



RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA PRONOSTICADA PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE ELEVACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉRIDA ENTRE 2011 Y 2014

(Tropospheric radioattenuation forecast for different angles of elevation in the city
of Mérida between 2011 and 2014)

Recibido: 22/06/2011 Aceptado: 15/01/2012

Orozco Rosales, Igor José

Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Venezuela

orozcoigor@gmail.com

Durante Rincón, Carlos Alberto

Universidad del Zulia, Venezuela

cdurante@luz.edu.ve

RESUMEN

Esta investigación tiene como finalidad determinar la radioatenuación troposférica pronosticada para diferentes ángulos de elevación en la ciudad de Mérida. El estudio estuvo estructurado en cuatro fases de procedimiento, iniciando por la recopilación de los datos de lluvia a través del departamento de Climatología de la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela. Continuando con la aplicación y análisis del método de pronóstico ARIMA para determinar la intensidad de lluvia por hora pronosticada para los siguientes cuatro años desde 2011 hasta 2014. Luego se determinó el nivel de radioatenuación troposférica del pronóstico, calculados con ángulos de elevación de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°, donde se identificó el mes más significativo de los años analizados con el fin de obtener la significancia estadística de los valores según el ángulo de elevación. Por último, se realizó un análisis gráfico y estadístico de los resultados para determinar la incidencia del ángulo de elevación en la radioatenuación de la señal. Esta investigación con modalidad de campo predictiva, se considera según su diseño como no experimental longitudinal. Finalmente se concluyó que los valores de intensidad de lluvia se incrementan principalmente en el mes de octubre para todos los años y ángulos evaluados, mostrando una intensidad de precipitación en 0,217 mm/h originando una atenuación de la señal de 0,60 dB/km aproximadamente en los años pronosticados. La similitud de los pronósticos resultantes indicó que la recomendación UIT-R P.838-3 no varía la polarización de onda ya que solo considera la polarización circular basada en la forma de la gota sin tomar en cuenta otros factores como la polarización lineal y elíptica en determinadas frecuencias.

Palabras claves: Pronóstico, Radioatenuación, Troposférica, Ángulo, ARIMA.

ABSTRACT

The purpose of this investigation is to determine the tropospheric radio attenuation by rain for different angles of elevation in the city of Merida. The study was structured in four phases of procedure; the first phase consists in a compilation of the rain information from the Venezuelan Air force Climatology department. Continuing in the second phase, with



the application and analysis of the ARIMA method prognosis to determine the predicted rain intensity per hour for the next four years, since 2011; in the third phase, we establish the radio attenuation level for the predicted rain intensity, calculated with elevation angles of 15° , 30° , 45° , 60° , 75° and 90° . Then, we identified the most significant month of the analyzed years, in order to obtain the statistical significance of the value, according to their elevation angle. Finally in the fourth phase, a graphical and statistical analysis was achieved with the results in order to determine the incidence of elevation angle on the signal radio attenuation. This is a not experimental, longitudinal and predictive field research. Finally, one concludes that rain intensity values increases principally in October, for every year and all evaluated angles, showing a rainfall intensity of 0,217 mm/h, originating a signal attenuation of approximately 0,60 dB/km, for the predicted years. The predicted results indicate that UIT-R P.838-3 recommendation does not change the wave polarization and it only considers the circular polarization based on the drop shape, without considering other factors as the linear and elliptical polarization for certain frequencies.

Keywords: Forecast, Radio attenuation, Tropospheric, Angle, ARIMA.

INTRODUCCIÓN

Las radiofrecuencias, como principal elemento de difusión de las señales, pueden ser afectadas por varios fenómenos meteorológicos que interfieren con la trayectoria o distribución de estas señales. Factores de los gases atmosféricos como el oxígeno, las precipitaciones en forma de lluvia, granizo o nieve, son fundamentalmente algunos de los problemas que alteran las ondas electromagnéticas de su estado original, en perjuicio de la comunicación.

La radioatenuación es uno de los problemas más frecuentes en las telecomunicaciones; este fenómeno puede traer muchos inconvenientes al momento del establecimiento y permanencia de la conexión, ya sea por perdida de datos, retardo en la transmisión de la información y/o mala receptividad de las señales electromagnéticas.

