



RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA PRONOSTICADA PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE ELEVACIÓN DEL ENLACE EN CORO ENTRE 2010 - 2014

(Tropospheric radio attenuation predicted for different angles of elevation of the link
in Coro between 2010 - 2014)

Recibido: 12/08/2015 Aceptado: 28/01/2016

Ferrer, Ingris

Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín, URBE, Venezuela

kared0911@hotmail.com

RESUMEN

Los sistemas de telecomunicaciones que trabajan en radiofrecuencias pueden verse severamente afectados por distintos fenómenos atmosféricos, tales como la lluvia. Por ello, es fundamental estudiar el efecto de la lluvia sobre los radioenlaces a fin de garantizar la confiabilidad y disponibilidad de la comunicación. Este estudio tuvo como propósito fundamental determinar los niveles de radioatenuación troposférica en la ciudad de Coro entre los años 2010 y 2014, utilizando seis diferentes ángulos de elevación del enlace. Para su desarrollo, constó de cinco (5) fases, a saber: recopilación de los datos de lluvia proporcionados por el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar, el análisis del método de pronóstico ARIMA basado en la recomendación ITU-R P.838-3 publicada en el año 2005; la estimación de la intensidad de lluvia por hora pronosticada, el cálculo de la radioatenuación troposférica para cada ángulo utilizado con sus correspondientes gráficas, obtenidas por medio del software MatLab R2010a. Finalmente, se utilizó el software Origin 8.0 para establecer la relación entre la radioatenuación troposférica y el ángulo de elevación del enlace. Los resultados indican similar patrón de comportamiento entre la lluvia real y pronosticada, indicando que el ángulo de elevación del enlace tiene poca influencia en los niveles de radioatenuación troposférica; por lo tanto, solo la frecuencia y la intensidad de lluvia tienen un efecto estadísticamente significativo.

Palabras claves: radioatenuación troposférica, ángulo de elevación, pronóstico.

ABSTRACT

The systems of telecommunications that work in radiofrequencies can it turns severely affected by different atmospheric phenomena, such as the rain. For it, it is fundamental to study the effect of the rain on the radio links in order to guarantee the dependability and readiness of the communication. This study had as fundamental purpose to determine the levels of tropospheric radio attenuation in the city of Coro, among the years 2010 and 2014, using six different angles of elevation of the connection. For their development, it consisted of five (5) phases, that is: summary of the proportionate rain data for the Service of Meteorology of the Military Aviation, the analysis of the presage method ARIMA based on the recommendation ITU-R P.838-3 published in the year 2005; the estimate of the rain intensity for predicted hour, the calculation of the tropospheric radio attenuation for each

used angle, with their corresponding graphs obtained by means of the software Matlab R2010a. Finally, the software Origin was used 8.0 to establish the relationship between the tropospheric radio attenuation and the angle of elevation of the connection. The results show similar pattern of behavior between real and forecasted rain, indicating that the elevation angle of the link has little influence on tropospheric levels radio attenuation, therefore, only the frequency and intensity of rainfall have a statistically significant effect.

Keywords: tropospheric radio attenuation, angle elevation, forecast.

INTRODUCCIÓN

El vertiginoso crecimiento de la demanda por parte de usuarios de tecnologías tales como internet, telefonía, televisión, radio, entre otras, ha redundado en desarrollar sistemas que garanticen la calidad, viabilidad y disponibilidad de las comunicaciones, por lo que se hace imperativo estudiar los factores que limitan la cobertura y el óptimo desempeño de estos sistemas.

Uno de los principales factores limitantes en la propagación de las señales electromagnéticas son los eventos de lluvia, debido fundamentalmente a que la longitud de onda de las señales con frecuencias superiores a los 5 GHz está en el mismo orden de magnitud de las dimensiones de las gotas de lluvia, lo que produce pérdidas en la potencia debido a los mecanismos de absorción y dispersión de la señal al atravesar dicha gota.

Por ello, se hace necesario una adecuada caracterización de los efectos de la atenuación por lluvia en los enlaces de radio terrestres y satelitales a fin de no sobreestimar los mismos. Es así que en esta investigación se hará un cálculo lo más fidedigno de la radioatenuación causada por lluvia por medio de un modelo de predicción de atenuación, descrito en la recomendación ITU-R P.838-3, considerando la variabilidad del ángulo de elevación del enlace que pueda estimar dichas pérdidas para lograr sistemas de telecomunicaciones confiables y eficientes.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, debido a que la mayoría de los enlaces de comunicación se realizan de manera inalámbrica, es de gran importancia garantizar que la señal emitida por el transmisor llegue a su destino sin sufrir pérdidas considerables que afecten o dificulten la comunicación. Por tanto, es trascendental estudiar los distintos fenómenos meteorológicos y climatológicos, tales como las precipitaciones en forma de lluvia que generan pérdidas en la potencia de la señal electromagnética, a fin de asegurar un alto grado de confiabilidad de la comunicación que favorezca la recepción de la señal electromagnética.

Es pertinente señalar que, de acuerdo con Neri (2003) la atenuación causada por lluvia constituye uno de los factores de degradación de las señales electromagnéticas más importantes en las bandas de alta frecuencia, usadas para establecer los enlaces de comunicaciones de la estación terrena con los satélites.

Asimismo, Cardama y otros (2005) refieren que la lluvia puede producir atenuaciones importantes, un tanto mayores en cuanto más intensa es la precipitación y cuanto más elevada es la frecuencia de las ondas. Esto es, la interrupción debida a la lluvia para estos enlaces es proporcional a la tasa de lluvia de la región, por lo que la interrupción no depende del promedio de lluvia, sino de la cantidad instantánea de agua en el trayecto.

Por su parte, Ramos (2005) señala que la lluvia produce atenuación por absorción (calentamiento) y dispersión (radiación) en las ondas electromagnéticas sin importar la polarización de las mismas. Como las longitudes de onda radioeléctricas en frecuencias milimétricas no son grandes comparadas con la forma, orientación, la velocidad y la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, están relacionados directamente con la pérdida de energía electromagnética.

Estos dos efectos –absorción y dispersión– reducen el desempeño, fiabilidad y disponibilidad del sistema de comunicación, puesto que atenúan las ondas electromagnéticas siendo más relevantes en frecuencias por encima de 5 GHz. Por tanto, es necesario estudiar las características particulares de la distribución de la intensidad de esta en localidades específicas empleando modelos estadísticos suficientemente adecuados para la estimación de la atenuación por lluvia. Esta puede calcularse a partir de la recomendación ITU-R P.838-3 que ofrece los parámetros necesarios para hacer una predicción lo más exacta posible, tales como la tasa de lluvia, la frecuencia de transmisión y el tipo de polarización de la onda.

Cardama y otros (2005) señalan que la diversidad de polarización influye significativamente sobre la atenuación troposférica, puesto que proporciona una pequeña pero significativa mejora con la polarización vertical que la horizontal para la atenuación debida a la lluvia en los radioenlaces. La razón de esto es que las gotas de lluvia al caer asumen una forma aproximadamente esferoidal aplastada, debido al efecto de la gravedad y la tensión superficial del agua. Suelen mantener un eje casi vertical, aunque su orientación media puede inclinarse unos grados debido a la fuerza horizontal generada por el viento.

Por otro lado, de acuerdo a Rosado (2000) cuanto más pequeño sea el ángulo de elevación del enlace, mayor será la distancia de una onda propagada que debe pasar por la atmosfera terrestre. Por lo tanto, la señal sufre absorción y también, puede contaminarse severamente por el ruido generando mayores pérdidas en la señal, lo que redundaría en una transmisión inadecuada e ineficiente. En este sentido, es pertinente considerar el ángulo de elevación en los sistemas de radioenlaces, a fin de garantizar que la intensidad de la señal no se vea afectada por los fenómenos atmosféricos y particularmente, por las precipitaciones en forma de lluvia.

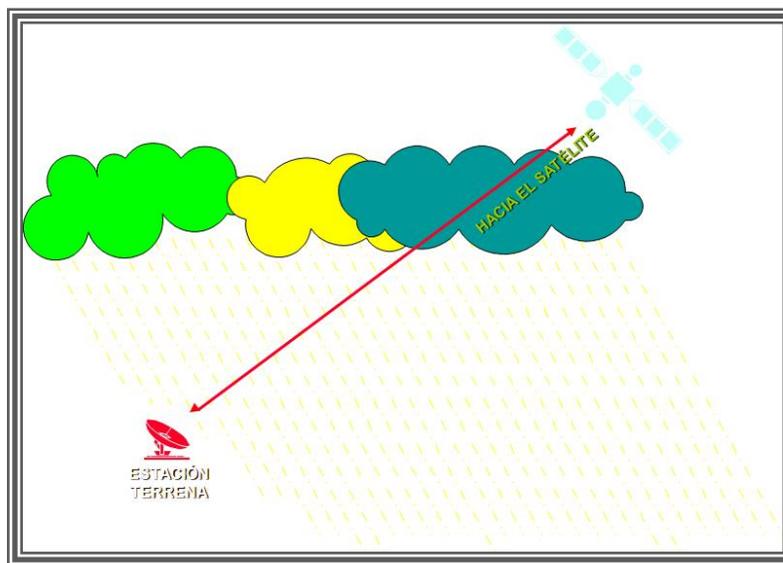
En la ciudad de Coro se registran 382 mm de lluvia anual, presentándose los mayores niveles entre octubre y diciembre. A pesar de ser una región semiárida, es preciso estudiar los efectos que la lluvia produce en los sistemas de comunicación en esta localidad considerando diferentes ángulos de elevación del enlace, por lo que se hará una estimación de los niveles de radioatenuación hasta el año 2014.

