



## RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA POR LLUVIA PARA CIUDAD BOLÍVAR Y PUERTO AYACUCHO

(Tropospheric radio attenuation by rain for Ciudad Bolivar and Puerto  
Ayacucho)

### Romer A. Saggiomo G

Ingeniero en Informática

Universidad Rafael Belloso Chacín. Maracaibo – Venezuela

[rsaggiomo@hotmail.com](mailto:rsaggiomo@hotmail.com)

### Carlos Durante

Doctor en Física

Universidad del Zulia. Maracaibo – Venezuela.

Correo electrónico: [cdurante@luz.edu.ve](mailto:cdurante@luz.edu.ve)

### RESUMEN

El propósito fundamental de esta investigación es determinar la radioatenuación troposférica por lluvia que sufren los radioenlaces en Ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho. Basados en los datos de lluvia anuales de años anteriores, mediante la aplicación del método de pronóstico de Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión (ARIMA), fue posible determinar la radioatenuación en función de la frecuencia y la intensidad de lluvia registrada mensualmente para los años 2009 al 2011 con índices de error confiables. Este desarrollo está relacionado directamente a los problemas que producen las precipitaciones en forma de lluvia en los enlaces de radiofrecuencias, donde se observa la pérdida en la potencia de la señal electromagnética a causa de la disipación de energía en forma de calor por las gotas de lluvia. El estudio está compuesto por 4 fases de desarrollo, basado en la recopilación de los datos de estaciones meteorológicas de la zona, los cuales fueron suministrados por el Centro Internacional de Investigación del Fenómeno del Niño, seguido por la aplicación y análisis del método de pronóstico ARIMA y la estimación de la intensidad de lluvia por hora pronosticada y por último se presentan los resultados de las radioatenuaciones para cada período mensual. El tipo de investigación es de campo y predictiva con diseño no experimental. Se concluyó que Puerto Ayacucho es la ciudad que presenta mayor radioatenuación troposférica debido a la alta intensidad de lluvia.

**Palabras claves:** pronóstico, lluvia, radioatenuación, troposfera, ARIMA.

### ABSTRACT

The fundamental intention of this investigation is to determine the tropospheric radio attenuation by rain that occurs in radio links in Ciudad Bolivar and Puerto Ayacucho. Based on the annual rain data of previous years, by means of the application of the method of prognosis Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), it was possible to determine the radio attenuation by month as function of the frequency



and the intensity of registered rain for years 2009 to 2011 with reliable error indices. This development is directly related to the problems that rain precipitations produce in radio frequencies links, where is observed the loss in the power of the electromagnetic signal because of the dissipation of energy in heat form by the drops of rain. The study is made up of 4 phases of development, based on the compilation of the data of weather stations of the zone, which was provided by the International Center on Research El Niño, followed by the application and analysis of the method of prognosis ARIMA and the estimation of the intensity of rain per foretold hour and finally the results of the radio attenuation for every monthly period appear. The investigation is field and predictive-type and with not experimental design. One concluded that the Cold one is the locality that presents/displays Greater radio attenuation occurs in Puerto Ayacucho.

**Keywords:** forecast, rain, radio attenuation, troposphere, ARIMA.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de comunicarse a distancia surgi  con el desarrollo de la civilización y las lenguas, desde tiempos muy remotos. Desde la antigüedad existieron sistemas de comunicaciones a distancia tales como el uso de fuego o humo entre otros.

Desde que en diciembre de 1901 Marconi estableciera la primera comunicación transoceánica entre Gran Bretaña y Terranova en Canadá, la evolución y transformación de las necesidades de comunicación, así como la de las tecnologías de telecomunicaciones, han originado un gran número de desarrollos en el campo de las comunicaciones inalámbricas (televisión, radio, telefonía, etc.), que permiten comunicaciones a grandes distancias con un alto grado de confiabilidad.

A pesar que las comunicaciones por satélite son una de las tecnologías más confiables, en algunos casos, pueden ser interrumpidas por causa de factores naturales, los cuales pueden ocasionar un debilitamiento de la señal a medida que pasa por el enlace. La presencia de lluvia en el trayecto de la transmisión en la principal fuente de degradación de la señal. Las gotas de lluvias adsorben y dispersan la energía de la onda, resultando una reducción de la amplitud de la señal transmitida (atenuación), la cual degrada la confiabilidad y el desempeño del enlace de comunicaciones.

La investigación fue desarrollada en cuatro fases, comenzando por la recopilación de series de lluvia en mm/mes de ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho, las cuales fueron tomados del Centro Internacional de Investigación del Fenómeno del Niño; seguida de la aplicación y análisis del Método de Pronóstico ARIMA, el posterior cálculo de la intensidad de lluvia en mm/hr y finalmente la determinación de la radioatenuación troposférica para cada una de las ciudades para los años 2009 al 2011, mediante el uso de un software desarrollado en MatLab.