Por tales motivos, es importante analizar la radioatenuación troposférica pronosticada para diferentes ángulos de elevación en la ciudad de Mérida y determinar qué influencia puede tener en las transmisiones basadas en ondas electromagnéticas, planteando alternativas que mejoren la confiabilidad del uso de este medio de transmisión. La capital del estado Mérida está ubicada sobre terrazas del valle medio del río Chama, tiene un clima promedio de 19°C , su altura es de 1.625 m.s.n.m., al pie de la Sierra Nevada con una latitud de $8^\circ 40' \text{ N}$, longitud de $71^\circ 13' \text{ W}$.

Frente a la ciudad está el pico Bolívar, cuya altura es de 5.007 m.s.n.m permaneciendo nevado los 365 días del año; junto a este los picos gemelos, Humboldt y Bompland con una altura de 4.942 m.s.n.m., 4.882 m.s.n.m., respectivamente, junto con el pico La Concha con 4.942 m.s.n.m.



METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se sustenta en cuatro fases metodológicas, las cuales se detallan los procedimientos requeridos para su realización como lo son: recopilación de los datos de lluvia; aplicación y análisis del método de pronóstico; cálculo de la radioatenuación troposférica en distintos ángulos de elevación y por último el análisis de los resultados obtenidos.

Fase I: Recopilación de los datos de lluvia

En esta primera fase se obtienen o recolectan los niveles de lluvia de la zona a través del Departamento de Climatología de la Aviación Bolivariana de Venezuela, los cuales vienen dados en mm/mes y estructurados para su posterior procesamiento del pronóstico.

Fase II: Aplicación y análisis del método de pronóstico

La segunda fase detalla los resultados obtenidos con el método de pronóstico ARIMA, mostrando mediante tablas y gráficos los valores obtenidos a través del SPSS versión 15, el cual permitió modelar la data de lluvia recolectada en base a los coeficientes óptimos de predicción. Se obtuvo de esta manera el pronóstico adecuado a la serie de datos históricos de la zona, para los años 2011-2014.

Fase III: Ángulo de elevación para la radioatenuación troposférica

La tercera fase, consiste en el cálculo de los niveles de radioatenuación mediante la recomendación UIT-R P.838-3, a partir de las intensidades lluvia de los 4 años pronosticados llevados a mm/hr. El cálculo se realiza utilizando la aplicación de cómputo MatLab para obtener los niveles de radioatenuación a diferentes frecuencias y ángulos de elevación, los resultados estarán expresados anualmente en tablas y gráficos.

Posteriormente, se seleccionará la media del pronóstico más significativa, para representar gráficamente el mes más significativo con respecto al ángulo de elevación y luego determinar la incidencia estadística entre estos, obteniendo así el mes con mayor radioatenuación para los años pronosticados, para luego determinar mediante la aplicación Origin versión 6.1, la tendencia de los ángulos de elevación con respecto a las frecuencias, el ángulo de elevación con respecto al pronóstico y por último la relación de una frecuencia en específico con respecto a los ángulos de elevación evaluados, con la finalidad de determinar una posible tendencia.

Fase IV: Análisis de los resultados

En esta última fase, se analizan las gráficas y tablas obtenidas mediante una aplicación de cómputo, junto con el análisis estadístico para poder determinar la significancia y la tendencia de los resultados según la incidencia del ángulo con respecto a las frecuencias del pronóstico, evaluando así la validez de la norma UIT-R P.838-3.



BASES TEÓRICAS

ÁNGULO DE ELEVACIÓN

Según el investigador, es la abertura formada por dos líneas que parten de un mismo punto donde hay un ángulo complementario de incidencia o la unión de ondas entre sí, o cuando un objeto está por encima de la horizontal que es cuando el ángulo está formado por una línea horizontal y una línea visual hacia el objeto.

RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

La estimación de la radioatenuación troposférica estipulada por la ITU bajo la recomendación 838-3, determina que es necesario calcular el parámetro de atenuación a partir de datos existentes de lluvia, a lo cual recomienda un proceso a seguir determinado por las siguientes fórmulas:

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

La atenuación específica γ_R (dB/Km) es obtenido de la intensidad de lluvia R (mm/h) usando la relación de ley-potencia anteriormente descrita. Los valores de los coeficientes k y α son determinados como funciones de frecuencias f (GHz) a partir de las siguientes ecuaciones que han sido desarrolladas a partir del ajuste de valores de las curvas de los coeficientes de la relación ley-potencia derivados de los cálculos de dispersión, donde f es frecuencia en (GHz), k es kh o kv y α es ah o av.