ATENUACIÓN POR LLUVIA

Ramos (2005) refiere que en los radioenlaces troposféricos y por satélite se producen pérdidas o reducción de las características de potencia y polarización de las ondas electromagnéticas debido a la absorción y dispersión causada por hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo o la niebla.

Según el autor, la atenuación por lluvia depende de la intensidad de precipitación, de manera que cuánto más intensa es esta mayor será la radioatenuación producida. En la figura 1 se observa este fenómeno que es la principal causa de la degradación en los sistemas de telecomunicaciones.

Figura 1. Atenuación por lluvia



Fuente: elaboración propia (2011).

En la recomendación ITU-R P.838-3, se recoge una relación aproximada entre la atenuación específica y la intensidad de lluvia R expresada en mm/h, mediante la siguiente ley exponencial:

$$\gamma_R = KR^\alpha \text{ (dB / Km)} \quad (1)$$

Donde las constantes K y α son los coeficientes altamente dependientes de la frecuencia dentro del rango de 1 GHz hasta los 1000 GHz y de la estructura de la lluvia, débilmente del tipo de polarización.

Para el cálculo de los coeficientes K y α que pueden ser para polarización horizontal y vertical, se utilizan las ecuaciones 2 y 3 con los valores de los cuadros 1 y 2 respectivamente.

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

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

Donde f es la frecuencia expresada en GHz.

Los cuadros 1 y 2 presentan los coeficientes a, b, c y m que se utilizan para el cálculo de las constantes K y α . Estos coeficientes son obtenidos considerando las siguientes premisas: tamaño de las gotas de lluvia, relación entre la forma y tamaño de las gotas, orientación de las gotas, velocidad terminal de las gotas de lluvia, propiedades dieléctricas del agua y la temperatura uniforme de la lluvia.

Cuadro 1. Coeficientes para K_H y α_H

| j | a_j | b_j | c_j | m_k | c_k | m_α | C_α |
|---|----------|----------|----------|----------|---------|------------|------------|
| 1 | -5,3398 | -0,10008 | 1,13098 | | | | |
| 2 | -0,35351 | 1,2697 | 0,454 | | | | |
| 3 | -0,23789 | 0,86036 | 0,15354 | -0,18961 | 0,71147 | - | - |
| 4 | -0,94158 | 0,64552 | 0,16817 | | | | |
| 1 | -0,14318 | 1,82442 | -0,55187 | | | | |
| 2 | 0,29591 | 0,77564 | 0,19822 | | | | |
| 3 | 0,32177 | 0,63773 | 0,13164 | - | - | 0,67849 | -1,95537 |
| 4 | -5,3761 | -0,9623 | 1,47828 | | | | |
| 5 | 16,1721 | -3,2998 | 3,4399 | | | | |

Fuente: Recommendation ITU-R P.838-3 (2005).

El cuadro 1, indica los valores de los coeficientes para el cálculo de las constantes K_H y α_H de polarización horizontal, los cuales son parámetros importantes en el proceso del cálculo de la atenuación específica de la lluvia.

Cuadro 2. Coeficientes para K_v y α_v

| j | a_j | b_j | c_j | m_k | C_k | m_α | C_α |
|---|----------|----------|----------|----------|---------|------------|------------|
| 1 | -3,80595 | 0,56934 | 0,81061 | | | | |
| 2 | -3,44965 | -0,22911 | 0,51059 | | | | |
| 3 | -0,39902 | 0,73042 | 0,11899 | -0,16398 | 0,63297 | - | - |
| 4 | 0,50167 | 1,07319 | 0,27195 | | | | |
| 1 | -0,07771 | 2,3384 | -0,76284 | | | | |
| 2 | 0,56727 | 0,95545 | 0,54039 | | | | |
| 3 | -0,20238 | 1,1452 | 0,26809 | - | - | -0,053739 | 0,83433 |
| 4 | -48,2991 | 0,791669 | 0,116226 | | | | |
| 5 | 48,5833 | 0,791459 | 0,116479 | | | | |

Fuente: Recommendation ITU-R P.838-3 (2005).

El cuadro 2 indica los valores de los coeficientes para el cálculo de las constantes K_H y α_H de polarización vertical, los cuales son parámetros importantes en el proceso del cálculo de la atenuación específica de la lluvia.

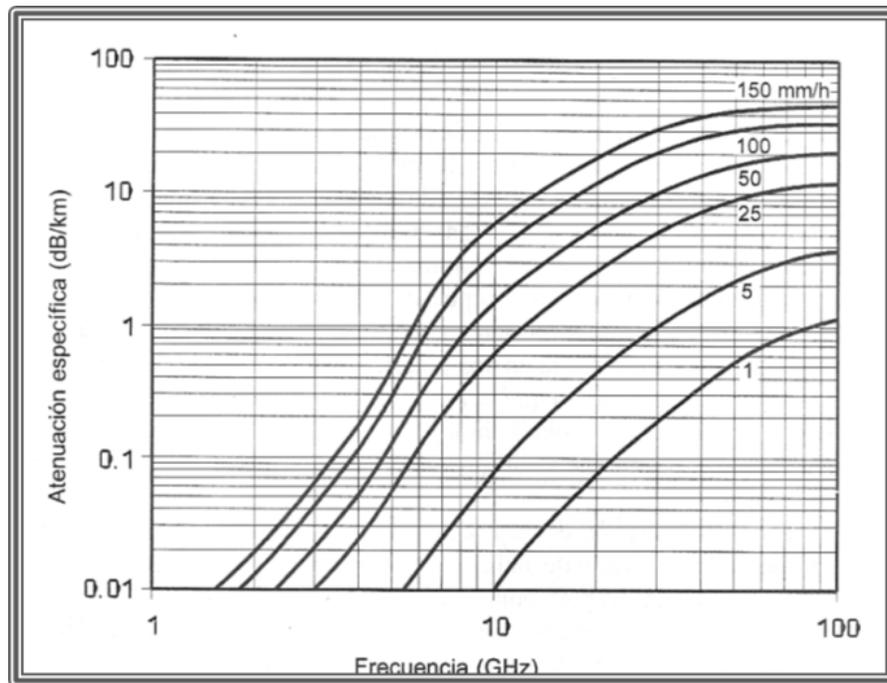
Para polarizaciones distintas a la horizontal y vertical, y para cualquier geometría del trayecto, los coeficientes K y α de la ecuación 1 pueden calcularse mediante las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{[K_H + K_V + (K_H - K_V)\cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{[K_H\alpha_H + K_V\alpha_V + (K_H\alpha_H - K_V\alpha_V)\cos^2 \theta \cos 2\tau]}{2K} \quad (5)$$

Donde θ es el ángulo de elevación del trayecto de la onda en grados y τ es el ángulo de inclinación de la polarización respecto al plano horizontal en grados, que dependerá del tipo de polarización, sea lineal, circular o elíptica. En la figura 2 se aprecia cómo la atenuación de la señal varía de acuerdo a la intensidad de la lluvia.

Figura 2. Coeficiente aproximado de atenuación en función de la frecuencia y de la intensidad de lluvia



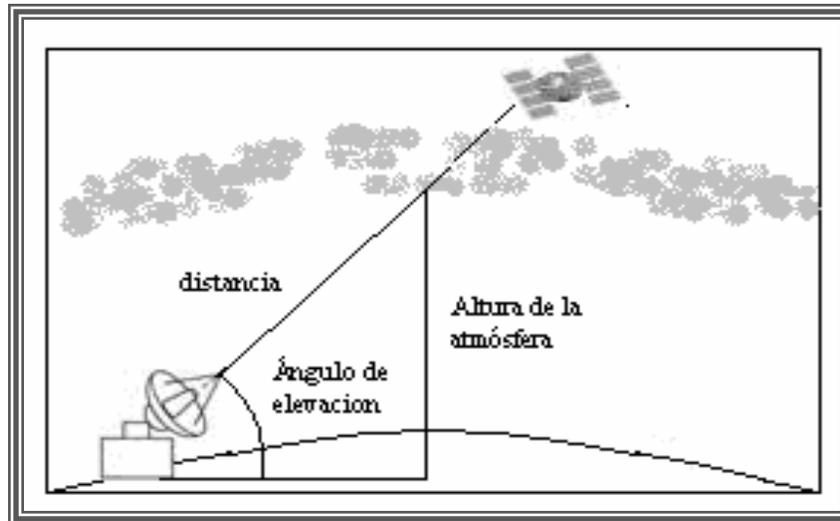
Fuente: Rosado (2000).

