estimada para los años 2011 hasta 2014 para las ciudades de Bogotá y Medellín.



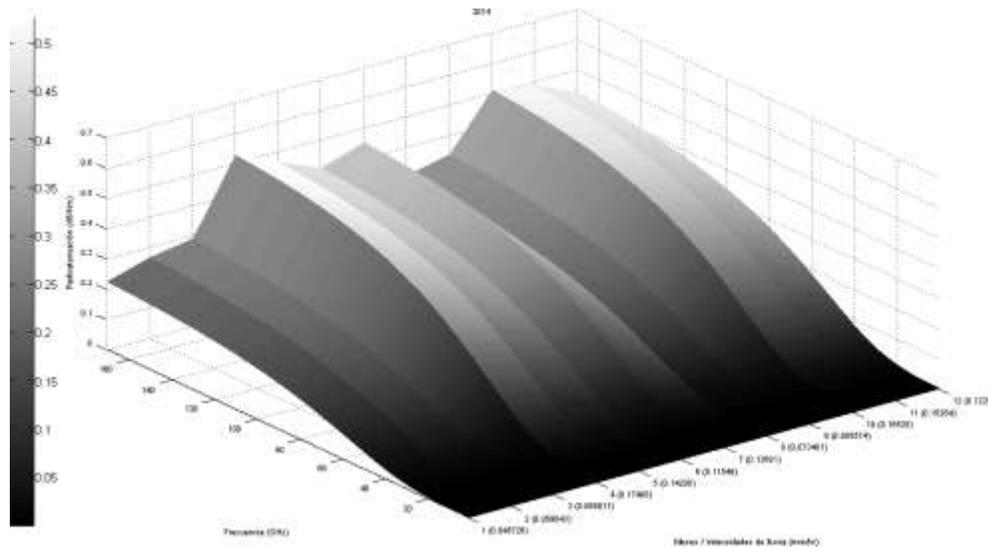


Figura 13. Radio atenuación troposférica para el año 2011 y 2014 respectivamente para la ciudad de Bogotá. (Fuente: Propia)

Como se observa en la figura 13, la máxima radio atenuación registrada para el año 2011 será de 0,48 dB/Km correspondiente al mes de octubre, con una intensidad igual a 0,1682 mm/hr en la frecuencia de los 170 GHz. La otra radio atenuación significativa pertenece al mes de abril con una intensidad de lluvia igual a 0,45 mm/hr.

Igualmente para En el año 2014, se visualiza que para el mes de octubre en el orden de 170 GHz y con una intensidad de lluvia igual a 0,4171 mm/hr, se obtuvo una radio atenuación de 0,66 dB/Km. Le siguen las radio atenuaciones pertenecientes a los meses de abril y diciembre con 0,62 dB/Km y 0,64 dB/Km respectivamente con intensidades de lluvia iguales a 0,3732 mm/hr y 0,3763 mm/hr.

Finalmente, para el cálculo de radio atenuación en la ciudad de Medellín se utilizaron de nuevo las mismas frecuencias comenzando desde 1 GHz hasta los 170 GHz. Asimismo, para los resultados obtenidos se utilizó un ángulo de elevación fijo del trayecto de onda igual a  $90^\circ$  y con una polarización circular de la señal. A continuación, se muestran 2 gráficos de superficie con la radio atenuación troposférica por lluvia mensual estimada para los años 2011 y 2010.

Como se observa en el grafico 9, la máxima radio atenuación registrada para el año 2011 fue de 0,75 dB/Km correspondiente al mes de octubre, con una intensidad igual a 0,4570 mm/hr en la frecuencia de los 170 GHz. La otra radio atenuación significativa pertenece al mes de abril con una intensidad de lluvia igual a 0,70 mm/hr.