## BASES TEÓRICAS

### PROPAGACIÓN DE RADIOFRECUENCIAS EN EL ESPACIO LIBRE

Todo sistema de telecomunicaciones debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal-ruido mínima que garantice su funcionamiento. Los servicios de radiocomunicaciones, radiodifusión, radiolocalización, teledetección y radioayudas a la navegación, soportan la transmisión de la información mediante el empleo de ondas electromagnéticas (Cardama, Cofre, Roca, Rius, Romeo, Blanch, 2004, pag. 39). Para poder planificar correctamente cualquiera de estos sistemas es imprescindible conocer los factores que puedan alterar la propagación electromagnética, su magnitud y su influencia en las diferentes bandas de frecuencias.

La relación entre la potencia recibida y la transmitida (pérdida de transmisión) por dos antenas separadas por una distancia  $r$  en condiciones del espacio libre es:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{1}{4\pi r^2} D_T A_{efR} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 D_T D_R = \left( \frac{1}{\lambda r} \right)^2 A_{efT} A_{efR} \quad (1)$$

Donde:

$P_R$ : Potencia Receptora

$P_T$ : Potencia Transmitida

$D_R$ : Directividad Receptora

$D_T$ : Directividad Transmitida

$A_{efR}$ : Área Efectiva Receptora

$A_{efT}$ : Área Efectiva Transmitida

$\lambda$ : Longitud de Onda

$r$ : Distancia entre Base Emisora y Receptora

La propagación en el espacio libre y la propagación en el vacío responden a un modelo ideal análogo, pero en el entorno terrestre muy pocas situaciones se ajustan a este modelo ya que la misma presencia de la tierra, de la atmósfera y de la ionosfera alteran las condiciones de propagación.

Debido a la concentración de gases en la atmósfera se originan diferencias entre la propagación de las señales en el vacío y en la atmósfera. La capa más baja de la atmósfera denominada troposfera, se extiende desde el nivel del mar hasta aproximadamente unos 18 Km de altura en el ecuador, ocurriendo en ésta la mayor



concentración de gases. Bajo condiciones atmosféricas normales la concentración de gases disminuye con la altura, lo que origina una variación del índice de refracción de la atmósfera en función de la altura, constituyendo la atmósfera un medio de propagación no homogéneo y provocando una curvatura de las trayectorias de propagación.

Es significativo destacar que la presencia de gases en la atmósfera origina atenuación importante debido a las moléculas de oxigeno y al vapor de agua, que son los gases de mayor presencia en la atmósfera. Adicionalmente los factores meteorológicos como la lluvia pueden ocasionar atenuaciones dependiendo de la frecuencia de trabajo y la intensidad de las precipitaciones.

### EFFECTO DE LA TROPOSFERA Y LA RADIOATENUACIÓN

Las principales causas de la atenuación atmosférica son la absorción molecular de los gases contenidos en la atmósfera y la atenuación producida por hidrometeoros.

La primera es debida principalmente a las moléculas de oxigeno y vapor de agua, la cual es prácticamente despreciable para frecuencias inferiores a los 10 GHz, mientras que a frecuencias superiores muestra un comportamiento creciente con la frecuencia. A 22,3 GHz y 60 GHz se presentan los primeros indicios de atenuación debido al vapor de agua y oxígeno.

Dentro de la atenuación por hidrometeoros, la más importante es la producida por la lluvia, ya que la niebla, la nieve y el granizo producen atenuaciones menores en las bandas SHF e inferiores. La atenuación por lluvia depende de varios factores tales como: la intensidad, el tipo de lluvia y el tamaño y la velocidad de las gotas de agua.

Para calcular la atenuación total producida por la lluvia, se multiplica la atenuación específica por la longitud de la celda de lluvia. Por lo que para la planificación de un servicio es necesario sobredimensionarlo, considerando la probabilidad de que ocurra cierta intensidad de lluvia y que la atenuación adicional asociada a la intensidad no afecte el servicio.

Según la recomendación ITU-R P.838-3, la atenuación específica de la lluvia  $\gamma_R$  (dB/Km), es obtenida de la intensidad de lluvia  $R$  (mm/h) mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma_R = kR^\alpha \text{ (dB / Km)} \quad (2)$$

Donde los valores de los coeficientes  $k$  y  $\alpha$  son determinados como funciones de frecuencia en el rango de 1 a 1.000 GHz, de las ecuaciones 3 y 4.