Nótese que la atenuación a frecuencias inferiores a los 100 GHz aumenta a medida que se acerca; cuando la frecuencia está sobre los 100 GHz la atenuación disminuye levemente y se puede distinguir un valor constante incluso cercano dentro de los límites de las frecuencias ópticas.

ÁNGULO DE ELEVACIÓN DEL ENLACE

En opinión de Neri (2003), el ángulo de elevación del enlace es el ángulo formado entre el plano horizontal local y la línea de vista entre la estación terrena y el satélite, es decir, el ángulo de la antena de la estación terrena formado entre el satélite y la horizontal, tal como se ilustra en la figura 3.

Figura 3. Definición de ángulo de elevación



Fuente: González y Palacios (2009).

El autor arriba mencionado, refiere que entre más pequeño sea el ángulo de elevación, mayor será la distancia que una onda propagada debe pasar por la atmósfera de la tierra. Consecuentemente, si el ángulo de elevación es demasiado pequeño y la distancia de la onda que está dentro de la atmósfera de la tierra es demasiado larga, la onda puede deteriorarse hasta el grado que proporcione una transmisión inadecuada.

FASES DE LA INVESTIGACIÓN

FASE I: RECOLECCIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA

En esta fase se obtiene la data de las precipitaciones en forma de lluvia registradas entre los años 2000 – 2009, suministradas por el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar Bolivariana correspondiente a la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional José Leonardo Chirino en la ciudad de Coro.

FASE II: APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE PRONÓSTICO

En la segunda fase, se detallan los resultados obtenidos con el método de pronóstico empleado, haciendo uso del software SPSS v.17. Asimismo, se muestra en tablas los valores pronosticados con el método ARIMA, en base a los coeficientes y parámetros óptimos estimados por la aplicación de cómputo a partir de un algoritmo automatizado de ensayo y error.

FASE III: ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA POR HORA

En esta fase, usando los resultados obtenidos de la tasa de lluvia pronosticada para los cinco años estimados, se realiza el cálculo de la intensidad de lluvia por hora. Para

ello, cada uno de los resultados de lluvia pronosticados se divide entre el promedio de días de lluvia mensual y luego entre el número promedio de horas diarias de lluvia, es decir, 24 horas obteniéndose de esta manera la intensidad de lluvia por hora correspondiente para cada mes.

FASE IV: DETERMINACIÓN DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

En esta fase se realiza el cálculo de la radioatenuación a partir de las intensidades de lluvia de los cinco años pronosticados, variando considerablemente el ángulo de elevación del enlace. Los ángulos de elevación utilizados para este estudio son: 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°. Se utiliza polarización circular, es decir, un ángulo de inclinación de polarización igual a 45 grados, que en este caso es constante. El cálculo se realiza utilizando la aplicación de cómputo MatLab R2010a y 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. Estos resultados estarán expresados anualmente en tablas y gráficos de tres dimensiones: mes, frecuencia y radioatenuación.

FASE V: RELACIÓN ENTRE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA Y EL ÁNGULO DE ELEVACIÓN DEL ENLACE

Para la ejecución de esta fase se hace uso del software Origin 8.0, para obtener gráficas de los niveles de radioatenuación troposférica de acuerdo a la variabilidad del ángulo de elevación del enlace y las frecuencias de operación para el mes y año más significativo del pronóstico. Previo a ello, es imperativo realizar un análisis univariante a fin de conocer el nivel de significancia entre las variables objeto de estudio para determinar la relación existente entre las mismas y posteriormente, presentar la discusión de resultados.

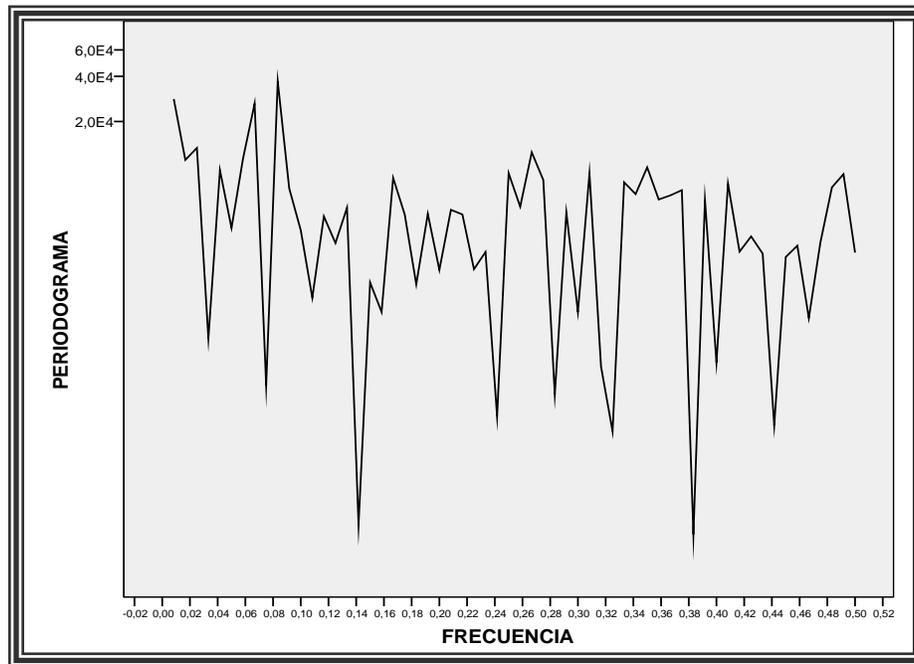
RESULTADOS DE LOS PRONÓSTICOS

Para construir un modelo ARIMA que aproxime aceptablemente las características de una serie de tiempo se hace uso de la metodología de Box-Jenkins, la cual puede ser estructurada en cuatro etapas, de acuerdo a lo expresado por Hanke y Reitsch (2006).

En primer lugar, se realiza un análisis preliminar de la serie de datos para observar su carácter general. Para ello, a través del software SPSS v.17 y utilizando las observaciones mensuales de lluvia recopiladas, se grafica la serie a través del tiempo de manera que puedan observarse a priori sus componentes: tendencia, estacionalidad y ciclos. Se realiza un diagrama espectral con el fin de establecer con qué frecuencia ocurre cada ciclo de lluvia.

En la figura 4 se observan frecuencias significativas a los 12 y 17 meses. Esto se evidencia en el primer pico alto que corresponde a la frecuencia 0,06 el cual detecta el ciclo de la serie. Como el periodo es el inverso de la frecuencia, resulta que el ciclo corresponde a un periodo de $1/0,06 = 17$ meses.

Figura 4. Diagrama espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real



Fuente: elaboración propia (2011).

Asimismo, el segundo pico más alto se puede observar en la frecuencia 0.08. Este pico detecta el periodo estacional de la serie. En consecuencia, el periodo estacional de la serie corresponde al inverso de la frecuencia, es decir $1/0.08 = 12$ meses. Con este resultado se deduce un ciclo estacionario en la serie.

En cuanto a la tendencia, se puede afirmar que el comportamiento de los datos suele ser creciente, pero este crecimiento no es homogéneo, porque la lluvia exhibe una alta variabilidad tanto en el tiempo como en el espacio. Podría notarse también la necesidad de aplicar diferencias, en la parte estacional o regular, para hacer que la media sea constante, así como su varianza homogénea a fin de conocer si existe estacionariedad en la serie de datos. El cuadro 3 muestra el resultado de las varianzas y medias de la lluvia real por años.



Cuadro 3. Valores de varianzas y medias de la lluvia real anual para Coro

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|------------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| VAR | 3421,39 | 231,07 | 310,25 | 1212,41 | 4400,73 | 6950,22 | 1805,08 | 2543,22 | 6467,34 | 728,92 |
| MED | 38,48 | 12,26 | 18,15 | 20,86 | 44,47 | 61,250 | 52,04 | 44,11 | 75,93 | 33,39 |

Fuente: elaboración propia (2011).

