



PRONÓSTICO DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA POR LLUVIA PARA LA CIUDAD DE MARACAY

(Forecasting of the Tropospheric Radio Attenuation by Rain for the City of Maracay)

Alan Zsarolyani

Universidad Rafael Belloso Chacín - Venezuela

Cesar Montoya

Universidad Rafael Belloso Chacín - Venezuela

Carlos Alberto Durante Rincon

Universidad del Zulia - Venezuela

Investigador invitado

RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene como finalidad determinar la radioatenuación troposférica por lluvia mensual para la ciudad de Maracay, utilizando los datos de lluvia para períodos anuales posteriores, derivados a partir de los métodos de pronóstico para series temporales. Asimismo, el propósito para su 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. En este sentido, se determina la intensidad de lluvia por hora pronosticada y se presentan los resultados de las radioatenuaciones para cada período mensual. Para este proyecto con modalidad de campo, se considera según su diseño de tipo predictiva y no experimental. Como conclusión, es posible estimar los datos de lluvia con índices de error confiables de este fenómeno climatológico para 5 años siguientes, utilizando el método de pronóstico de Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión (ARIMA); del mismo modo, se comprueba que el efecto de la lluvia en los enlaces de radiofrecuencias a partir de los 5 GHz se ve afectado significativamente según la intensidad de lluvia registrada, debiéndose principalmente a la disipación de la potencia de la señal por las gotas de lluvia.

Palabras clave: pronóstico, lluvia, radioatenuación, troposfera, ARIMA.

ABSTRACT

This investigation project has the purpose to determine the tropospheric radioattenuation of monthly rain in the city of Maracay, using the rain data for annual periods obtained from the forecasting methods for temporary series. As well, the intention for the development of this project is related directly to the problems that produce rain form precipitations in the links of radio frequencies, where it is observed



that the loss in the power of the electromagnetic signal is by the dissipation of energy in the form of heat by drops of rain. In this sense, the intensity of rain per hour is determined and the results of the radioattenuation for every monthly period appear. Using the field data, this study allows us by design to be a predictive and not experimental type. In conclusion, and according to the analyzed forecasting methods used in this investigation, it is possible to forecast for the following 5 years the rain data with a reliable index of error for this climatologic phenomenon; also, it is verified that the effect of rain in the connections of radio frequencies from the 5 GHz, is affected significantly according to the intensity of rain registered, being due mainly to the dissipation of the power of the signal by drops of rain.

Key words: forecast, rain, radioattenuation, troposphere, ARIMA.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos atmosféricos tales como las precipitaciones en forma de lluvia, pueden afectar el comportamiento de las señales electromagnéticas. Hoy en día se conocen otros efectos negativos como la refracción o difusión de las señales que alteran el trayecto de la misma consiguiendo el desvanecimiento de las comunicaciones en enlaces terrestres o satelitales. En cuanto a los enlaces troposféricos, la lluvia en intensidades por arriba de los 2 mm/hr, pueden atenuar significativamente las señales de microondas en el orden de los 5 GHz, trayendo problemas y pérdidas considerables en las ganancias debido a las desconexiones temporales.

En el mismo orden de ideas, las gotas de agua absorben la energía electromagnética que luego son transformadas en calor, de allí el término de radioatenuación por lluvia en dB/Km, ya que aten a la potencia de la señal a medida que esta se transmite dentro de la atmósfera terrestre.

Para la ciudad de Maracay, situado a unos 436 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas promedio de 18 grados centígrados hasta los 27 grados centígrados, tiene un panorama climatológico muy diverso. Al Norte se halla un medio semiárido o tropical muy seco, que corresponde a la estrecha franja litoral, mientras que en la depresión del lago de Valencia el clima se torna seco tropical, con alternación de un período de lluvias y otras de sequías.

Asimismo, en la actualidad no se disponen de los coeficientes de radioatenuación para esta región, donde generalmente los coeficientes son calculados a partir de otras ciudades que describen latitudes que no est n relacionadas entre sí, ameritando un estudio para la determinación de la radioatenuación troposférica por lluvia.

En esta investigación, el procedimiento llevado a cabo comienza con la evaluación y la validación de los datos históricos de datos de lluvia en mm/mes de 7 décadas proporcionados por la Fuerza Aérea Venezolana y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, siguiendo con la comprobación y los análisis de



los distintos métodos de pronóstico para series temporales y su posterior comparación para la determinación del mejor método que ofrezca resultados estimados que sean compatibles con la serie de datos real. Finalmente, se realizan los cálculos de radioatenuaciones para 5 años siguientes, comenzando desde el año 2006.

Igualmente, se detalla algunas de las principales bases teóricas que describen y explican en referencia a los fenómenos climatológicos y los efectos en las telecomunicaciones, siguiendo con una breve explicación del procedimiento llevado a cabo para obtener los resultados del pronóstico y la radioatenuación. Finalmente se discuten los resultados y se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

BASES TEÓRICAS

INTENSIDAD DE LLUVIA

La lluvia es una precipitación en forma de gotas de agua, este fenómeno se da a partir de la condensación en las nubes donde las gotas poseen diámetro superior a los 0,5 mm, estas bajan a la tierra por efecto de la gravedad a una velocidad superior a los 3 metros/seg. En cuanto a la intensidad de lluvia, es el volumen del mismo por unidad de tiempo, al medirse la cantidad de agua obtenida en un tiempo t se tiene la relación volumen/ t , es decir, la intensidad de lluvia para un tiempo t .