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (3)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (4)$$

Para el cálculo de los coeficientes según su polarización,  $k_H$ ,  $k_V$  y  $\alpha_H$ ,  $\alpha_V$ ; por medio de las ecuaciones 3 y 4, es necesario usar los valores correspondientes de los cuadros 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Cuadro 1. Coeficientes para  $k_H$

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-5,3398	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,2697	0,454		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Cuadro 2. Coeficientes para  $k_V$

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Cuadro 3. Coeficientes para  $\alpha_H$

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,3761	-0,9623	1,47828		
5	16,1721	-3,2998	3,4399		

Cuadro 4. Coeficientes para  $\alpha_v$

j	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,07771	2,3384	-0,76284	-	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039	0,053739	
3	-0,20238	1,1452	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Para el cálculo de los coeficientes  $k$  y  $\alpha$  con las componentes horizontales  $k_H$ ,  $\alpha_H$  y verticales  $k_V$ ,  $\alpha_V$  obtenidas, se sustituyen los valores utilizando las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{k_H + k_V + \cos^2 \theta \cos 2\tau}{2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_H + \alpha_V + \cos^2 \theta \cos 2\tau}{2k} \quad (6)$$

Donde:

$\theta$  = ángulo de elevación del trayecto de la onda en grados

$\tau$  = ángulo de la inclinación de la polarización en grados

Una vez obtenidos los coeficientes  $k$  y  $\alpha$ , es posible calcular el valor de la radioatenuación por efecto de la lluvia en dB/Km mediante la ecuación 2 para un determinado valor de intensidad de lluvia  $R$ .

Entretanto, como las gotas de lluvia no son esféricas debido al efecto de rozamiento del aire, estas tienden a achatarse formando esferoides con el eje vertical menor que el horizontal lo que significa que para la polarización vertical la atenuación es ligeramente menor que para la polarización horizontal, tal como se muestra en el cuadro 5.

Cuadro 5. Coeficientes dependientes de la frecuencia para estimar la atenuación específica por lluvia.

Frecuencia (GHz)	$k_H$	$\alpha_H$	$k_V$	$\alpha_V$
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
25	0,1571	0,9991	0,1533	0,9491
50	0,6600	0,8084	0,6472	0,7871
100	1,3671	0,6815	1,3680	0,6765
200	1,6378	0,6382	1,6443	0,6343
500	1,5418	0,6253	1,5366	0,6272
1000	1,3795	0,6396	1,3822	0,6365

### SERIES TEMPORALES

Una serie temporal es un conjunto de valores observados, medidos durante períodos sucesivos. Está formada por cuatro componentes teóricas: tendencia, variaciones estacionales, variaciones cíclicas y variaciones residuales.

La primera está dada por el movimiento general a largo plazo de la serie. Las variaciones estacionales son oscilaciones que se producen con un periodo igual o inferior a un año y se reproducen de forma reconocible en los diferentes años. Las variaciones cíclicas son oscilaciones que se producen con un periodo superior a un año, debidas principalmente a la alternancia de etapas largas (ciclos), en las que se repite el comportamiento de las series. Las variaciones residuales son movimientos en la serie que no muestran un carácter periódico reconocible y que son originados por fenómenos singulares que afectan la variable en estudio de manera casual y no permanente.

### MÉTODOS DE PRONÓSTICO CUANTITATIVOS

El pronóstico es un proceso de estimación de un acontecimiento proyectando hacia el futuro datos del pasado. Éstos, se combinan sistemáticamente en forma predeterminada para hacer una estimación del futuro.

Los métodos de pronósticos cuantitativos son modelos matemáticos que se basan en datos históricos, bajo el supuesto de que son relevantes para el futuro. Estos modelos se pueden utilizar con series de tiempo.

Puede hablarse de dos clases de pronósticos: condicionales e incondicionales.





El primero se realiza mediante modelos causales, como es el caso de un modelo que relaciona dos variables, una dependiente, Y, y otra independiente, X, las predicciones de Y están condicionadas a X, es decir se predice Y dada X; el segundo es el que se hace mediante métodos autoproyectivos, que a su vez están basados en dos enfoques alternativos: el determinista o clásico, y el estocástico o moderno, el cual está basado en la metodología de Box y Jenkins.

El enfoque estocástico es más adecuado cuando las series de tiempo son de mayor tamaño (Pérez, 2005, pág 256), razón por la cual se ha seleccionado para el desarrollo de esta investigación.

### **PROMEDIO MÓVIL INTEGRADO DE AUTO REGRESIÓN (ARIMA)**

El modelo ARIMA fue desarrollado por Box y Jenkins, dicho modelo tiene en cuenta la dependencia existente entre los datos, en el cual cada observación en un momento dado es modelada en función de los valores anteriores.

El nombre ARIMA es derivado de sus tres componentes: Autoregresivo (AR), Integrado (I) y de Medias Móviles (MA). El modelo permite describir un valor como una función lineal de datos anteriores y errores debidos al azar, adicionalmente puede incluir un componente cíclico o estacional, con el objetivo de obtener un modelo adecuado que contenga todos los componentes necesarios para describir el fenómeno.

### **MODELO AUTOREGRESIVO AR(p)**

Un modelo autoregresivo AR(p) describe una clase particular de proceso en el que las observaciones en un momento determinado son predecibles a partir de las observaciones previas del proceso más un término de error.