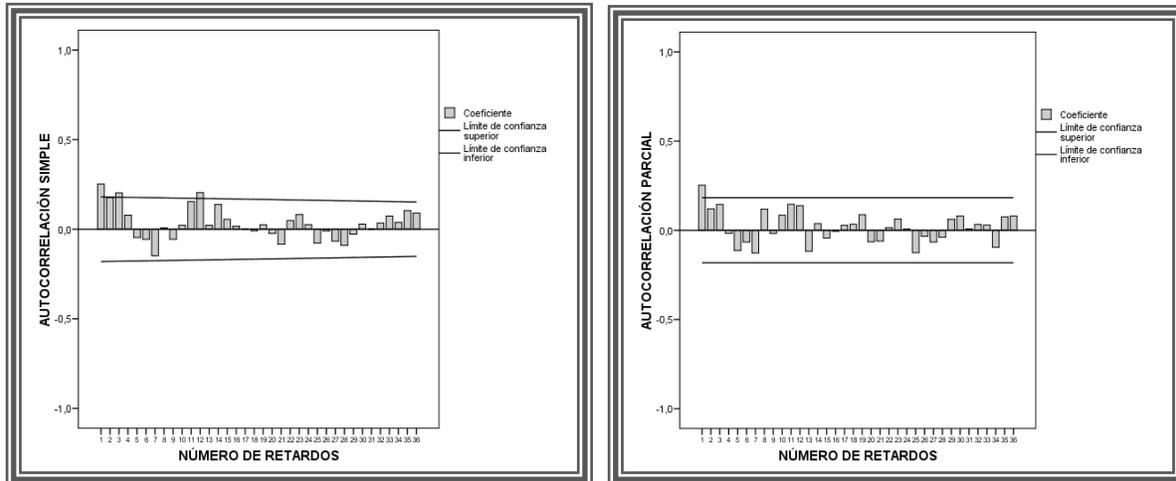
Como se ve, los valores de las varianzas y las medias anuales fluctúan; es decir, existe variabilidad de las observaciones a través de los años. Esto significa que no hay estacionariedad con respecto a la media y a la varianza, por lo que es preciso efectuar algunas transformaciones: en el caso de la media, hay que diferenciar la serie y, en el caso de la varianza, es conveniente hacer una transformación logarítmica de los datos que permitan establecer la existencia de regularidades en la serie, con el objetivo de atenuar la falta de estacionariedad para eliminar la tendencia.

En segundo lugar, como la serie presenta componente estacional, es preciso determinar las funciones de autocorrelación simple y parcial y sus correspondientes correlogramas para observar el comportamiento de los coeficientes de la parte autorregresiva (AR) y de la parte de medias móviles (MA).

La figura 5 muestra la función de autocorrelación simple estimada y la función de autocorrelación parcial estimada de la serie de datos con un número máximo de retardos igual a 36, para representar estas funciones con un tramo significativo.

Al comparar con las funciones de autocorrelación simple y parcial teórica de distintos procesos ARMA, se observa que los coeficientes no decrecen lentamente, lo que sugiere la no estacionariedad de la serie. En consecuencia, es preciso diferenciar la serie para eliminar la falta de estacionariedad.

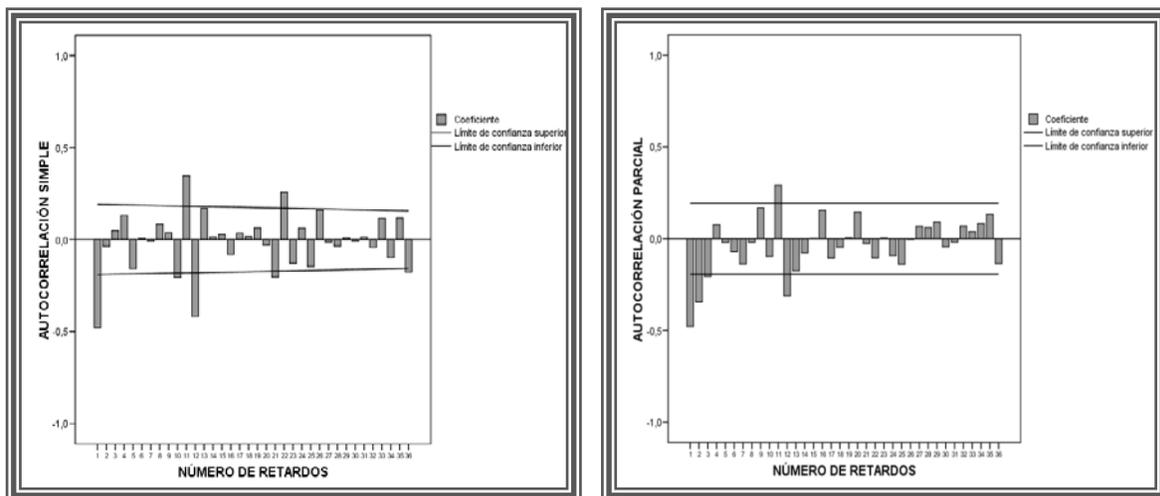
Figura 5. Autocorrelación Simple y Parcial utilizando la serie de lluvia real



Fuente: elaboración propia (2011).

La figura 6 muestra las funciones de autocorrelación simple y parcial diferenciadas en la parte regular. Nótese que al diferenciar solo la parte regular de la serie de datos, las funciones de autocorrelación simple y parcial superan el problema de la falta de estacionariedad.

Figura 6. Autocorrelación Simple y Parcial diferenciadas en la parte regular



Fuente: elaboración propia (2011).

Ambas funciones cumplen las condiciones para que haya estacionalidad porque los coeficientes de la autocorrelación para retardos múltiples del período estacional de la serie son significativamente distintos de cero, logrando eliminar la tendencia. Puede



observarse ahora, que la serie tiene un decrecimiento exponencial en los retardos, lo que conlleva a que la diferenciación por ciclos es de orden 1 y se ha superado la falta de estacionariedad.

En tercer lugar, se hace necesario realizar la estimación de los parámetros. En comparación con los modelos de autocorrelación teórica y las gráficas que se observan en la figura 6, se suponen dos (2) modelos o parámetros iniciales. El primer modelo que se supone es el $(1,1,1)$ $(1,1,1)_{12}$ y el segundo modelo es el $(1, 1, 1)$ $(0, 1, 1)_{12}$. Se analizarán los dos modelos seleccionados a fin de determinar cuál se ajusta a los datos en forma razonablemente buena para efectuar la predicción, según se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Diagnóstico residual de los modelos de predicción supuestos

| DIAGNOSTICO RESIDUAL | MODELO $(1,1,1)$ $(1,1,1)_{12}$ | MODELO $(1,1,1)$ $(0,1,1)_{12}$ |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Número de residuos | 107 | 107 |
| Número de parámetros | 4 | 3 |
| GL residuales | 103 | 104 |
| Suma de cuadrados residual corregida | 680,703 | 691,575 |
| Suma de cuadrados residual | 855,159 | 824,289 |
| Varianza residual | 4,895 | 5,363 |
| Error típico del modelo | 2,213 | 2,316 |
| Log-verosimilitud | -252,825 | -252,656 |
| Criterio de Información de Akaike | 513,651 | 511,313 |
| Criterio de Información de Schwarz | 524,342 | 519,331 |

Fuente: elaboración propia (2011).

De manera más precisa, se observa que el modelo $(1,1,1)$ $(1,1,1)_{12}$ tiene menor error y varianza residual, lo que admite ser elegido, pero el modelo $(1,1,1)$ $(0,1,1)_{12}$ tiene mejor bondad de ajuste, lo que se evidencia en los criterios de información de Akaike y de Schwarz, además de la diferencia en cuanto a la suma de cuadrados de los residuos, puesto que minimizan la información haciendo este modelo más próximo al teórico, según Pérez (2001).

En cuarto lugar, se verifica el diagnóstico mediante la comparación de la estimación de los parámetros. En el cuadro 5 se observan los coeficientes óptimos MA(1) y AR(1) para ambos modelos supuestos, obtenidos a partir del algoritmo de Melard. En este caso, este algoritmo es eficiente puesto que la serie ha estado diferenciada y permite obtener estimaciones con máxima verosimilitud exacta.

Cuadro 5. Coeficientes Óptimos MA (1) y AR (1) para los dos modelos supuestos

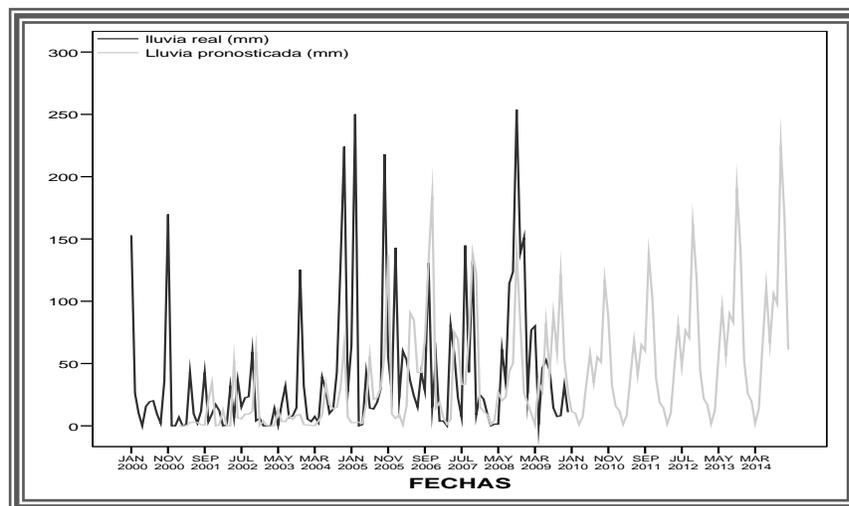
| CRITERIOS | RETARDOS NO ESTACIONALES AR (1) | | RETARDOS ESTACIONALES MA(1) | |
|----------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | (1,1,1)(1,1,1) ₁₂ | (1,1,1)(0,1,1) ₁₂ | (1,1,1)(1,1,1) ₁₂ | (1,1,1)(0,1,1) ₁₂ |
| ESTIMACIONES | 0,183 | 0,175 | 0,994 | 0,917 |
| ERROR TÍPICO | 0.099 | 0,102 | 4,970 | 0,301 |
| t | 1,861 | 1,721 | 0,200 | 3,051 |
| SIGNIFICANCIA | 0,066 | 0,088 | 0,842 | 0,003 |

Fuente: elaboración propia (2011).