TROPOSFERA

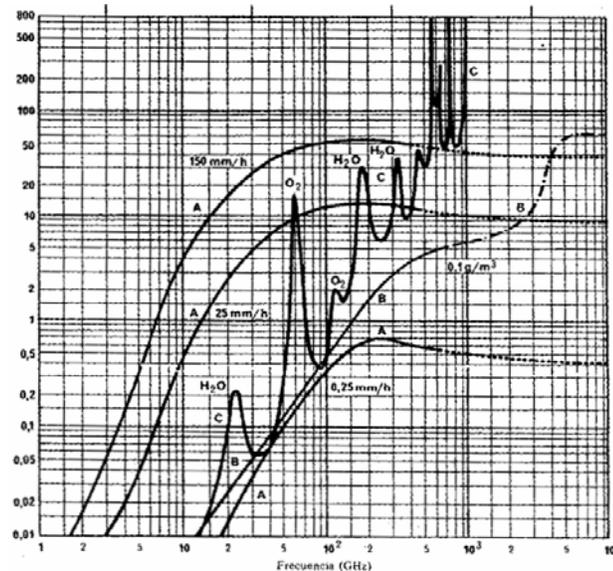
Es la capa inferior de la atmósfera terrestre, está comprendida desde la superficie terrestre hasta una altitud de 6 a 18 kilómetros, en ella se concentran la mayoría de los gases de la atmósfera y es la zona más turbulenta donde tienen lugar todos los fenómenos meteorológicos y climáticos. La temperatura más baja que puede llegar a alcanzar es del orden de los -50° Celsius.

EFFECTO DE LA TROPOSFERA Y LA RADIOATENUACIÓN

La troposfera perturba la propagación de las ondas electromagnéticas de forma que al establecer cualquier tipo de radiocomunicaciones dentro de este entorno atmosférico aparecerán una serie de fenómenos que modificarán las condiciones ideales de propagación en el vacío. La atenuación de las señales electromagnéticas en la troposfera parte de la absorción molecular de los gases que la componen principalmente por hidrometeoros. En la figura 1 se representa la atenuación específica (dB/Km) en función de la frecuencia para un trayecto próximo a la superficie de la tierra.

Esta absorción molecular como se muestra en la figura 1, se debe principalmente a las moléculas de oxígeno y al vapor de agua. Dentro de las frecuencias superiores a los 10 GHz, la atenuación en las telecomunicaciones se torna considerable, acrecentando la radioatenuación a medida que aumenta su frecuencia. A partir de los 22,3 GHz y 60 GHz aparecen los primeros indicadores

asociados al vapor de agua y al oxígeno. El indicador oxígeno es especialmente importante ya que a nivel del mar presenta atenuaciones del orden de 15 dB/Km, lo que imposibilita las comunicaciones a larga distancia.



A: lluvia
B: niebla
C: componentes gaseosos

Figura 1

Atenuación específica para trayectos en la troposfera

Fuente: Aznar, Antenas (2005)

La atenuación por hidrometeoros, especialmente la lluvia, depende de la intensidad y de otros factores tales como el tamaño de la gota, cantidad y velocidad del agua. Volviendo a la figura 1, se observa como a diferentes intensidades de lluvia puede resultar apropiado utilizar un método de pronóstico para obtener la probabilidad de que ocurra una precipitación, y sobredimensionando el sistema de forma que la atenuación adicional asociada a esta intensidad de lluvia no afecte al sistema.

Para aplicaciones prácticas la atenuación específica de la lluvia según la recomendación ITU-R P.838-3, puede calcularse como:

$$\gamma_R = kR^\alpha \text{ (dB/km)} \quad (1)$$

Donde R representa la intensidad de lluvia en mm/hr, k y α son los coeficientes en función de la frecuencia dentro del rango de 1 GHz hasta los 1.000 GHz, que

difieren de la polarización vertical como la horizontal. Para el cálculo de los coeficientes según su polarización, k_H , k_V y α_H , α_V ; se utilizan las ecuaciones 2 y 3 con los valores de los cuadros 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

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

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3)$$

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 α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
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 α_v

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,3384	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
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 α con las componentes horizontal k_H , α_H y vertical k_V , α_V obtenidas, se sustituyen los valores utilizando las siguientes 2 ecuaciones:

$$k = \frac{[k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{[k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2k} \quad (5)$$

Donde θ es el ángulo de elevación del trayecto de la onda en grados y τ es la inclinación de la polarización en grados. Finalmente, con los coeficientes k y α ya obtenidos, es posible calcular el valor de la radioatenuación por efecto de la lluvia en dB/Km con la ecuación 1 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 para estimar la atenuación específica de la lluvia

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
50	0,6600	0,8084	0,6472	0,7871
100	1,3671	0,6815	1,3680	0,6765
500	1,5418	0,6253	1,5366	0,6272
1000	1,3795	0,6396	1,3822	0,6365

Si se considera que las gotas son esféricas y utilizamos la ecuación 1, podemos

observar en la figura 2 que la atenuación a frecuencias inferiores a los 100 GHz aumenta a medida que se acerca, mientras que cuando la frecuencia esta sobre los 100 GHz la atenuación disminuye levemente y se puede percibir un valor constante incluso cercano dentro de los límites de las frecuencias ópticas.

Para pronosticar los efectos de la lluvia sobre los enlaces en las telecomunicaciones subsiste el problema de conocer las características de las lluvias en la zona. Es fundamental disponer de los datos de observación meteorológica para establecer una forma probabilística de las diferentes intensidades de lluvia, para ello se requiere de series de observación largas para garantizar la fiabilidad estadística de los resultados.

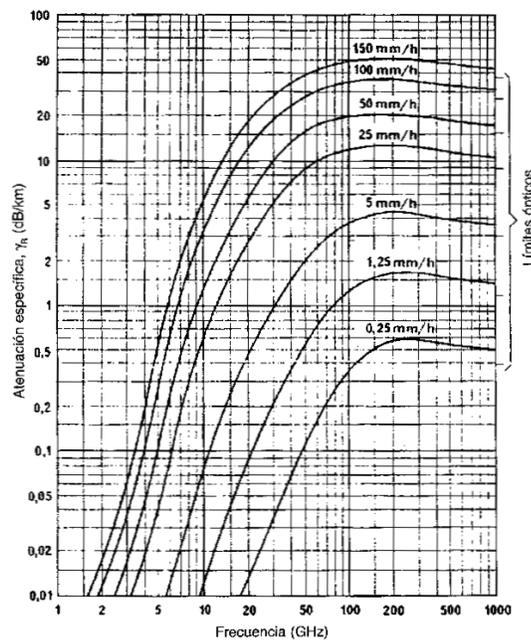


Figura 2
Atenuación específica debida a la lluvia
Fuente: Aznar, Antenas (2005)

Por último, en trayectos de propagación de señales inclinadas o trayectos tierra-espacio, los valores de radioatenuación específica de la figura 2 difieren a los mostrados en la figura 1, puesto que a medida que se gana altura disminuye las concentraciones de gases y por lo tanto la atenuación. El contenido de vapor de agua disminuye considerablemente mientras que el oxígeno lo hace de forma más gradual.