El proceso autorregresivo de orden p, toma la forma:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (7)$$

Donde  $Y_t$  es la variable dependiente y  $Y_{t-1}, Y_{t-2} \dots Y_{t-p}$  son las variables independientes. En este caso, estas variables independientes son valores de la misma variable (de aquí el nombre de auto), es decir, observaciones de períodos anteriores. Por último,  $e_t$  es el error, o término residual que representa las perturbaciones aleatorias que no pueden ser explicadas por el modelo.



### MODELO DE MEDIAS MÓVILES MA(q)

Un modelo de este tipo también describe una serie temporal estacionaria, en él el valor actual puede predecirse a partir de la componente aleatoria de este momento y en menor medida de los impulsos aleatorios anteriores.

El proceso de medias móviles de orden q, se representa de la siguiente forma:

$$Y_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (8)$$

En donde, como en el modelo anterior,  $e_t$  es el error o residuo y  $e_{t-1}, e_{t-2}, \dots, e_{t-q}$ , son los valores anteriores del error.

### MODELOS ARMA (p,q)

Estos modelos incluyen términos autorregresivos, como el de medias móviles, también se denominan ARIMA (p,0,q) y se representan por la ecuación que nace de la combinación de las ecuaciones 7 y 8, en la cual se muestra los valores futuros a partir de las observaciones pasadas y de los errores pasados entre los valores reales y pronosticados, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (9)$$

Para modelos con datos estacionales, las ecuaciones 7, 8 y 9 podrían no ser suficientes y deben completarse con parámetros estacionales. Los modelos estacionales pueden ser: AR, MA y ARMA. Un modelo AR estacional con datos mensuales sería:

$$Y_t = \phi_{12} Y_{t-12} + e_t \quad (10)$$

Para un modelo MA estacional mensual tendría la forma siguiente:

$$Y_t = e_t - \theta_{12} e_{t-12} \quad (11)$$

Y un modelo mixto ARMA estacional mensual presentaría la siguiente ecuación:

$$Y_t = \phi_{12} Y_{t-12} + e_t - \theta_{12} e_{t-12} \quad (12)$$



### **MODELO ARIMA (p,d,q)**

Un modelo ARIMA (p,d,q) permite describir una serie de observaciones después de que hayan sido diferenciadas d veces, con el objeto de extraer las posibles fuentes de no estacionariedad. Es aplicable a cualquier modelo y si alguna de las componentes p,d,q es igual a cero, se elimina el termino correspondiente de la formula general.

Para determinar los tres parámetros del método ARIMA, ya sean los simples (p,d,q) y/o los estacionales (P,D,Q), se procede con el análisis de los datos para identificar los patrones de tendencia, ciclicidad y estacionalidad. Generalmente, utilizando la diferenciación simple o estacional de la serie de datos original, se obtiene la estacionalidad. Luego, los análisis de autocorrelación simple y parcial se efectúan para poder identificar el orden de cada parámetro del método ARIMA. Estos parámetros son elegidos según los resultados de la representación en los retardos de las gráficas de autocorrelación simple y parcial.

### **PROCEDIMIENTO**

A continuación se resumen las cuatro fases llevadas a cabo durante en desarrollo de esta investigación para el cálculo de la radioatenuación troposférica por lluvia para localidades Ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho.

### **RECOPIACIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA**

Para el desarrollo de esta fase fue necesario realizar visitas a varias instituciones ambientales además de algunas páginas Web como el centro Internacional de investigación del fenómeno del Niño, que ofrecen información meteorológica, con el fin de realizar una revisión de los datos meteorológicos disponibles de Ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho.

### **APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE PRONÓSTICO**

El desarrollo de esta fase lo constituyó el análisis de las series de tiempo, mediante el uso de diagramas espectrales para la determinación de la estacionalidad y período de la serie, seguido de la realización de autocorrelaciones simples y parciales con ensayos de diferentes diferenciaciones, finalmente se identifican los modelos ARIMA con los coeficientes óptimos para la realización de los pronósticos de lluvia.

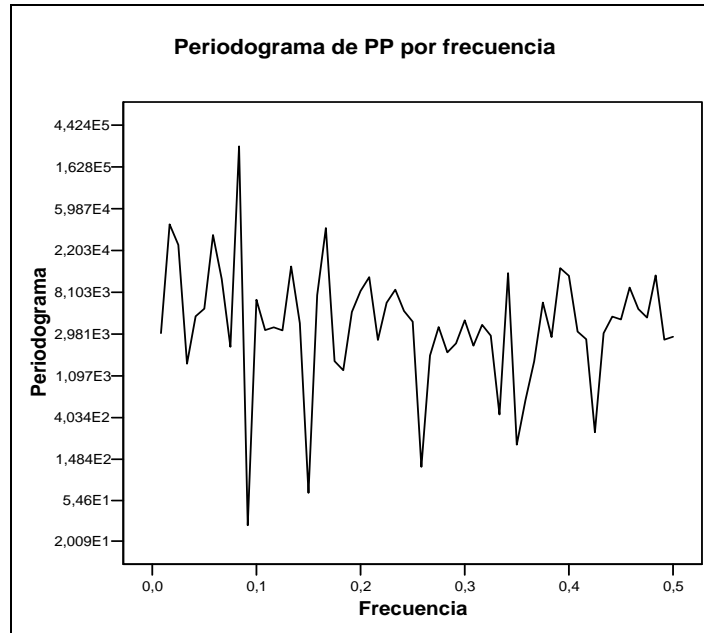


Figura 1. Diagrama espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real de ciudad Bolívar. Fuente: SPSS, Saggiomo (2009)