Nótese que el modelo $(1,1,1) (0,1,1)_{12}$ tiene menores niveles de significación para los retardos estacionales. Si bien es cierto que este modelo presenta niveles de confianza superiores a 0,05 para los retardos no estacionales, se considera el mejor modelo debido a que presenta estimaciones más eficientes (menores) tanto para los retardos estacionales como los no estacionales en comparación con el modelo $(1,1,1) (1,1,1)_{12}$.

A continuación, la figura 7 muestra los valores de lluvia real y pronosticada. La línea negra refleja el comportamiento de las precipitaciones reales, mientras que la línea gris el de las precipitaciones pronosticadas.

Figura 7. Lluvia mensual real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA



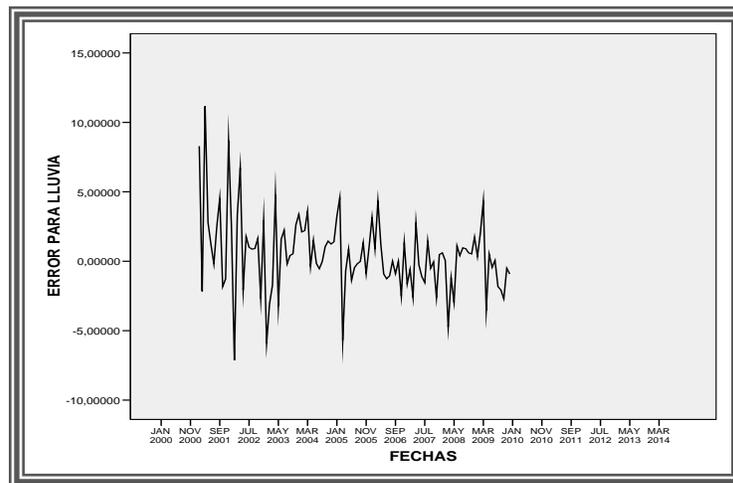
Fuente: elaboración propia (2011).

En la figura se observa una escasa desviación entre los datos reales y los

proyectados; la tendencia del patrón anual de precipitaciones muestra un comportamiento creciente a través del tiempo para los datos pronosticados. Esta representación pone de manifiesto la buena capacidad predictiva del modelo ARIMA obtenido.

Finalmente, se muestra en la figura 8 la representación de los errores de la serie de datos real. Se observan varios posibles valores atípicos notables en los valores demasiado negativos.

Figura 8. Error de Lluvia real mensual aplicando el Método de ARIMA



Fuente: elaboración propia (2011).

Gráficamente, existe una estructura aleatoria, puesto que anualmente se observa una considerable irregularidad registrada por la amplitud de los valores extremos de lluvia. Esta variación respondería a fenómenos atmosféricos regionales, determinando alternancia en los registros con valores superiores e inferiores de la media anual. En contraste con el error típico del modelo, se presenta una variabilidad de 2,316 alrededor del promedio, lo que se ajusta a los datos observados, como indica el cuadro 4.

Luego de obtener el pronóstico de lluvia para los años estimados, se procede a calcular la intensidad de lluvia por horas para la ciudad de Coro. Para ello, es necesario que los resultados de lluvia pronosticados sean divididos entre el producto del número de días de lluvia mensual y el número promedio de horas diarias de lluvia, obteniéndose así la intensidad de lluvia por hora correspondiente para cada mes.

En el cuadro 6 se presentan los valores de lluvia pronosticados para el período 2010-2014, ambos inclusive, utilizando los datos reales desde 2000 hasta 2009. Como se indicó con anterioridad, hay una fluctuación en la media de la serie; se observa que el período lluvioso en la ciudad de Coro ocurre entre los meses octubre – febrero, a considerar por los valores medios.

Cuadro 6. Valores de lluvia mensual real y pronosticada en mm para la serie de datos aplicando el método de ARIMA

| | AÑOS | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| LLUVIA REAL | 2000 | 153,0 | 26,2 | 10,0 | 0,0 | 16,0 | 19,0 | 20,0 | 9,5 | 2,0 | 36,0 | 170,0 | 0,0 |
| | 2001 | 0,0 | 6,8 | 0,0 | 1,2 | 43,0 | 9,6 | 2,2 | 11,6 | 43,0 | 3,1 | 9,7 | 17,0 |
| | 2002 | 12,1 | 0,0 | 0,5 | 31,8 | 6,6 | 36,7 | 15,2 | 22,5 | 23,4 | 59,0 | 4,0 | 6,0 |
| | 2003 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,9 | 0,5 | 17,7 | 31,8 | 6,6 | 8,0 | 14,0 | 125,0 | 32,0 |
| | 2004 | 4,5 | 3,5 | 7,4 | 2,6 | 39,2 | 28,5 | 10,0 | 13,4 | 43,0 | 128,9 | 224,0 | 27,8 |
| | 2005 | 64,6 | 250,1 | 0,0 | 1,0 | 42,1 | 14,2 | 13,5 | 19,0 | 30,5 | 218,0 | 55,4 | 26,6 |
| | 2006 | 143,0 | 22,2 | 60,0 | 53,0 | 36,0 | 24,0 | 15,0 | 42,9 | 28,3 | 130,7 | 15,0 | 54,4 |
| | 2007 | 3,7 | 3,9 | 0,1 | 80,9 | 57,7 | 23,0 | 7,1 | 144,8 | 43,0 | 131,7 | 8,8 | 24,7 |
| | 2008 | 21,4 | 9,5 | 0,0 | 1,4 | 1,4 | 61,2 | 34,8 | 114,2 | 123,7 | 253,8 | 138,8 | 151,0 |
| | 2009 | 26,0 | 77,0 | 80,0 | 1,0 | 46,2 | 52,7 | 44,6 | 14,4 | 7,5 | 8,1 | 32,3 | 10,9 |
| | MEDIA | 42,8 | 39,9 | 15,8 | 18,7 | 28,9 | 28,7 | 19,4 | 39,9 | 35,2 | 98,3 | 78,3 | 35,0 |
| LLUVIA PRONOSTICADA EN HORAS | 2010 | 11,38 | 10,06 | 1,026 | 7,317 | 33,93 | 58,08 | 34,6 | 55,16 | 51,13 | 116,8 | 86,51 | 31,92 |
| | 2011 | 15,72 | 12,17 | 1,214 | 8,619 | 39,94 | 68,35 | 40,73 | 64,92 | 60,18 | 137,5 | 101,8 | 37,57 |
| | 2012 | 18,5 | 14,32 | 1,429 | 10,14 | 47 | 80,45 | 47,93 | 76,41 | 70,83 | 161,8 | 119,8 | 44,21 |
| | 2013 | 21,77 | 16,86 | 1,682 | 11,94 | 55,32 | 94,68 | 56,41 | 89,93 | 83,36 | 190,4 | 141 | 52,04 |
| | 2014 | 25,63 | 19,84 | 1,979 | 14,05 | 65,11 | 111,4 | 66,4 | 105,8 | 98,11 | 224,1 | 166 | 61,24 |
| | MEDIA | 18,6 | 14,65 | 1,466 | 10,41 | 48,26 | 82,6 | 49,21 | 78,45 | 72,72 | 166,1 | 123 | 45,4 |
| | 2010 | 0,015 | 0,015 | 0,001 | 0,01 | 0,046 | 0,081 | 0,047 | 0,074 | 0,069 | 0,157 | 0,12 | 0,043 |
| | 2011 | 0,021 | 0,018 | 0,002 | 0,012 | 0,054 | 0,095 | 0,055 | 0,087 | 0,084 | 0,185 | 0,141 | 0,05 |
| | 2012 | 0,025 | 0,021 | 0,002 | 0,014 | 0,063 | 0,112 | 0,064 | 0,103 | 0,098 | 0,217 | 0,166 | 0,059 |
| | 2013 | 0,029 | 0,025 | 0,002 | 0,017 | 0,074 | 0,132 | 0,076 | 0,121 | 0,116 | 0,256 | 0,196 | 0,07 |
| | 2014 | 0,034 | 0,03 | 0,003 | 0,02 | 0,088 | 0,155 | 0,089 | 0,142 | 0,136 | 0,301 | 0,231 | 0,082 |
| MEDIA | 0,025 | 0,022 | 0,002 | 0,014 | 0,065 | 0,115 | 0,066 | 0,105 | 0,101 | 0,223 | 0,171 | 0,061 | |

Fuente: elaboración propia (2011).