SUAVIZADOS EXPONENCIALES

Los suavizados exponenciales son unos de los métodos de pronóstico más ampliamente utilizados. En resumen, estos permiten utilizar múltiples parámetros y



formas de cálculo adaptables a las tendencias, estacionalidades y comportamientos de las series temporales de datos, ayudando a determinar con facilidad el método adecuado para la estimación.

Uno de los suavizados es el simple o único, este utiliza las observaciones más recientes contienen información más actualizada acerca de lo que acontecerá en el futuro, donde se les asigna menor ponderación a las observaciones más antiguas. La ecuación para el cálculo utilizando este modelo es la siguiente:

$$F_{t+1} = F_t + \alpha(X_t - F_t) \quad (6)$$

En cuanto al método de suavizado exponencial lineal o de Holt en comparación al método simple, es apropiado cuando la serie de datos contiene un patrón horizontal, es decir, no tiene tendencia. En tal caso, el método lineal reconoce explícitamente tomando en consideración la presencia de la tendencia. Las ecuaciones para aplicar este método de pronóstico son las siguientes:

$$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1}) \quad (7)$$

$$T_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)T_{t-1} \quad (8)$$

$$F_{t+m} = S_t + T_t m \quad (9)$$

Como se muestra en la ecuación 7, sirve para obtener un valor suavizado de la tendencia y combina dicha tendencia con la estándar de suavizamiento enunciado en el método anterior.

En cuanto a la ecuación 8, la tendencia más reciente está ponderada por γ y la última tendencia suavizada está ponderada por $(1 - \gamma)$. La suma de estos valores ponderados es el nuevo valor de tendencia suavizada.

Como este método toma en cuenta una tendencia lineal y, por consiguiente, con una serie no estocástica da un error cero cuando α y γ tienen sus valores óptimos. En cambio, cuando una serie de datos tiene aleatoriedad, es más difícil determinar los valores óptimos de α y γ , y los errores de predicción no serán cero.

Siguiendo con el suavizado exponencial estacional o de Winters, este reporta resultados semejantes a los del método lineal, pero con la ventaja de ser capaz de manejar datos estacionales junto a los datos que tengan una tendencia. Este método se basa en tres ecuaciones donde cada una suaviza un factor asociado con uno de los tres componentes del patrón: aleatoriedad, tendencia y estacionalidad. En este aspecto es semejante al método lineal, el cual suaviza lo aleatorio y ajusta lo tendencial. Sin embargo, el método de Winters incluye un parámetro adicional para manejar la estacionalidad. A continuación se enumeran las ecuaciones

implicadas para el método de Winters:

$$S_t = \frac{\alpha X_t}{I_{t-L}} + (1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1}) \quad (10)$$

$$T_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)T_{t-1} \quad (11)$$

$$I_t = \delta \frac{X_t}{S_t} + (1 - \delta)I_{t-L} \delta \quad (12)$$

$$F_{t+m} = (S_t + T_t m)I_{t-L+m} \quad (13)$$

La ecuación 12 es comparable a un índice estacional. Dicho índice se calcula como la razón del valor actual de la serie X_t dividido entre el valor suavizado actual de la S_t . Si X_t es mayor que S_t , la razón será mayor que la función del índice estacional.

Otro método de suavizado es el amortiguado, este último difiere del método lineal ya que amortigua (disminuye) la tendencia lineal que se extrapola a medida que nos dirigimos más hacia el futuro, teniendo mucho sentido ya que la mayoría de las series de datos no aumentan o disminuyen al infinito. A continuación se presentan las ecuaciones para este método de suavizado:

$$S_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1})\varphi \quad (14)$$

$$T_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma)T_{t-1}\varphi \quad (15)$$

$$F_{t+m} = S_t + \sum_{i=1}^m \varphi_i T_t \quad (16)$$

Este método incluye el parámetro extra φ (además de los 2 parámetros de Holt), el cual aplica el amortiguamiento óptimo mediante la aplicación de valores diferentes para elegir el que minimice el error cuadrado o la desviación media absoluta.

PROMEDIO MÓVIL INTEGRADO DE AUTO REGRESIÓN (ARIMA)

ARIMA es el método de análisis de series de tiempo más adaptable ya que puede tratar con cualquier patrón de datos. Para todo propósito práctico, múltiples clases o tipos generales de series de tiempo pueden describir cualquier tipo de



patrón de datos de series de tiempo, estos pueden ser: autoregresivos (AR), de promedio móvil (MA) y de promedio móvil autoregresivo mixto (ARMA), tanto simples como estacionales.

Un modelo autoregresivo tiene la forma siguiente:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (17)$$

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 (de aquí el nombre de auto) variable, es decir, observaciones, pero de periodos anteriores. Por último, e_t , es el error, o término residual, que representa las perturbaciones aleatorias que no pueden ser explicadas por el modelo.

En el mismo orden de ideas, la ecuación 17 se llama autoregresivo porque se asemeja a la ecuación de regresión ($Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p + e$). La   nica diferencia es que $X_t = Y_{t-1}, X_2 = Y_{t-2}, \dots, X_p = Y_{t-p}$, y así las variables independientes son simplemente valores rezagados de la variable dependiente con rezagos de tiempo 1,2,...,p periodos.

Otro modelo posible es del tipo de promedio móvil (MA), se representa de la siguiente forma:

$$Y_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (18)$$

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. Finalmente ambas ecuaciones son semejantes con la excepción de que implica que la variable dependiente Y_t depende de valores previos del término de error más que de la variable misma.