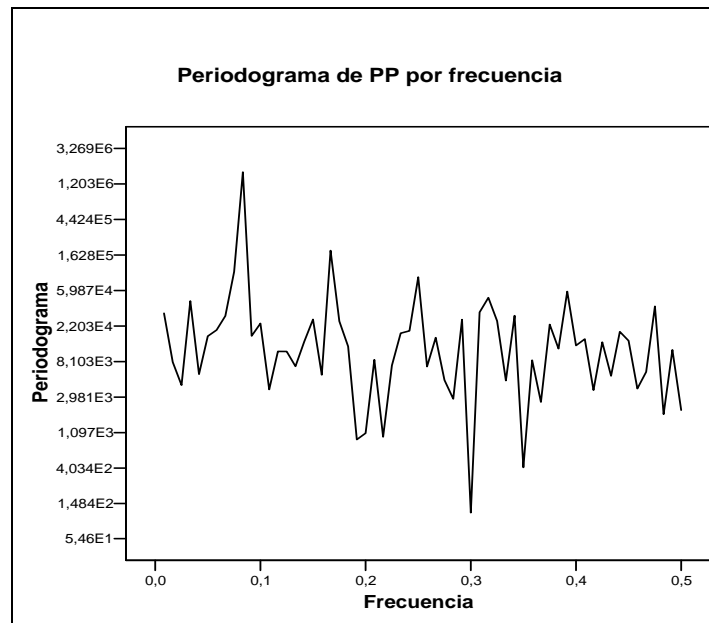


Figura 2. Diagrama espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real de Puerto Ayacucho. Fuente: SPSS, Saggiomo (2009)



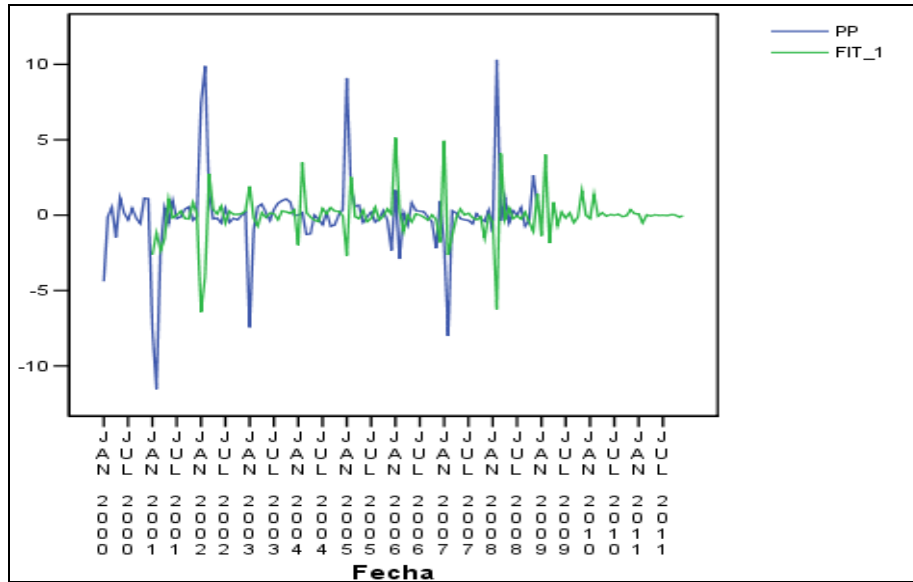


Figura 4. Valores de lluvia real y pronosticada de puerto Ayacucho.

Fuente: SPSS, Saggiomo (2009)

### ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA POR HORA

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

Cuadro 5. Intensidad de lluvia. Ciudad Bolívar

AÑO	ENE (mm/h)	FEB(mm/h)	MAR(mm/h)	ABR(mm/h)	MAY(mm/h)	JUN(mm/h)	JUL(mm/h)	AGO(mm/h)	SEP(mm/h)	OCT(mm/h)	NOV(mm/h)	DIC (mm/h)
2009	0,05254	0,00033	0,00017	0,00001	0,10177	0,18433	0,17102	0,13697	0,11327	0,07886	0,03565	0,01365
2010	0,04499	0,00032	0,00017	0,00001	0,10173	0,18432	0,17101	0,13697	0,11327	0,07886	0,03565	0,01365
2011	0,04499	0,00032	0,00017	0,00001	0,10173	0,18432	0,017101	0,13697	0,11327	0,07886	0,03565	0,01365

Fuente: SPSS, Saggiomo (2008)

El cuadro 5 refleja la mayor intensidad de lluvia durante el mes de Junio, de los años pronosticados.