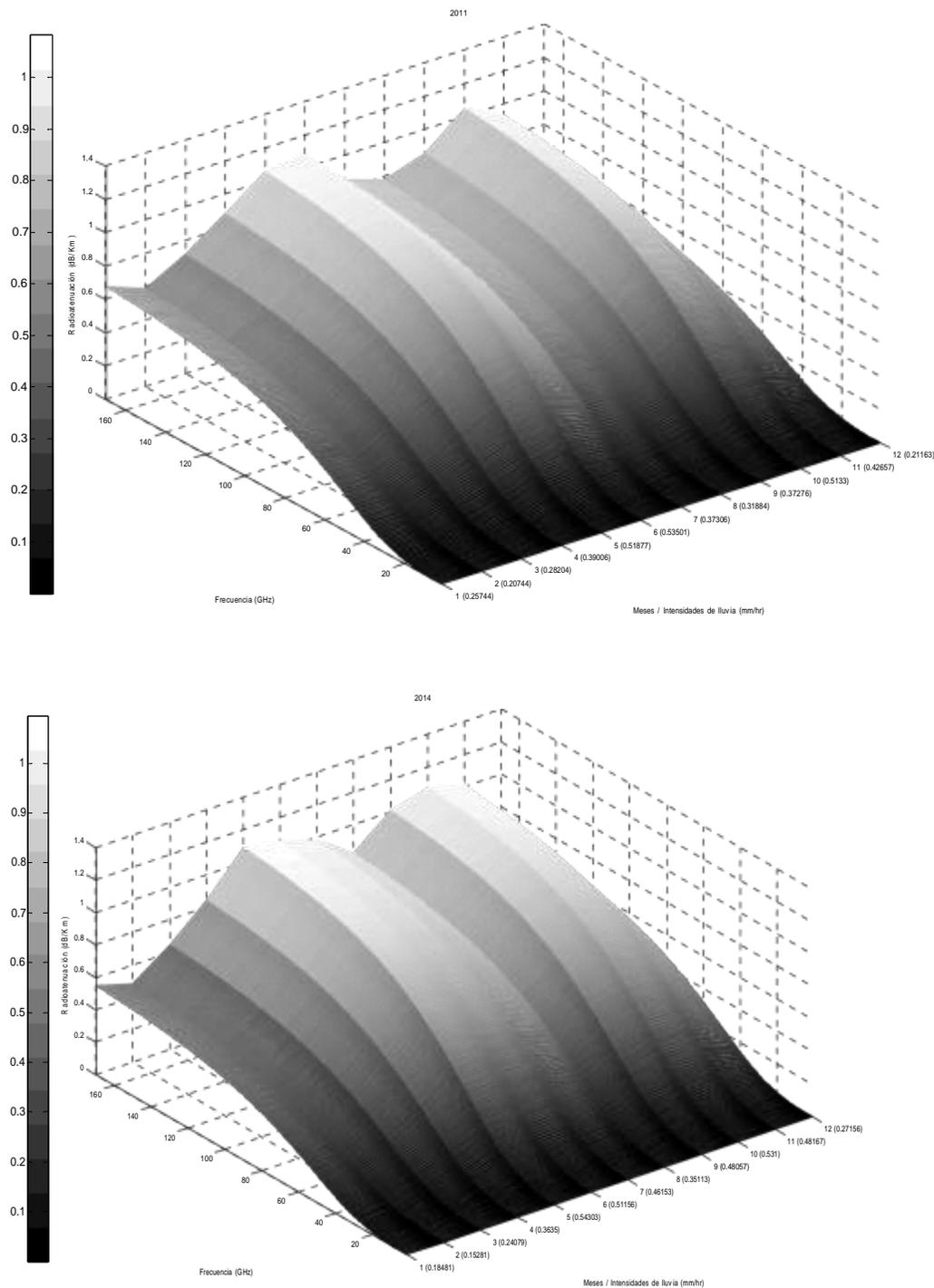


Figura 14. Radio atenuación troposférica para el año 2011 y 2014 respectivamente para la ciudad de Medellín. Fuente: propia, 2011.

En la figura 14, se observa que la máxima radio atenuación registrada para el año 2011 fue de 1,062 dB/Km correspondiente al mes de mayo, con una intensidad igual a 0,5133 mm/hr en la frecuencia de los 170 GHz. Para el año 2014 pertenece al mes de mayo con una intensidad de lluvia

igual a 0,5430 mm/hr. Y una radio atenuación de 1,093 dB/Km

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Luego del desarrollo del procedimiento de la investigación se realizó un análisis y discusión de los resultados, los cuales a partir de estudios previos demuestran el efecto de la incidencia de los diversos fenómenos atmosféricos, los cuales pueden alterar el comportamiento estable de los enlaces de telecomunicaciones basadas en ondas electromagnéticas, debiéndose principalmente a la disipación de energía en forma de calor causada por los gases o por las precipitaciones en forma de lluvia, nieve o granizo, aunado a esto el aumento progresivo de la precipitación de lluvia para la ciudad de Bogotá y Medellín.