Para los modelos mixtos ARMA, se parte de una combinación de las ecuaciones 17 y 18, 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:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t - \phi_1 e_{t-1} - \phi_2 e_{t-2} - \dots - \phi_q e_{t-q} \quad (19)$$

Para modelos con datos estacionales, las ecuaciones 17, 18 y 19 podrían no ser suficientes y debe completarse con parámetros estacionales. Como explicado anteriormente, los modelos estacionales pueden ser: AR, MA y ARMA. Un modelo AR estacional con datos mensuales sería:

$$Y_t = \phi_{12} Y_{t-12} + e_t \quad (20)$$

Para un modelo MA estacional mensual tendría la forma siguiente:

$$Y_t = e_t - \theta_{12}e_{t-12} \quad (21)$$

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

$$Y_t = \phi_{12}Y_{t-12} + e_t - \theta_{12}e_{t-12} \quad (22)$$

Estos tipos de modelos de series de tiempo: AR, MA y ARMA, han sido utilizados por algún tiempo. Yule (1926, 1927) fue quien describió los modelos AR hace 60 años. En 1937 Slutsky propuso los modelos MA, y en 1954 Wold explicó los modelos mixtos ARMA. No obstante, tales contribuciones en su desarrollo y aplicación estuvieron gravemente limitadas, fundamentalmente debido a razones de cómputo.

PROCEDIMIENTO

En esta parte, se explica en resumen el procedimiento llevado a cabo para la recolección de la serie de datos obtenidos por los organismos entes y el análisis concerniente a los métodos de pronóstico aplicados para el posterior cálculo de la radioatenuación troposférica por lluvia para la ciudad de Maracay.

RECOLECCIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS DE LLUVIA

En esta fase se conforma la recolección y el procesamiento de los registros de lluvia de la estación meteorológica 80413, ubicada en la ciudad de Maracay. Asimismo, se realiza la verificación y comparación de los registros de lluvia diaria y mensual desde el año 1938 hasta el 2005 mediante una interfaz de cómputo para validar los datos obtenidos por la Fuerza Aérea Venezolana y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

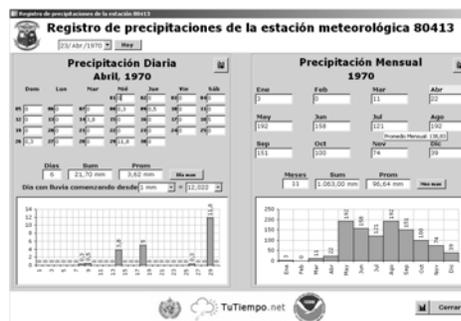


Figura 3
Interfaz para el manejo de los registros de lluvia
Fuente: Zsarolyani, Alan (2007)

Entretanto, para lograr un análisis exhaustivo de los datos obtenidos, se



desarrolló una interfaz, tal como se muestra en la figura anterior, que sirve para el manejo de los datos de lluvia presentados tanto en medidas diarias como mensuales en cifras y en gráficos de barras. También se presentan algunos cálculos para determinar la validez de los mismos, tales como el promedio mensual, anual, número de días o meses con lluvia por mes o por año respectivamente, total de precipitación mensual/anual y el promedio de número de días de lluvia mensual total, para efectos de verificación y el análisis de los valores reales de lluvia.

Asimismo, se desarrollaron controles de búsqueda para facilitar la consulta de los registros, módulos de adquisición de los datos en tiempo real suministrados por la NOAA y notificaciones de registros de lluvia nulos o desconocidos. Igualmente, se establecieron algoritmos para la determinación de días o meses con mayor cantidad de precipitación con el propósito de validar las medidas reales de lluvia, y así mejorar los resultados que se desean obtener posteriormente con el modelo de pronóstico empleado.

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRONÓSTICO

En esta fase de la investigación, se comienza con el análisis de series de tiempo utilizando las observaciones mensuales de lluvia real recopiladas durante los años 1938 hasta el 2000. Para los distintos métodos de pronóstico de suavizado y el método de pronóstico ARIMA, se realizaron los cálculos para la determinación de los coeficientes óptimos y el proceso de identificación de los parámetros para el método ARIMA, obteniendo resultados para un pronóstico de 5 años siguientes, es decir, hasta el año 2005, que son comparados posteriormente con los datos reales de esos años para la evaluación y selección del mejor método de pronóstico.

En resumen, se detallan los resultados obtenidos con los métodos de pronóstico analizados, en este caso, el método de Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión (ARIMA), es el que proporciona el menor error porcentual en comparación a los otros métodos de suavizados empleados. A continuación se muestra el cuadro 6, una comparación de los errores porcentuales de todos los métodos de pronóstico empleados en esta investigación.

Cuadro 6. Comparación de los métodos de pronóstico desde los años 2001 hasta el 2005 utilizando el error porcentual

Métodos de Pronósticos	Error Porcentual (%)
ARIMA(2,0,2)(1,1,1)₁₂	38,064
Suavizamiento Exponencial Simple con componente estacional Multiplicativo	38,349
Suavizamiento Exponencial Simple con componente estacional Aditivo	38,401
Suavizamiento Exponencial Estacional o de Winters	38,539
Suavizamiento Exponencial Amortiguado con componente estacional Multiplicativo	40,144

Cuadro 6 Cont.

Suavizamiento Exponencial Amortiguado con componente estacional Aditivo	40,331
Suavizamiento Exponencial Lineal o de Holt	85,393
Suavizamiento Exponencial Simple	85,427
Suavizamiento Exponencial Amortiguado	86,859

Siguiendo con el análisis que se llevó a cabo con el método ARIMA, se realiza un procedimiento por fases establecido por Box-Jenkins utilizando la serie de datos real. A continuación, se establece el modelo y los parámetros para formular un pronóstico para los 5 años siguientes.

Como primer paso, se determina la presencia de la estacionalidad en la serie de datos. Para esto, se realiza un diagrama espectral con el fin de establecer con que frecuencia ocurre cada ciclo de lluvia. Como se muestra en el gráfico 1, se observa un pico en la frecuencia 0.08, donde $1 / 0,0833 = 12$ meses. Con este resultado, se deduce un ciclo estacionario en la serie igual a 12 meses.