Es evidente que existe un comportamiento similar tanto para la serie real como la pronosticada. En ambos casos, octubre registra el mayor nivel de precipitación, mientras que marzo registra la precipitación más baja.

Posteriormente, en el cuadro 7 se presenta en base a los resultados obtenidos en el pronóstico de lluvia, los niveles de atenuación troposférica para el año 2012, considerando una frecuencia de 170 GHz. Como se ve, octubre y noviembre con valores de 0,60 dB/Km y 0,51 dB/Km e intensidad de lluvia de 0,21mm/h y 0,16 mm/h mutuamente, son los meses con los máximos niveles de radioatenuación para todos los ángulos de elevación utilizados.

Cuadro 7. Valores de radioatenuación troposférica para Coro en el año 2012, aplicando el método de ARIMA

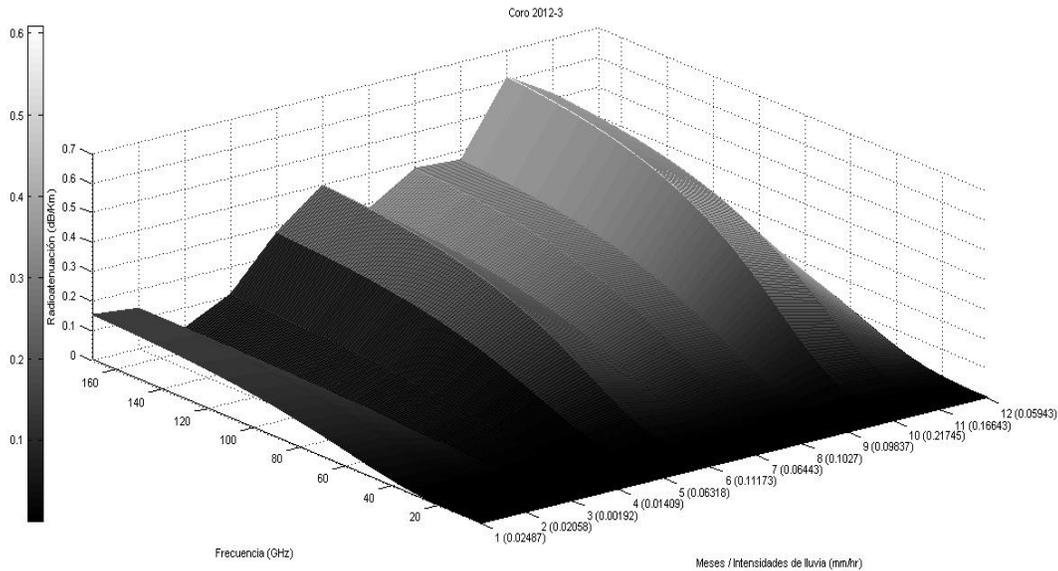
| INTENSIDAD D (mm/h) | 15° | 30° | 45° | 60° | 75° | 90° |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| ENE (0.0248) | 0,1513191 | 0,1510048 | 0,1511480 | 0,1515067 | 0,15147409 | 0,15110532 |
| FEB (0.0205) | 0,1340072 | 0,1337185 | 0,1338501 | 0,1341795 | 0,13414953 | 0,13381087 |
| MAR (0.001) | 0,0292486 | 0,0291574 | 0,0291989 | 0,0293030 | 0,02929357 | 0,02918661 |
| ABR (0.014) | 0,1050872 | 0,1048446 | 0,1049551 | 0,1052319 | 0,10520676 | 0,10492222 |
| MAY (0.063) | 0,2752407 | 0,2747730 | 0,2749861 | 0,2755197 | 0,27547112 | 0,2749226 |
| JUN (0.1117) | 0,3968134 | 0,3962310 | 0,3964964 | 0,3971608 | 0,39710031 | 0,39641728 |
| JUL (0.0644) | 0,2787227 | 0,2782514 | 0,2784661 | 0,2790039 | 0,27895498 | 0,27840211 |
| AGO (0.102) | 0,3759250 | 0,3753604 | 0,3756177 | 0,3762618 | 0,37620319 | 0,37554102 |
| SEP (0.0983) | 0,3656763 | 0,3651207 | 0,3653739 | 0,3660077 | 0,36595005 | 0,36529843 |
| OCT (0.217) | 0,6083500 | 0,6076217 | 0,6079536 | 0,6087844 | 0,60870882 | 0,60785466 |
| NOV (0.166) | 0,5124324 | 0,5117633 | 0,5120682 | 0,5128316 | 0,51276212 | 0,51197735 |
| DIC (0.0594) | 0,2646431 | 0,2641869 | 0,2643948 | 0,2649153 | 0,26486798 | 0,26433286 |

Fuente: MatLab y elaboración propia (2011).

Los resultados anteriores indican que los mínimos valores obtenidos para la misma frecuencia corresponden a los meses de marzo, abril, febrero y enero, en ese orden, con niveles aproximados de 0,02 dB/Km, 0,10 dB/Km, 0,13 dB/Km y 0,15 dB/Km respectivamente.

La figura 9 muestra la radioatenuación registrada para el año 2012, cuando el ángulo de elevación del enlace es de 45°. Nótese que para este ángulo no existe diferencia significativa en los niveles de radioatenuación registrados mensualmente. Se presentan dos mínimos y dos máximos durante el año.

Figura 9. Radioatenuación troposférica por Lluvia para Coro en el año 2012, con un ángulo de elevación de 45°



Fuente: MatLab y elaboración propia (2011).

Análogamente, para el resto de los años pronosticados (2010 – 2014) se observa similar patrón de comportamiento en los niveles de radioatenuación troposférica. El pico máximo de radioatenuación se registró en el mes de octubre para todos los ángulos de elevación, seguido de noviembre y el mínimo nivel se registró en el mes de marzo. No obstante, cabe destacar que esto comprueba el comportamiento de la serie de datos real, puesto que octubre registró el mayor promedio de lluvia real con un valor de 98,39 mm y marzo registró el mínimo promedio con un valor de 15,82 mm.

Por otra parte, se observa además que para todos los ángulos de elevación utilizados los niveles de radioatenuación de los años 2010 al 2014 son poco significativos entre un ángulo y otro, por lo que los resultados pueden ser comparados entre sí de manera directa. La radioatenuación más elevada ocurre siempre para un ángulo de 60 grados, mientras que los niveles más bajos se registran para un ángulo de 30 grados, sin que haya una diferencia significativa.

Adicionalmente, para determinar cuál es la relación entre las variables objeto de estudio, se realiza una comparación de medias a fin de comprobar si los valores de lluvia pronosticados difieren al agruparlos por meses o años.

El cuadro 8 muestra la comparación de medias de los valores de lluvia pronosticados para Coro, estratificado por meses y años. Nótese que el mayor registro de lluvia para la serie de datos corresponde al mes de octubre con media de 166,10 mm.

Cuadro 8. Comparación de medias de lluvia para Coro estratificado por meses y años

| Meses | Media | Años | Media |
|-------|----------|------|---------|
| 1 | 18,6004 | 2010 | 41,4924 |
| 2 | 14,6497 | 2011 | 49,0569 |
| 3 | 1,4660 | 2012 | 57,7368 |
| 4 | 10,4141 | 2013 | 67,9525 |
| 5 | 48,2598 | 2014 | 79,9757 |
| 6 | 82,5978 | | |
| 7 | 49,2146 | | |
| 8 | 78,4498 | | |
| 9 | 72,7214 | | |
| 10 | 166,1068 | | |
| 11 | 123,0376 | | |
| 12 | 45,3964 | | |

Fuente: elaboración propia (2011).

Aquí, el año 2014 es el más significativo de todos los años pronosticados, puesto que presenta un promedio más elevado respecto al resto de los años, con media de 79,97 mm. Mientras que octubre es el mes más significativo, con promedio de 166,10 mm.

El cuadro 9 revela los resultados de la prueba de los efectos inter-sujetos a fin de analizar las relaciones entre respuestas de las variables que se han definido en esta investigación. Por ello, se obtiene información para los contrastes de las distintas fuentes o factores de variación y para la interacción, las sumas de cuadrados, los grados de libertad, las medias cuadráticas, los estadísticos F y los niveles de significación asociados a cada estadístico F.



Cuadro 9. Resultados de la prueba de los efectos inter-sujetos considerando como variable dependiente la radioatenuación troposférica

| FUENTE | SUMA DE CUADRADOS TIPO III | GRADOS DE LIBERTAD | MEDIA CUADRÁTICA | F | SIGNIFIC |
|---------------------|----------------------------|--------------------|------------------|------------|----------|
| MODELO CORREGIDO | 246,332(a) | 1019 | ,242 | 45,800 | ,000 |
| INTERSECCIÓN | 663,311 | 1 | 663,311 | 125671,031 | ,000 |
| ÁNGULO | ,000 | 5 | 6,71E-005 | ,013 | 1,000 |
| FRECUENCIA | 246,331 | 169 | 1,458 | 276,154 | ,000 |
| ÁNGULO * FRECUENCIA | 9,09E-005 | 845 | 1,08E-007 | ,000 | 1,000 |
| ERROR | 21,535 | 4080 | ,005 | | |
| TOTAL | 931,178 | 5100 | | | |
| TOTAL CORREGIDA | 267,867 | 5099 | | | |

Fuente: elaboración propia (2011).