Cuadro 6. Intensidad de lluvia. Puerto Ayacucho

AÑO	ENE (mm/h)	FEB(mm/h)	MAR(mm/h)	ABR(mm/h)	MAY(mm/h)	JUN(mm/h)	JUL(mm/h)	AGO(mm/h)	SEP(mm/h)	OCT(mm/h)	NOV(mm/h)	DIC (mm/h)
2009	0,00569	0,00104	0,06112	0,16981	0,29196	0,43797	0,47843	0,33103	0,13597	0,16547	0,09538	0,08958
2010	0,00454	0,00416	0,05781	0,19915	0,27292	0,45609	0,47646	0,35477	0,12319	0,15815	0,13669	0,09874
2011	0,00494	0,00249	0,05900	0,18779	0,27979	0,44933	0,47719	0,34582	0,12776	0,16081	0,11972	0,09526

Fuente: SPSS, Saggiomo (2009)

Los valores más elevados de intensidad de lluvia en Puerto Ayacucho, corresponden al mes de Julio (ver cuadro 6).

### DETERMINACIÓN DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

Esta última fase de la investigación, consistió en realizar los pronósticos de radiotenuación por lluvia de los años 2009 hasta el 2011, de Ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho.

Dicho pronóstico fue posible mediante la aplicación de cómputo MATLAB utilizando la recomendación ITU-R P.838-3, la 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.

El rango de frecuencias utilizado para el cálculo comienza desde 1 GHz hasta los 170 GHz con incrementos de 1 GHz, cubriendo todas las designaciones desde Banda L hasta la Banda D, utilizando un ángulo de elevación del trayecto de onda igual a  $90^\circ$  y con una polarización circular de la señal.

Dado que las intensidades de lluvias calculadas en la fase anterior presentan valores similares y en algunos casos idénticos a través de los años, los resultados de radioatenuación troposférica también resultaron con similitudes.

Seguidamente se presentan las figuras con la radioatenuación troposférica por lluvia mensual estimada para Ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho, para el año 2011.

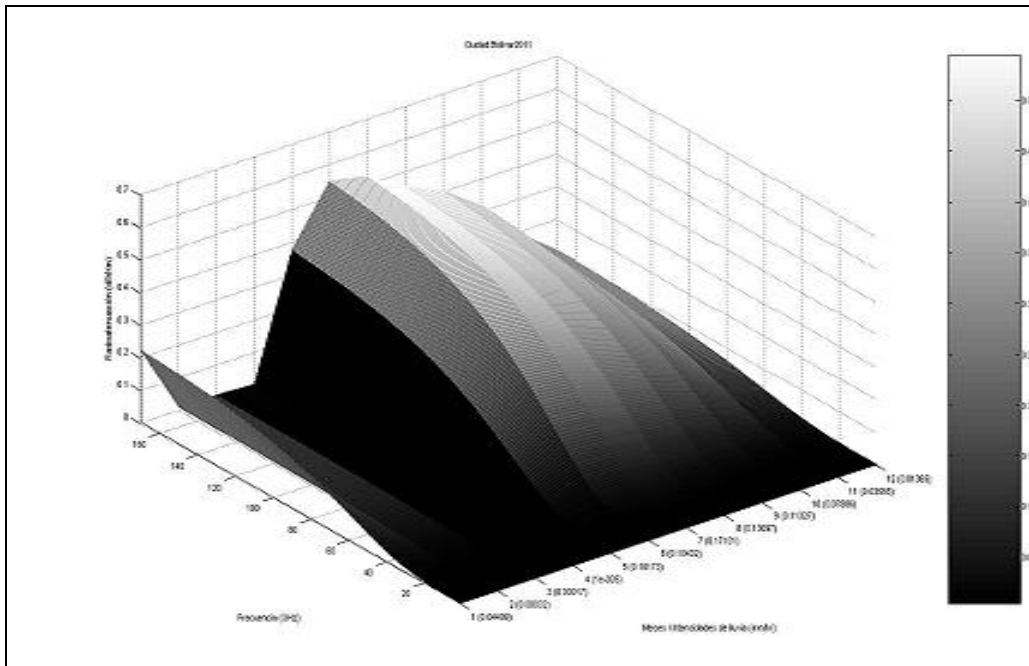


Figura 5. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2011. (Ciudad Bolívar)  
Fuente: MATLAB, Saggiomo (2009).