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

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

Es así como para el cálculo de los coeficientes antes mencionados según su polarización, k_H , K_V y α_H , α_V ; se utilizan los valores establecidos por la Recomendación ITU-R P.838-3.

METODOLOGÍA DE BOX-JENKINS

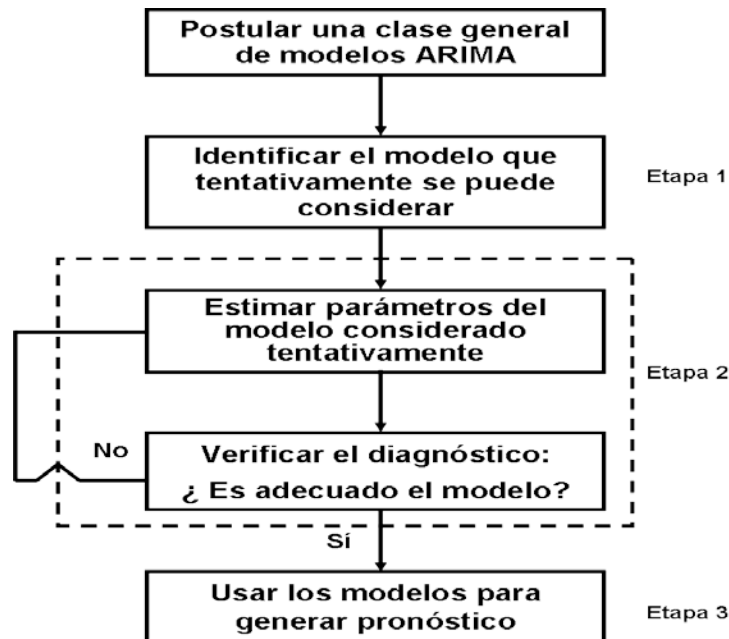
Como se observa en la figura 4, la primera etapa se postula un modelo específico que puede considerarse tentativamente como el modelo de predicción más apropiado para la situación. La segunda etapa consiste en ajustar dicho modelo a los datos históricos disponibles y en realizar una verificación para determinar si es adecuado. Si resulta ser un modelo no adecuado se regresa a la primera etapa y se identifica un método alternativo

de los disponibles en la clase general.

Finalmente, al aceptarse un modelo adecuado, la tercera etapa se lleva a cabo para el desarrollo de un pronóstico para algún período futuro. 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 auto correlación 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.

Figura 1. Método de predicción de Box-Jenkins



Fuente: Makridakis (2004).

RECOPIACIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA

Para el desarrollo de esta fase fue necesario realizar la consulta de páginas web como la del Servicio de Meteorología de la Aviación (www.meteorologia.mil.ve), la del sistema CLICOM (www.wmo.int), la del Ministerio del Poder Popular para la Defensa-Aviación Militar Bolivariana de Venezuela (www.aviacion.mil.ve), con el fin de buscar los datos meteorológicos de la estación Mérida ubicada en el Aeropuerto Nacional Alberto Carnevalli, que está a 1526 m.s.n.m., con latitud 8 34'56.26"N y longitud 71 9'40.27"W.



En cuadro 1 se muestran los valores de lluvia reales de la estación Mérida expresados por mes y año. Estos datos de precipitación serán utilizados posteriormente para el cálculo del pronóstico de lluvia mensual con el SPSS. Los valores de lluvia obtenidos por este organismo.

Cuadro 1. Datos mensuales de precipitación (mm). Años 1999 hasta 2010, estación meteorológica Aeropuerto de Mérida