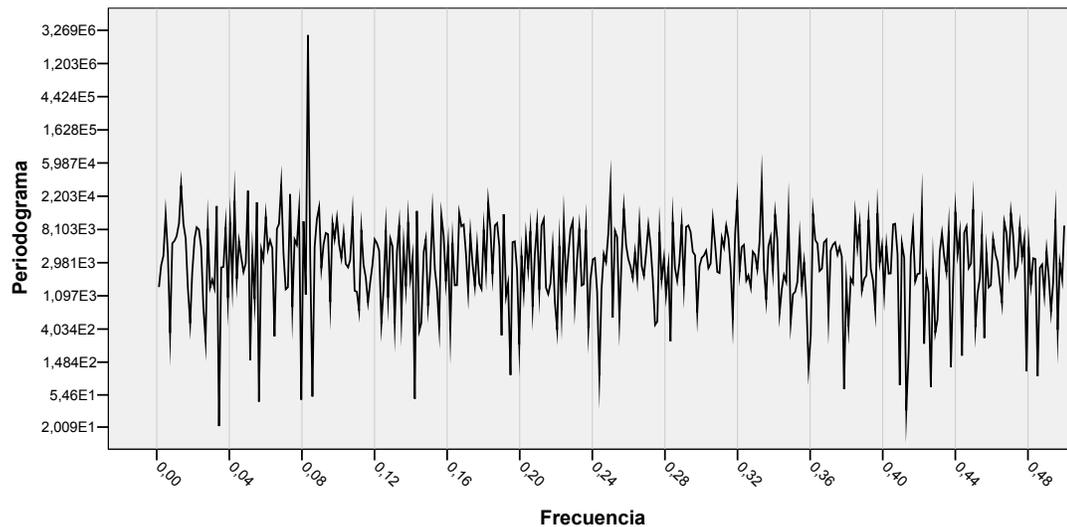


Gráfico 1. Diagrama espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real

Al establecer la periodicidad igual a 12 meses, se recurren a las gráficas de las autocorrelaciones simples y parciales para determinar el modelo ARIMA específico para el cálculo del pronóstico realizando ensayos con diferenciaciones. Finalmente, al realizar un suavizamiento de la serie datos con el fin de eliminar los picos de lluvia registrada y con una diferenciación estacional de orden 1, se elimina la tendencia y se logra alcanzar un patrón de autocorrelación válido, tal como se muestra en el gráfico 2

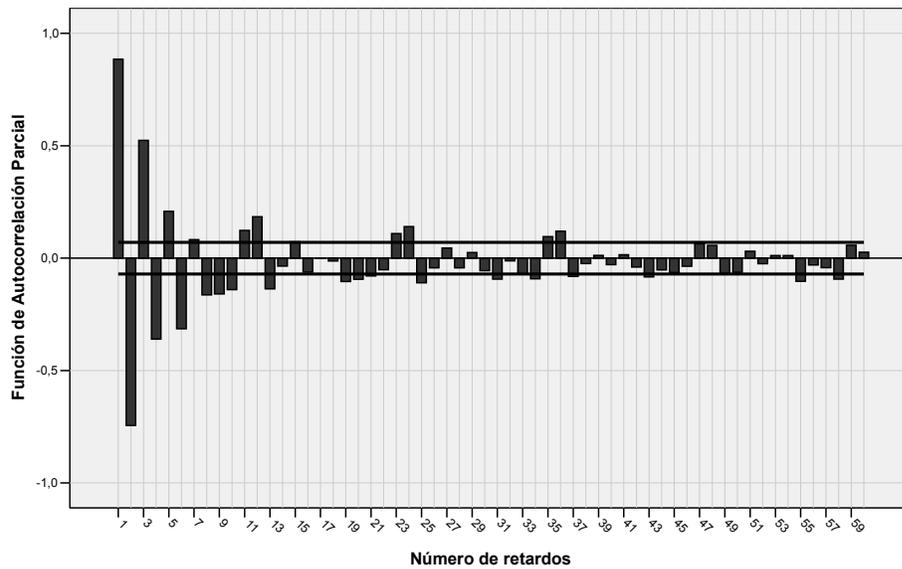
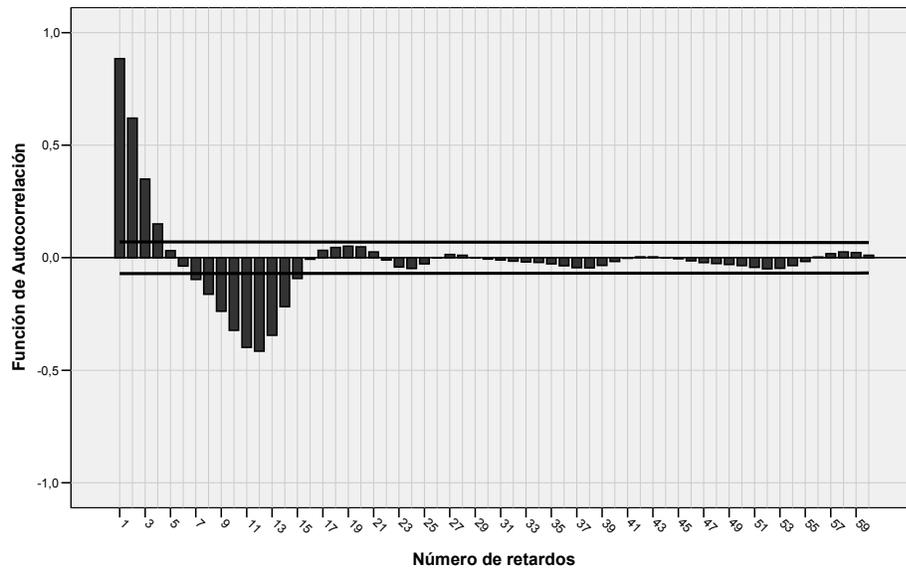


Gráfico 2. Autocorrelación Simple y Parcial con suavizamiento y diferenciación estacional de orden 1

Se observa en el gráfico anterior, el decrecimiento exponencial o tendencia a cero en los retardos, especificando un comportamiento que aplica a un modelo ARMA con diferenciación estacional de orden 1, es decir, ARIMA.