Para el año 2011, se visualiza en la figura 5 que en el mes de junio y en el orden de 170 GHz, con una intensidad de lluvia igual a 0,18432 mm/h, se obtuvo una radioatenuación de 0,55 dB/Km. Le siguen las radioatenuación pertenecientes a los meses de julio con 0,53 dB/Km e intensidad de lluvia igual a 0,17101 mm/h.

Siguiendo en el mismo orden de frecuencias de 170 GHz, las menores radioatenuaciones registradas fueron para el mes de febrero y enero siendo ambas iguales a 0,01 dB/Km con intensidades de lluvia de 0,0033 mm/h y 0,00017 mm/h respectivamente. En el anexo I, se detallan de los resultados correspondientes para el año 2011.

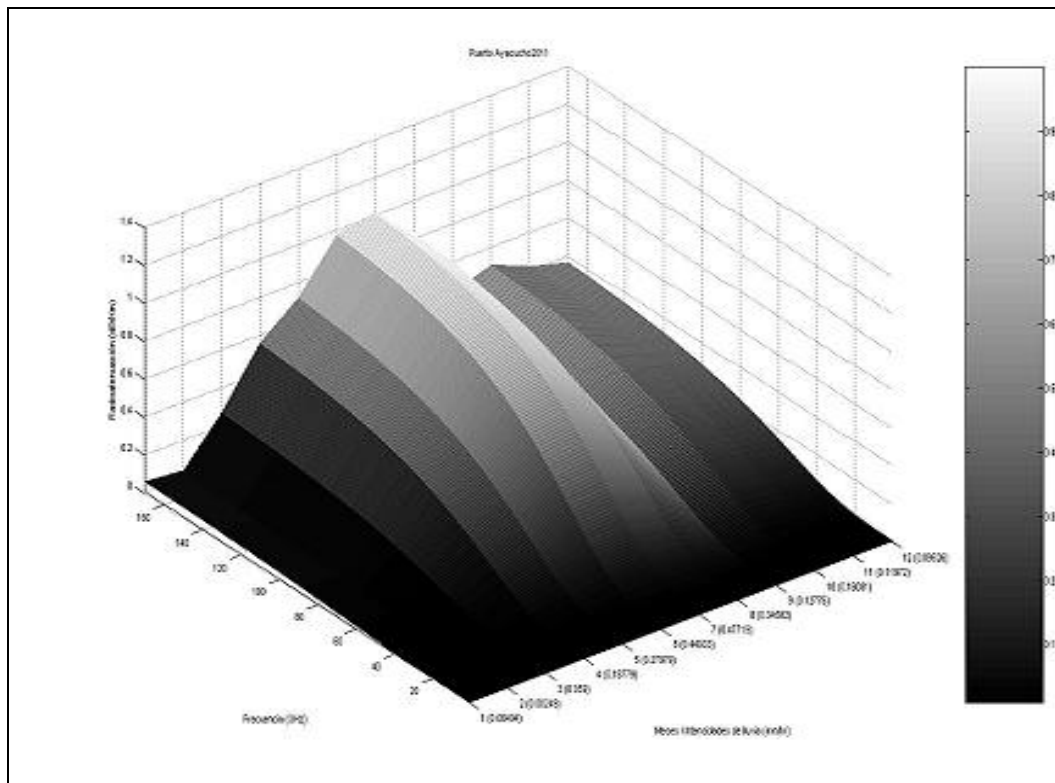


Figura 6. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2011. (Puerto Ayacucho). Fuente: MATLAB, Saggiomo (2009).

El año 2011 como se observa la figura 6, que la máxima intensidad de lluvia pronosticada el orden de los 170 GHz fue durante el mes de julio con una radioatenuación de 1,01 dB/Km y una intensidad de 0,47719 mm/h. A su vez, le siguen los meses de junio y agosto de 0,99 dB/Km y 1,00 dB/Km respectivamente con intensidades de lluvia iguales a 0,44933 mm/h y 0,34582 mm/h.

Las radioatenuaciones más leves en el orden de los 170 GHz corresponden a los meses de enero y febrero con una radioatenuación igual a 0,08 dB/Km y 0,07 dB/Km respectivamente con intensidades de lluvia iguales a 0,00494 mm/h y





0,00249 mm/h. En el anexo L, se detallan todos los valores de radioatenuación obtenidos para los meses correspondientes al año 2011.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

De los resultados obtenidos en esta investigación en cada una de las ciudades estudiadas, se afirma que la radioatenuación troposférica de los enlaces aumenta en función de la intensidad de lluvia y de la frecuencia.

Este hecho confirma lo expuesto en las bases teóricas del capítulo II y en los antecedentes referentes a otros estudios realizados los cuales expresan que los fenómenos atmosféricos como la lluvia originada en la troposfera ejercen gran influencia sobre la propagación de las señales debido principalmente a la disipación de energía en forma de calor.

El método de pronósticos ARIMA empleado para pronosticar la lluvia mensual para periodos posteriores basados en el comportamiento de la serie de lluvia real de periodos anteriores, permitió estimar la lluvia desde el año 2009 al 2011 de ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho, cuyos valores se corresponden con el comportamiento real de las mismas.