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1999	62,00	215,00	64,00	156,00	108,00	168,00	102,00	207,00	182,00	201,00	214,00	122,00
2000	101,00	57,00	75,00	64,00	270,00	67,00	77,00	125,00	288,00	262,00	151,00	44,00
2001	1,40	4,00	79,50	141,00	146,30	78,00	151,00	51,40	154,50	317,80	127,00	89,00
2002	10,00	32,00	144,00	151,00	183,00	204,00	36,00	59,00	108,00	160,00	60,00	30,00
2003	3,90	7,20	65,70	181,80	139,00	225,10	110,50	133,00	370,00	478,00	234,00	152,00
2004	44,30	4,90	34,80	285,00	335,00	13,90	147,60	103,10	333,00	240,20	259,50	83,00
2005	109,40	70,40	82,90	295,00	328,00	290,80	53,70	45,30	152,00	347,00	235,70	41,00
2006	68,90	7,10	219,00	363,50	253,90	88,00	99,80	167,30	139,20	227,70	236,00	89,50
2007	49,20	35,00	105,70	208,00	221,90	99,50	94,70	232,90	196,20	333,90	108,00	76,80
2008	14,50	61,70	15,80	146,20	255,40	169,00	219,20	185,70	235,10	183,40	356,70	49,90
2009	34,00	56,00	168,00	57,00	214,00	188,00	65,00	142,00	115,00	170,00	175,00	42,00
2010	0,01	20,00	62,00	247,00	260,00	89,00	97,00	147,00	307,00	190,00	165,00	173,00

Fuente: Servicio de Meteorología de la aviación (2011).

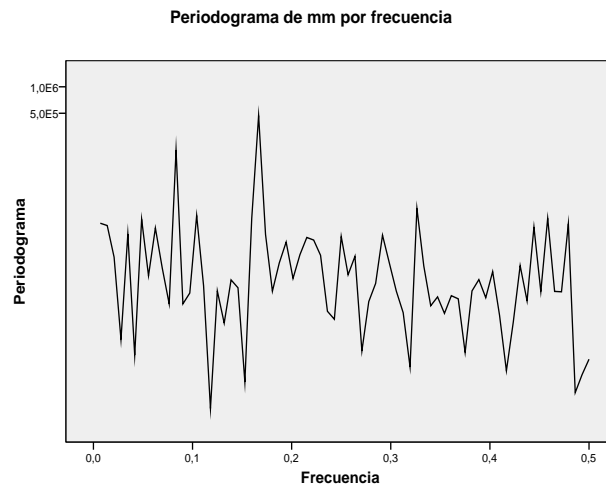
APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE PRONÓSTICO

En esta fase de la investigación se utilizaron métodos estadísticos como series de tiempo que permiten pronosticar la intensidad de las lluvias, para luego calcular el parámetro de radioatenuación troposférica de los próximos meses o años.

Se indica el análisis del método de pronóstico ARIMA, utilizando para ello los datos mensuales de lluvia recopilados durante los años en estudio, se utilizó el software estadístico SPSS, versión 15 como herramienta para el análisis estadístico y predictivo, desarrollado bajo Windows, donde se almacenaron y analizaron los datos obtenidos de precipitación de la ciudad de Mérida.

En primer caso, 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 qué frecuencia ocurre cada ciclo de lluvia y así determinar cuál es el pico más significativo de la serie. Como se muestra en el figura 1, se observa el pico de frecuencia en un ciclo estacionario en la serie que es igual a 12 meses para la ciudad de Mérida.

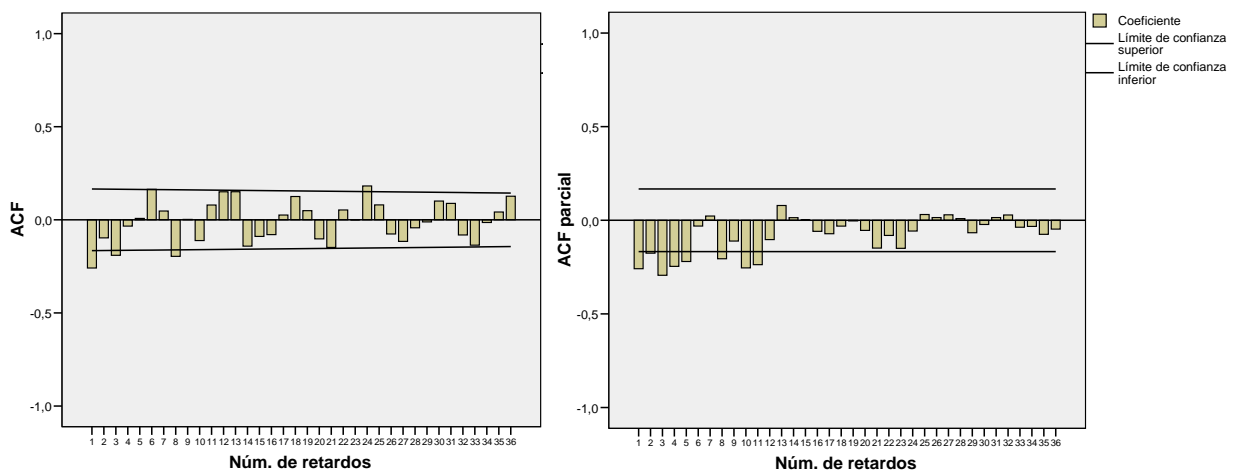
Figura 2. Diagrama espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real



Fuente: elaboración propia.