Con el modelo definido, se realizan un número de ensayos para obtener el mejor conjunto de parámetros que represente el pronóstico con los datos de lluvia real. A continuación, en el cuadro 7, se muestran los 6 mejores modelos ARIMA de los 26 ensayos realizados.

Cuadro 7. Suma menor de cuadrados residuales corregidos del método ARIMA

ARIMA(p,d,q)(P,D,Q) ₁₂	Suma de cuadrados residuales corregidos
(2,0,2)(1,1,1) ₁₂	1823429,371
(2,0,1)(1,1,1) ₁₂	1823488,508
(1,0,0)(1,1,1) ₁₂	1828487,615
(0,0,1)(1,1,1) ₁₂	1830392,858
(1,0,1)(1,1,1) ₁₂	1830992,236
(1,0,2)(1,1,1) ₁₂	1831487,134

Como se observa en el cuadro 7, los mejores parámetros para implementar el método de pronóstico ARIMA es (2,0,2)(1,1,1)₁₂, ya que contiene el menor error residual de todos los 26 ensayos realizados. Seguidamente, se presenta en el cuadro 8 los coeficientes óptimos de AR(1), AR(2), MA(1), MA(2), AR(1)₁₂ y MA(1)₁₂, obtenidos con el algoritmo de Melard para el cálculo con el método ARIMA.

Cuadro 8. Estimación de los coeficientes óptimos para el método ARIMA (2,0,2)(1,1,1)₁₂ utilizando el algoritmo de Melard

AR(1)	AR(2)	MA(1)	MA(2)	AR(1) ₁₂	MA(1) ₁₂
-0,48824	0,487657	-0,5943	0,388896	0,025258	0,988886

A su vez, se presentan las autocorrelaciones de los residuos del mejor modelo para determinar si los retardos están dentro de los límites de confianza en al menos en un 95%, tal como se muestra en el gráfico 3 y 4.

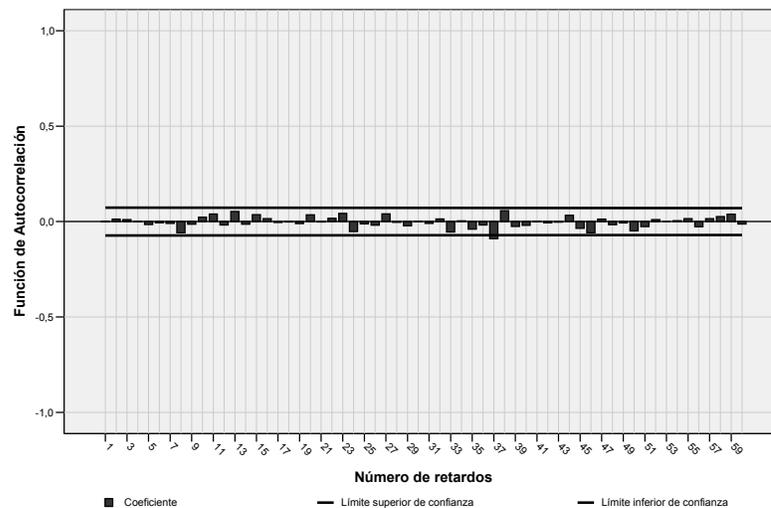


Gráfico 3. Autocorrelación Simple de los residuos utilizando el método ARIMA $(2,0,2)(1,1,1)_{12}$

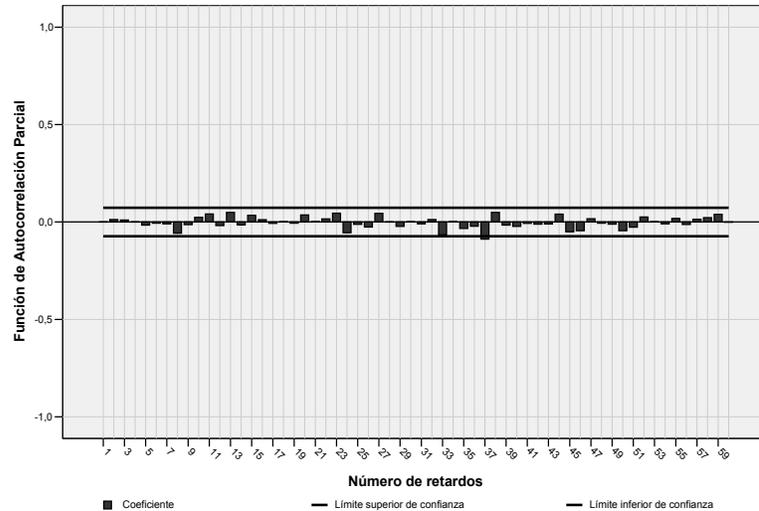


Gráfico 4. Autocorrelación Parcial de los residuos utilizando el método ARIMA $(2,0,2)(1,1,1)_{12}$

Finalmente, se utilizará para el cálculo de la intensidad de lluvia los datos obtenidos bajo el pronóstico del método ARIMA $(2,0,2)(1,1,1)_{12}$, siendo este el más adecuado y confiable para estimar los valores a partir del año 2006 hasta el 2010, en base a los registros de lluvia real desde el año 1938 hasta el 2005.

ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA POR HORA

En esta fase de investigación, se procede a partir de los resultados obtenidos con el método de pronóstico ARIMA, el cálculo de conversión de la intensidad de lluvia de mm/mes a mm/hr.

Para efectuar dicha conversión, las intensidades son calculadas través del promedio de días de lluvia mensual en precipitaciones mayores o iguales a 1 mm de agua, seguido por el número de horas diarias de lluvia a 3 horas promedio. Finalmente, se obtiene una intensidad de lluvia por hora más próxima a la real. A continuación, en el cuadro 9 se presentan una muestra de los valores de intensidad de lluvia para la ciudad de Maracay para los años 2006 y 2010.