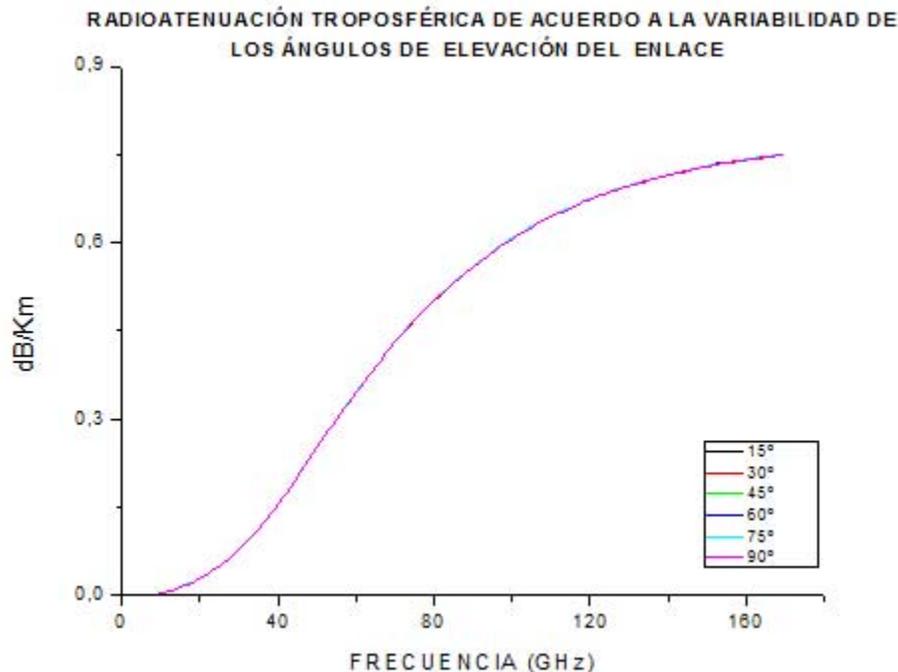
Obsérvese que el modelo completo (modelo corregido) explica de forma significativa una parte de la variabilidad de la variable dependiente. El porcentaje de la variabilidad es de 0,920. Se consideran como factores fijos para el análisis el ángulo de elevación del enlace y la frecuencia.

A la vista de los resultados obtenidos, solo la frecuencia tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente radioatenuación troposférica, puesto que tiene un nivel de significancia óptimo, no así la variabilidad del ángulo ni la interacción entre ángulo y frecuencia.

Atendiendo a los criterios de los efectos inter-sujetos, es necesario graficar los resultados de la radioatenuación troposférica de acuerdo a la variabilidad del ángulo de elevación del enlace, considerando el mes y año más significativo. Para ello, se utilizó el software Origin 8.0 a fin de validar los supuestos de significancia entre las medias para la serie de datos pronosticada.

La figura 10 muestra la radioatenuación troposférica para el mes de octubre y el año 2014, por ser los más significativos de la serie de datos pronosticada, considerando los seis ángulos de elevación utilizados inicialmente. Nótese que los niveles cuantificados de la radioatenuación troposférica parecen ser los mismos para todos los ángulos evaluados; es decir, existe poca variabilidad para frecuencias de operación específicas.

Figura 10. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2014 estimada con diferentes ángulos de elevación



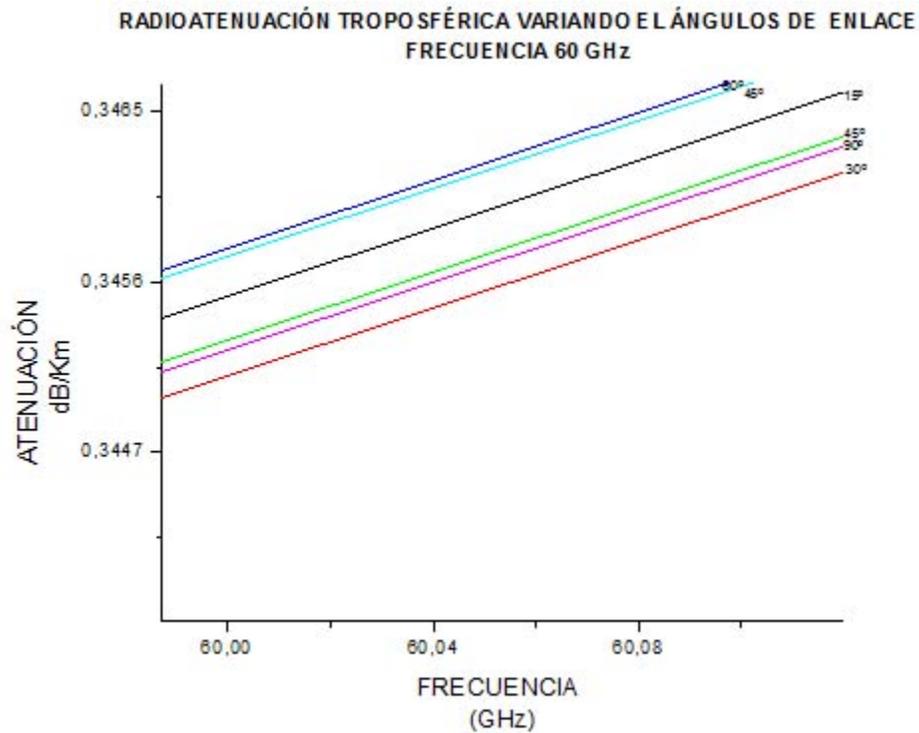
Fuente: elaboración propia (2011).

Tal como se ve, para frecuencias específicas, el ángulo de elevación del enlace no influye significativamente en los niveles de radioatenuación troposférica. Por tanto, se puede generalizar que el ángulo de elevación del enlace no modifica la variabilidad en los niveles de atenuación por lluvia, puesto que estos se mantienen constantes al considerar solo dos cifras significativas.

A fin de examinar la variabilidad de los ángulos utilizados al calcular los niveles de radioatenuación troposférica, se decidió evaluar el caso particular de la frecuencia de 60 GHz como se observa en la figura 11.

Gráficamente, puede notarse que los máximos niveles de atenuación ocurren para los ángulos de elevación de 60 y 75 grados, con un valor de 0,3457 dB/Km y 0,33 dB/Km respectivamente, mientras que los mínimos valores se registran para los ángulos 30 y 90 grados, con niveles en el orden de 0,3451dB/Km y 0,33 dB/Km en ese orden. Los niveles intermedios se registran cuando el ángulo de elevación es de 15 o 45 grados, con nivel de 0,34 dB/Km para ambos. Nótese que no hay diferencia estadísticamente significativa en los niveles de radioatenuación.

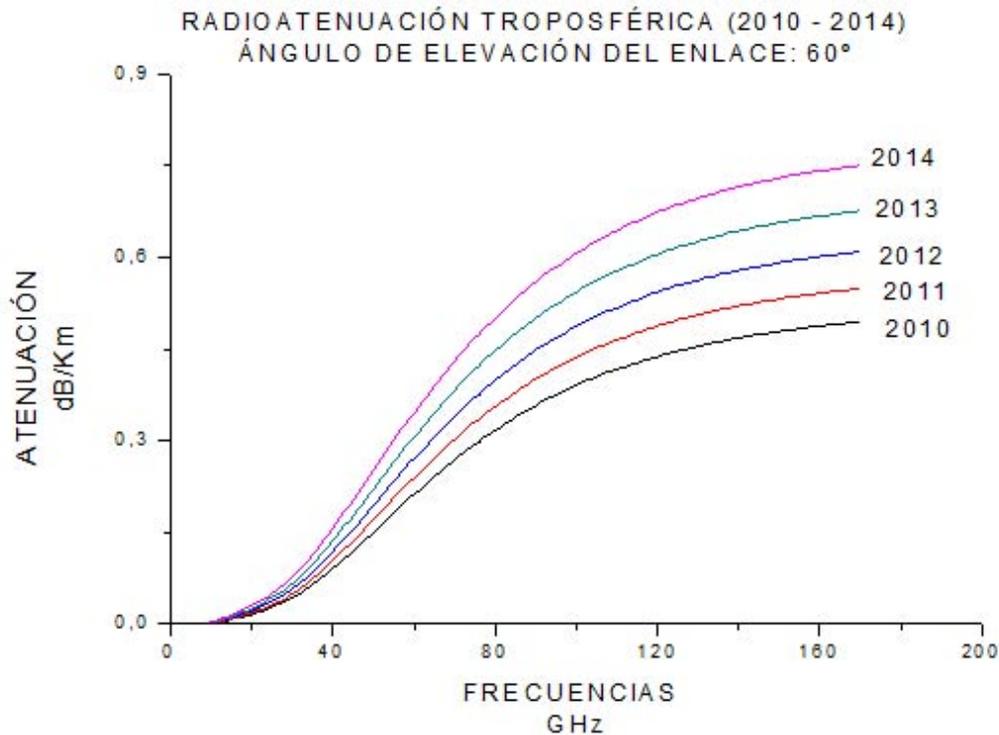
Figura 11. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2014 en Coro para la frecuencia de 60 GHz



Fuente: elaboración propia (2011).