Al establecer la periodicidad, se procede a las gráficas de autocorrelación simple y parciales para determinar el modelo ARIMA específico para el cálculo del pronóstico, luego de realizado varias pruebas. Finalmente, al realizar una gráfica de autocorrelación con Diferenciar en orden 1 y Diferenciar en ciclo en orden 1 se logra alcanzar un patrón de autocorrelación válido tal como se aprecia en la figura 3.

Figura 3. Autocorrelación simple y parcial aplicando diferenciar en orden 1 y diferenciar en ciclo en orden 1



Fuente: elaboración propia.

La figura 2, muestra el decrecimiento exponencial o tendencia a cero en los retardos, lo que conlleva al modelo promedio móvil de primero orden, es decir, MA (1) y MA (1), el cual también se representa MAMA (1,1).

Con el modelo definido, se realiza un número de ensayos para obtener el mejor conjunto de parámetros que represente el pronóstico con los datos de lluvia real. Los mejores parámetros para implementar el método de pronóstico de ARIMA, según Hanke (2006), es (1, 1, 0) (1, 1, 0), ya que contiene el menor error residual. A continuación, en el cuadro 2, se presentan los coeficientes óptimos MA (1) y MA (1).

Cuadro 2. Coeficientes Óptimos MA (1) y MA (1)

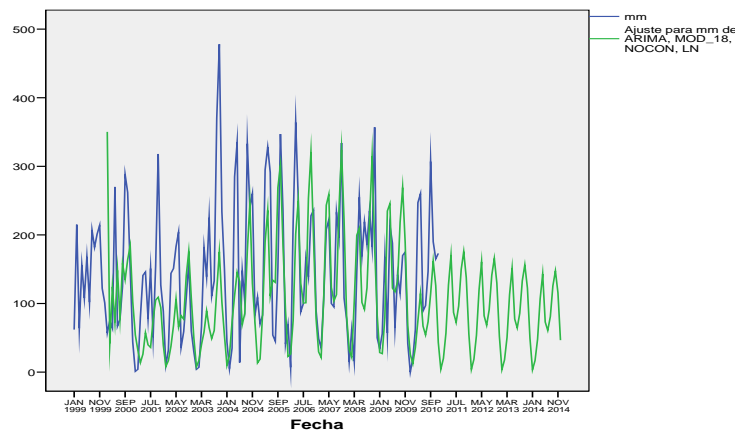
Estimaciones de los parámetros

		Estimaciones	Error típico	t	Sig. aprox.
Retardos no estacionales	MA1	,926	,040	23,323	,000
Retardos estacionales	Seasonal MA1	,851	,201	4,233	,000

Fuente: elaboración propia.

Para visualizar mejor el resultado emanado por el SPSS, a continuación se presenta la figura 3 que representa los valores de lluvia real y pronosticada desde el año 2011 hasta el año 2014. La línea negra representa la lluvia real y la línea gris la pronosticada.

Figura 4. Valores de lluvia real y pronosticada aplicando el Método ARIMA



Fuente: elaboración propia.

ÁNGULO DE ELEVACIÓN PARA LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

Esta fase de la investigación se presenta en base a los resultados obtenidos del pronóstico de radioatenuación troposférica por lluvia, desde los años 2011 al 2014. El cálculo se realizó con la aplicación de cómputo MATLAB utilizando la recomendación de la International Telecommunication Union ITU-R P.838-3 (2005), donde se desarrolló una interfaz para el ingreso de los parámetros seguido por la representación gráfica de los



niveles de radioatenuación y la exportación de los resultados a la aplicación de cómputo Microsoft Excel.

En el proceso de cálculo, se utiliza el rango de frecuencias 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 igual a 15   y con un incremento de 15 para generar 6 escenarios y una polarización circular de la señal para todos los casos como se muestra en la Cuadro 2.