Para la el cálculo de la radioatenuación troposférica por lluvia, se utilizó una aplicación de computo desarrollada en MATLAB, basada en recomendación de la ITU-R P.838-3, la cual permite modificar los rangos de frecuencia y utiliza un ángulo de elevación del trayecto de onda igual a  $90^\circ$  con polarización circular de la señal. También considera otros parámetros adicionales, tales como el grado de inclinación del trayecto de la señal emitida así como la polarización utilizada, ya sea horizontal, vertical o circular.

En base al análisis e interpretación de los valores obtenidos en Ciudad Bolívar, se asevera que los pronósticos de radioatenuación de los años 2009 al 2011 no presentan variaciones significativas entre un año y otro. Las radioatenuaciones más elevadas corresponden siempre al mes de junio, resultando una radioatenuación igual a 0,55 dB/Km, seguida por el mes de julio con una radioatenuación de 0,53 dB/Km, e intensidad igual a 0,17101 mm/h.

Los valores resultantes del pronóstico de puerto Ayacucho para los años 2009 al 2011, presentan una máxima radioatenuación durante el mes de julio, con 1,01 dB/Km y diversas intensidades muy mínimas como 0,47843, 0,47646 y 0,47719 mm/h, observándose similitud entre cada uno de los años.

De estas dos ciudades es resaltante el hecho de que Puerto Ayacucho presenta los mayores valores de radioatenuación troposférica por lluvia, con un máximo correspondiente a 1,01 dB/Km e intensidad de lluvia máxima de 0,47843 mm/hr. Dicha observación se correlaciona con el hecho de que los valores de la serie de lluvia real de puerto Ayacucho son mayores que la de ciudad Bolívar.



En el mismo orden de ideas, ciudad Bolívar presenta la más leve radioatenuación troposférica por lluvia con 0,00033 y 0.00017 dB/Km, derivada de una intensidad de lluvia igual a 0,01 mm/h.

Los resultados obtenidos de esta investigación deben ser considerados por los proveedores de servicios de telecomunicaciones en las ciudades estudiadas, ya que les permitirá evitar inconvenientes relacionados con la pérdida de la señal en los enlaces.

Es importante mencionar que el pronóstico de radioatenuación troposférica realizado, maneja cierto margen de error, ya que el cálculo del intensidad de lluvia se hizo mediante el número de días por mes y número de horas por días y no por el método de estimación del promedio de días de lluvia y horas de lluvia, dando como resultado que de esta forma la intensidad de lluvia por hora calculada es mucho menor que la real, resultando en una radioatenuación de nivel inferior.

### CONCLUSIONES

La metodología empleada mediante el método de pronóstico ARIMA permitió identificar el modelo más adecuado, para representar los valores de lluvia futura desde el año 2009 al 2011 para Ciudad Bolívar y Puerto Ayacucho, mediante el uso de uso del software SPSS para Windows.

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, esta última debido a los efectos de otros factores independientes del fenómeno climatológico no relacionados directamente a la lluvia.

Mediante el uso de gráficos de secuencia se determinó que el comportamiento anual de la lluvia pronosticada 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 y horas por día, fue necesaria para el cálculo de radioatenuación, resultando que ciudad Bolívar presentó el valor más elevado con intensidad igual a 0,47843 mm/hr en el mes de julio.

Los valores más altos de radioatenuación se registraron en ciudad Bolívar, siendo 1,01 dB/Km la radioatenuación correspondiente al mes de julio.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Fuerza Aérea. (1984). Atlas Climatológico. (101). Venezuela. Ministerio de la Defensa.



- Arias, F. (1999) El proyecto de Investigación. Guía para su elaboración. Caracas. Episteme
- Guo, G., Li, S. (2000). Study on the Vertical Profile of Refractive Index in the Troposphere. *International Journal of Infrared and Millimeters Waves*, 21(7), 1103-1111.
- 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.
- Makridakis, S. y Wheelwright, S. (2004). Métodos de Pronósticos. México: Limusa.
- Méndez, C. (1995). Metodología. Colombia: McGraw-Hill.
- 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.
- Pérez, C. (2005). Métodos Estadísticos Avanzados con SPSS. España: Thomson.
- Risquez, G., Fuenmayor, E. y Pereira, B. (1999). Metodología de la Investigación. Maracaibo: Proeduca.
- Vargas, H. (2006). *Modelo gráfico para el cálculo de parámetros de radio atenuación troposférica*. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.
- Yeo, T., Kooi, P., Leong, M., Li, L. (2001). Tropical Raindrop Size Distribution for the Prediction of Rain Attenuation of Microwaves in the 10-40 GHz Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 49(1), 80-83.
- Zsarolyani, A. (2007). Pronóstico de Radioatenuación Troposférica por lluvia para la ciudad de Maracay. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.