La figura 12 muestra la tendencia de los niveles de radioatenuación troposférica para todos los años pronosticados, al considerar específicamente el ángulo de elevación del enlace de 60 grados.

Figura 12. Radioatenuación troposférica por Lluvia desde 2010 hasta 2014 para un ángulo de 60 grados

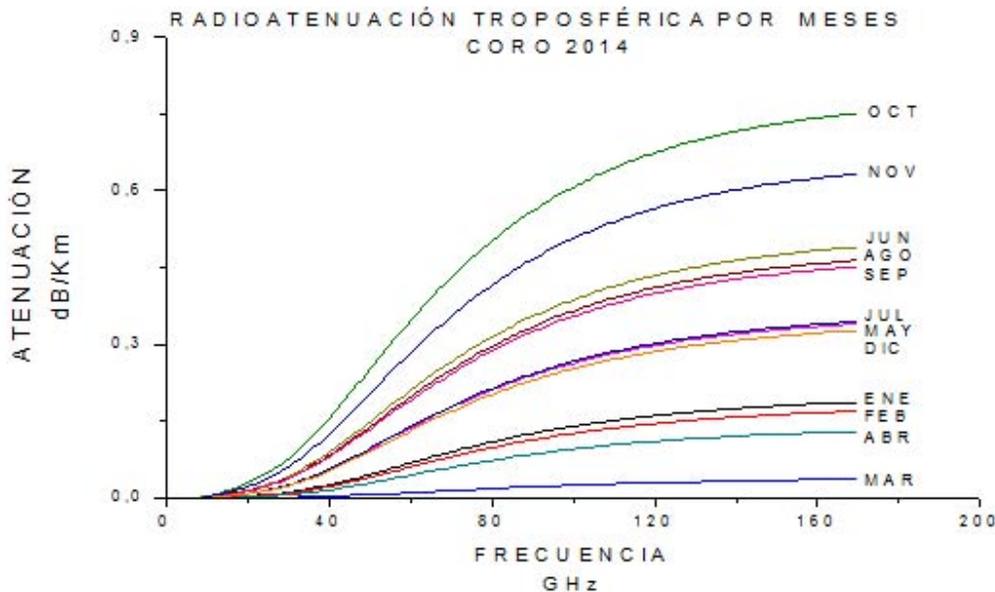


Fuente: elaboración propia (2011).

Evidentemente, los niveles de radioatenuación troposférica para los años pronosticados son crecientes. En el año 2014 se registran los mayores acumulados para las distintas frecuencias. Análogamente, sucede para todos los demás ángulos usados. Adviértase que para cada año, la variabilidad de los ángulos no influye significativamente en los niveles cuantificados de radioatenuación troposférica para frecuencias específicas, tal como se comentó anteriormente.

De la misma manera, se presenta en la figura 13 los niveles de radioatenuación troposférica para el año 2014 cuando se fijó el ángulo de elevación del enlace en 60 grados. Ciertamente, para cualquier frecuencia de operación considerada, esta gráfica ubica el máximo nivel para el mes de octubre, seguido de noviembre y junio. Los mínimos niveles se registraron durante los meses de enero a abril, siendo el mes de marzo donde hubo menor radioatenuación por lluvia. Este comportamiento es similar para todos los años pronosticados y para cada ángulo de elevación utilizado.

Figura 13. Radioatenuación troposférica por Lluvia por mes para el año 2014, con un ángulo de elevación de 60°



Fuente: elaboración propia (2011).

De igual forma sucede para todos los demás ángulos usados. Adviértase que para cada año la variabilidad de los ángulos no influye significativamente en los niveles cuantificados de radioatenuación troposférica para frecuencias específicas, tal como se comentó anteriormente.

En general, el comportamiento de la radioatenuación troposférica queda descrito por la frecuencia de transmisión y obviamente, por los niveles de lluvia registrados, según lo reflejan las gráficas antes descritas.

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos en esta investigación se plantean las siguientes conclusiones:

Se pudo determinar de manera eficiente el modelo de pronóstico que se ajusta a la serie de forma razonablemente buena. El modelo elegido fue $(1,1,1) (0,1,1)_{12}$ puesto que presentó mejor bondad de ajuste, de acuerdo a la información reflejada por los criterios de Akaike y Schwarz.

El error típico del modelo elegido para el pronóstico es de 2,316 lo que indica poca variabilidad alrededor del promedio de la serie; esto indica la precisión de los resultados arrojados por el modelo para todos los años pronosticados, comprobándose así que en el período de enero hasta abril existe poca lluviosidad con un promedio de 0,15 mm/mes; de

mayo a agosto aumenta el ciclo con un promedio de 0,36 mm/mes y para los últimos cuatro meses, se registra los mayores niveles de lluvia con un promedio de 0,56 mm/mes.

En general, durante los años pronosticados (2010 – 2014) se aprecia un patrón similar en el comportamiento de la radioatenuación troposférica. Los niveles más altos se registraron continuamente en el mes de octubre, cuya tasa de lluvia era la más alta durante todo el año, mientras que los niveles ínfimos se registraron en el mes de marzo, para intensidades de lluvia más bajas.

Para el año 2014, se registra el mayor nivel de radioatenuación por cada ángulo de elevación utilizado. Se observa que la radioatenuación por mes es creciente durante cada año pronosticado. Sin embargo, la atenuación por lluvia anual es de 2,81 dB/Km durante el año 2010, mientras que para el resto de los años es de 3,15 dB/Km.

Adicionalmente, no se observó diferencias significativas apreciables en la relación radioatenuación troposférica – ángulo de elevación. Anualmente, los niveles de radioatenuación troposférica son equivalentes para cada ángulo de elevación utilizado. Se observa que el mínimo nivel de atenuación por lluvia se registra para un ángulo de 30 grados, mientras que el máximo nivel corresponde a un ángulo de 60 grados, notables a partir de la tercera o cuarta cifra significativa. Esto no se corresponde con los supuestos teóricos que afirman que a menor ángulo de elevación, los niveles de atenuación son mayores.

Por tanto, se puede concluir en este estudio que el ángulo de elevación del enlace no influye significativamente en los niveles de la radioatenuación troposférica. Solo la frecuencia y la intensidad de lluvia afectan notablemente los niveles de atenuación por lluvia, puesto que para intensidades de lluvia y frecuencias más altas, la radioatenuación troposférica es mayor en la señal.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a las conclusiones obtenidas se recomiendan las siguientes acciones:

Al Servicio de Meteorología de la Aviación Militar sistematizar estrictamente los registros de las precipitaciones en forma de lluvia, a fin de obtener los niveles de lluvia lo más fidedigno posible. Esto implica, mejorar la precisión de los instrumentos utilizados para la recolección de lluvia, y llevar un registro continuo para darle validez a la serie de datos que se utilizan para hacer los pronósticos.

A las universidades, continuar con esta línea de investigación, a fin de generar modelos de pronósticos con datos reales y poder así completar los niveles de radioatenuación troposférica en todo el territorio nacional, lo que redundará en variar los parámetros que influyen en la radioatenuación troposférica, tales como el ángulo de inclinación de la polarización de la onda, para conocer los factores que degradan originalmente las señales de comunicación.

A las empresas de telecomunicaciones que deseen implementar e instalar sistemas de radioenlaces, que tengan en cuenta los efectos que la lluvia particularmente ocasiona



sobre el patrón de propagación de las señales y disminuir los problemas que puedan ocasionarse en dichos enlaces.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardama, A., Jofre, L., Rius, J., Romeu, J, Blanch, S. y Ferrando, M. (2005). Antenas. España. Alfaomega-Ediciones.

González, R. y Palacios, E. (2009). Redes de Acceso Satelital. Chile. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

Hanke, J. y Reitsch, A. (2006). Pronósticos en los negocios (8ª. Ed.). México: Prentice Hall.

ITU (2005). Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods. Recommendation ITU-RP.838-3. Documento en línea. Disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-1!!PDF-E.pdf
Consulta: 22/09/2012.

Neri, R. (2003). Comunicaciones por Satélite. México. Editorial Thomson.

Pérez, C. (2001). Técnicas Estadísticas con SPSS. España. Editorial Prentice Hall.

Ramos, F. (2005). Atenuación Específica debida a la Lluvia. Documento en Línea. Disponible en: <http://www.radioenlaces.es/articulos/calculo-de-la-atenuacion-por-lluvia-en-un-radioenlace/>. Consulta: 09/08/2010.

Rosado, C. (2000). Comunicación por Satélite. Principios, tecnologías y sistemas. México. Editorial Limusa.