Cuadro 9. Intensidades de lluvia mensual y por hora pronosticadas

Fecha	Pronóstico de Lluvia Mensual (mm/mes)	Promedio de Días de Lluvia Mensual ≥ 1 mm	Pronóstico Promedio de Lluvia por Hora (mm/hr)
Ene 2006	5,14	0,51	3,35
Feb 2006	8,17	0,53	5,11
Mar 2006	5,64	0,73	2,56
Abr 2006	47,31	3,44	4,58
May 2006	101,23	8,42	4,01
Jun 2006	128,32	11,33	3,77
Jul 2006	137,96	12,16	3,78
Ago 2006	184,09	13,62	4,50
Sep 2006	135,82	10,98	4,12
Oct 2006	99,69	9,49	3,50
Nov 2006	50,42	6,31	2,66
Dic 2006	18,47	2,18	2,82
Ene 2010	2,71	0,51	1,77
Feb 2010	5,96	0,53	3,72
Mar 2010	5,64	0,73	2,56
Abr 2010	46,11	3,44	4,46
May 2010	101,45	8,42	4,02
Jun 2010	127,60	11,33	3,75
Jul 2010	138,03	12,16	3,79
Ago 2010	182,74	13,62	4,47
Sep 2010	137,23	10,98	4,17
Oct 2010	98,65	9,49	3,47
Nov 2010	50,46	6,31	2,67
Dic 2010	17,80	2,18	2,72

DETERMINACIÓN DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

En esta última fase de la investigación, se presentan en base a los resultados obtenidos de los pronósticos desde los años 2006 hasta el 2010, los valores específicos de radioatenuación troposférica por lluvia. El cálculo se realizó con la aplicación de cómputo MATLAB utilizando la recomendación ITU-R P.838-3, con el desarrollo de una interfaz como se muestra en la figura 4, para el ingreso de los parámetros en sucesión de la representación gráfica de los niveles de radioatenuación y la exportación de los resultados a la aplicación de cómputo Excel.

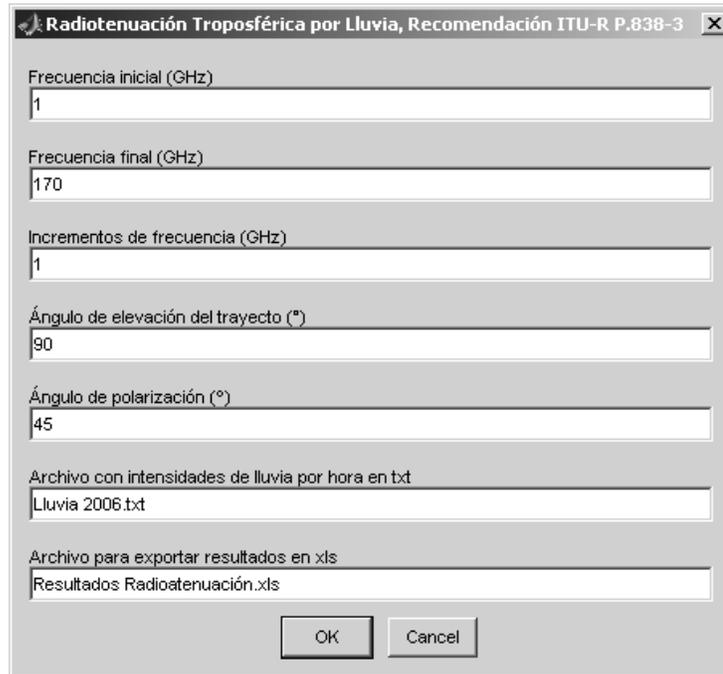


Figura 4
Interfaz para el cálculo de radioatenuación troposférica por lluvia
Fuente: Zsarolyani, Alan (2007)

En el mismo orden de ideas, para determinar el rango de frecuencias a utilizar, se tomaron los valores desde el rango de la banda L hasta el rango de la banda D, que representan el orden de las bandas de frecuencia de las microondas.

Finalmente, para el cálculo de radioatenuación se utilizan las frecuencias comenzando desde 1 GHz hasta los 170 GHz con incrementos de 1 GHz. Asimismo, para los resultados obtenidos se utilizó un ángulo de elevación del trayecto de onda igual a 90° y con una polarización circular de la señal. A continuación, se muestran 2 gráficos de superficie con la radioatenuación troposférica por lluvia mensual estimada para los años 2006 y 2010.

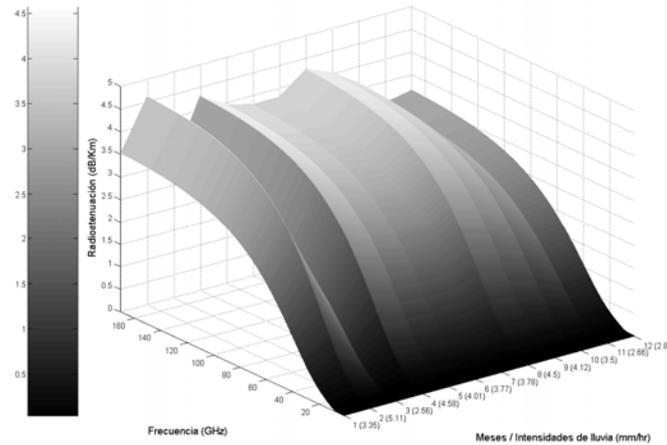


Gráfico 5. Radioatenuación troposférica por lluvia para el año 2006

Como se observa en el gráfico 5, la máxima radioatenuación registrada para el año 2006 fue de 4,61 dB/Km correspondiente al mes de febrero, con una intensidad igual a 5,11 mm/hr en la frecuencia de 170 GHz. Las demás radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de abril y agosto, con intensidades de lluvia iguales a 4,58 mm/hr y 4,5 mm/hr respectivamente. Asimismo, las radioatenuaciones más leves registradas en los 170 GHz para el año 2006 pertenecen a los meses de marzo y noviembre con una radioatenuación igual a 2,96 dB/Km y 3,03 dB/Km respectivamente.