Por otro lado, al implementar el método ARIMA para ambas ciudades en estudio, por ser un método implementado para el análisis de las series temporales de tiempo. Los modelos que se obtuvieron según el pronóstico cercano a la serie de datos reales fueron, para Bogotá (0,1,1) y para Medellín (1,1,0), dando como resultado coeficientes óptimos para lograr la realización del estudio.

Es muy importante considerar la frecuencia en la que trabajan estos enlaces, ya que a mayores frecuencias se presenta una radio atenuación significativa igual a 2,94 dB/Km, para este estudio se utilizaron las frecuencias desde 1 a 170 GHz. La máxima radio atenuación registrada en la frecuencia de 170 GHz de la ciudad de Bogotá fue siempre en el mes de octubre y en el caso de la ciudad de Medellín fue en el mes de mayo, mientras que las radio atenuaciones menores pertenecen a los meses de enero para la ciudad de Bogotá y para la ciudad de Medellín octubre; también se pudo comprobar que, la radio atenuación varía significativamente al amplificar la frecuencia.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método de ARIMA permitió identificar el modelo más adecuado, para representar los valores de lluvia futura desde el año 2010 al 2014 de la ciudad de Bogotá y Medellín de la República de Colombia, mediante el uso de del software SPSS para Windows, a través, de el se determinó el comportamiento de cada una de las series de datos de lluvia mensual, identificando su periodo estacionalidad y su tendencia variable o aleatoria.

Se demostró que en el modelo Arima, el parámetro (1,0,0) (0,1,1) con la constante es el mejor modelo para la ciudad de Bogotá al observar sus coeficientes óptimos, donde los retardos son significativos ,es decir, menores a 0.05 y que el modelo (1,1,0) (1,1,0) sin constante, es el mejor modelo para la ciudad de Medellín, donde los retardos son significativos, es decir menores a 0.05.

La implementación de gráficos de secuencia, permitió determinar que el comportamiento anual de la lluvia pronosticada, la cual es similar al comportamiento de la lluvia real, garantizando la validez del pronóstico, La determinación de la intensidad de lluvia por hora a partir de los días del mes, fue necesaria para el cálculo de radio atenuación. Los valores más altos de radio atenuación se registraron, siendo 0,66 dB/Km para la ciudad de Bogotá y para la ciudad de Medellín 1,25 dB/Km correspondiente al mes de octubre para ambas ciudades.

Por último, para el cálculo de la radio atenuación troposférica según la recomendación de la ITU, se obtuvieron mejores resultados, ya que, estos involucran otros parámetros técnicos señalados en los puntos anteriores. Se recomienda a las empresas prestadoras de servicios de telecomunicaciones que implementan e instalan radioenlaces, anexar a sus estudios de factibilidad los problemas de pérdidas producidas por hidrometeoros, específicamente la lluvia,

que atenta en los sistemas para lograr disminuir los riesgos de posibles fallas que se puedan presentar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOX, C.E.P.; JENKINS, G.M. (1976). Time series analysis, forecasting and control. Holden Day Inc. USA.

Cardama, A. Cofre, L., Ríus, J. Romeu, J. Blanch S. y Ferrando, M. (2004). Antenas. México: Alfaomega.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (1998). Metodología de la Investigación. México: McGraw-Hill.

ITU (2005). Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Recommendation ITU-R P.838-3.

López, B. (1999). Metodología de Investigación y Elaboración de Reportes. México: Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo.

Muñoz, A., Pacheco, R., Cubillán, N., Durante, C., Durán L., Fermín, J. (2006). Modelling tropospheric radio-attenuation parameters for tropical countries. The Venezuela case. *Ciencia*, 14(4), 428-434.

Neri, R. (2003). Comunicación Satélital. México: Thomson.

Pérez, C. (2005). Métodos Estadísticos Avanzados con SPSS. España: Thomson.  
Rísquez, G., Fuenmayor, E. y Pereira, B. (1999). Metodología de la Investigación. Maracaibo: Proeduca.

Tomasi, W (2003), Sistemas De Comunicaciones, Editorial Prentice Hall. México

Vargas, H. (2006). *Modelo gráfico para el cálculo de parámetros de radio atenuación Troposférica*. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.