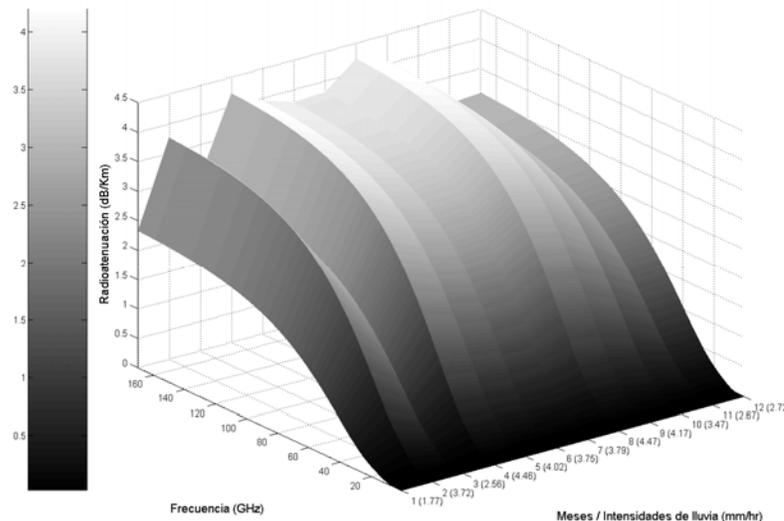


Gráfico 6. Radioatenuación troposférica por lluvia para el año 2010

Finalmente, en el gráfico 6 se presenta la radioatenuación para el último año calculado (2010), donde se observa que para los meses de abril y agosto se



registran intensidades de lluvia similares de 4,46 mm/hr con una radioatenuación igual a 4,23 dB/Km. La radioatenuación más leve registrada en los 170 GHz fue para el mes de enero con 2,34 dB/Km.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para toda la serie de estudios realizados a partir de otras investigaciones, dan a lugar el hecho de que los diversos fenómenos atmosféricos 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.

Asimismo, es importante considerar con la frecuencia que operan los enlaces de telecomunicaciones, ya que se ha demostrado en otros estudios y en los resultados obtenidos en esta investigación, que a mayores frecuencias (en el orden de los 60 GHz), se presenta una radioatenuación significativa igual a 2,94 dB/Km, tomando la mayor intensidad de lluvia por hora estimada, por ende se deben tomar precauciones especiales para evitar inconvenientes relacionados a la pérdida de señal en los enlaces de telecomunicaciones.

Además, es importante señalar que para la recolección de los datos de las distintas organizaciones combinado al desarrollo de una interfaz para la verificación y validación de los registros de lluvia, sirvió para realizar un mejor pronóstico y un cálculo más exacto de la radioatenuación bajo la estimación del promedio de días y horas de lluvia para esa ciudad, ya que en otras investigaciones analizadas se observó que el cálculo de la radioatenuación esta basado en un promedio de las variaciones de lluvia mensuales y de esta forma la intensidad de lluvia por hora calculada es mucho menor que la real, resultando en una radioatenuación de nivel inferior a la especificada en este proyecto.

A su vez, los métodos de pronósticos empleados para estimar la lluvia mensual para períodos posteriores basados en el comportamiento de la serie de lluvia real recolectada, sirvió para demostrar intensidades de lluvia mensuales que difieren de período en período anual pronosticado, dando a conocer resultados más cercanos a los efectos reales de lluvia que los empleados en las otras investigaciones, basadas principalmente en un promedio de radioatenuación para esa localidad.

Finalmente, para la determinación de la radioatenuación troposférica por lluvia, se empleó la recomendación actualizada de la ITU, donde se tiene la posibilidad de especificar otros parámetros adicionales que no se tomaron en cuenta en las demás investigaciones, tales son el grado de inclinación del trayecto de la señal emitida así como la polarización utilizada, ya sea horizontal, vertical o circular; todas estas identificadas mediante el diseño de una interfaz para el ingreso de los parámetros y su análisis correspondiente.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el análisis del comportamiento de la series de datos de lluvia mensual, se logró identificar el patrón de 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.

En este orden de ideas, ya identificado el comportamiento de la serie de lluvia mensual, se logró la identificación de los mejores métodos de pronóstico siendo este el modelo ARIMA, determinado como el más adecuado y avanzado en su tipo, compatible con las características de la serie de datos y con los patrones estacionales.

A su vez, la determinación de la intensidad de lluvia por hora a partir de los días y horas promedios de lluvia mensual, permitió obtener una mejor exactitud y precisión en los resultados de la radioatenuación troposférica para esa ciudad, sin embargo, se recomienda al organismo ente, el estricto registro del promedio máximo mensual de intensidades de lluvia por hora a nivel nacional, para así obtener un mejor resultado del grado de radioatenuación troposférica.

Finalmente, con el cálculo de la radioatenuación troposférica por lluvia según la última recomendación de la ITU, se lograron obtener mejores resultados al ser más específicos involucrando otros parámetros técnicos especificados en dicho artículo, recomendando a las empresas que implementan e instalan radioenlaces troposféricos, tomar en consideración los efectos de los fenómenos atmosféricos como la radioatenuación por lluvia, y así disminuir los problemas que puedan ocasionarse en los enlaces de telecomunicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cardama, A. Cofre, L., R us, 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.
- Makridakis, S. y Wheelwright, S. (2004). Métodos de Pronósticos. México: Limusa.
- Méndez, C. (1995). Metodología. Colombia: McGraw-Hill.
- Moncada, L. Efectos de Atenuación por Lluvia en los Medios de Transmisión entre



Sistemas Satelitales y Estaciones Terrestres. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.

Newbold, P. (1975). The principles of the Box-Jenkins Approach. Obtenido el 8 de enero de 2007 en <http://www.istor.org/pss/3007750>

Orozco, J. (2006). Modelo Matemático para Evaluar el Efecto de los Fenómenos Atmosféricos en Enlaces de Radio Microondas de 2.4 GHz. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.

Pérez, C. (2005). Métodos Estadísticos Avanzados con SPSS. España: Thomson.

Risquez, G., Fuenmayor, E. y Pereira, B. (1999). Metodología de la Investigación. Maracaibo: Proeduca.

Sosa, J., Sosa, C., y Paz, B. (2000). ARIMA Models in Rain Attenuation Prediction in a Mexican Tropical Area, 0-7803-6369-8. Obtenido el 10 de abril de 2007 de la base de datos IEEE.

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