Cuadro 3. Valores de ángulos de Elevación y Polarización

ÁNGULO DE EVALUACIÓN	ÁNGULO DE POLARIZACIÓN
15	45
30	45
45	45
60	45
75	45
90	45

Fuente: elaboración propia.

Obtenidos los resultados con los diferentes ángulos y años del pronóstico, se procedió a ubicar el mes con mayor nivel de lluvia pronosticada para la ciudad de Mérida, y por ende, con mayor radioatenuación. Para ello se realizó un análisis de medias, con la ayuda del software SPSS, según se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 4. Mes pronosticado con mayor nivel de lluvia

Media	
Mes	mm
1	3,83
2	18,26
3	52,24
4	116,71
5	156,39
6	79,90
7	66,48
8	88,51
9	137,44
10	161,32
11	126,43
12	50,96

Fuente: elaboración propia.

El mes con mayor nivel de radioatenuación de los cuatro años pronosticados para los distintos ángulos de elevación evaluados es octubre, con lo cual se realizó un análisis de sus niveles de radioatenuación, intensidad de lluvia, en la frecuencia de 170 GHz, para los ángulos de 15  , 30  , 45  , 60  , 75   y 90   respectivamente, como lo muestra el cuadro 4.



Cuadro 5. Radioatenuación Troposférica año 2011 - 2014

Año	Angulo	Frecuencia	Mes	Radioatenuación db/km	Intensidad de Lluvia mm/hr
2011	15	170	10	0,64135044	0,23611
2011	30	170	10	0,64060405	0,23611
2011	45	170	10	0,64094417	0,23611
2011	60	170	10	0,64179563	0,23611
2011	75	170	10	0,64171809	0,23611
2011	90	170	10	0,64084275	0,23611
2012	15	170	10	0,6178334	0,22276
2012	30	170	10	0,61709978	0,22276
2012	45	170	10	0,61743408	0,22276
2012	60	170	10	0,61827099	0,22276
2012	75	170	10	0,61819477	0,22276
2012	90	170	10	0,61733439	0,22276
2013	15	170	10	0,59517869	0,21016
2013	30	170	10	0,5944579	0,21016
2013	45	170	10	0,59478635	0,21016
2013	60	170	10	0,59560863	0,21016
2013	75	170	10	0,59553375	0,21016
2013	90	170	10	0,59468841	0,21016
2014	15	170	10	0,57335468	0,19827
2014	30	170	10	0,57264676	0,19827
2014	45	170	10	0,57296935	0,19827
2014	60	170	10	0,57377694	0,19827
2014	75	170	10	0,5737034	0,19827
2014	90	170	10	0,57287315	0,19827

Fuente: elaboración propia.

En el cuadro 4 se observa que los mayores niveles de radioatenuación del año 2011 se presentan en el mes de octubre, en la frecuencia de 170 GHz, con 0,23611 mm/hr de lluvia pronosticada. De acuerdo al ángulo de elevación la menor radioatenuación está ubicada en 30° y la mayor se encuentra con un ángulo de 60°. Existiendo una diferencia máxima entre ellas de 0,0012 dB/km, la cual es poco significativa.

En el año 2012 con 0,22276 mm/hr de lluvia pronosticada, la menor radioatenuación está ubicada en el ángulo de elevación de 30° y la mayor con un ángulo de 60°. Existiendo una diferencia máxima entre ellas de 0,0012 dB/km, ubicada en el mes de octubre. Para el caso del año 2013 con un pronóstico de lluvia de 0,21016 mm/hr, en el mes de octubre, con un Δ_{max} para los ángulos de elevación de 30° y 60° en 0,0011 dB/Km. En el mes de octubre del año 2014, los valores mínimos y máximos, con ángulos de elevación de 30° y 60° respectivamente el Δ_{max} fue de 0,0011 dB/Km.

Según los análisis anteriores la incidencia del ángulo de elevación poseen un Δ_{max} muy bajo ya que se tomaron en cuenta los cuatro años pronosticados (2011- 2014) para cada uno de los ángulos de elevación evaluados. Esto requiere un análisis estadístico para determinar la significancia de esta diferencia.

En la determinación de la significancia de los datos pronosticados se realizó una prueba de los Efectos Inter. Sujetos, cuyos resultados mostraron que no existe significancia entre las variables dependientes (ángulo – frecuencia) y ángulo, únicamente en la frecuencia. Según cuadro 6.

Cuadro 6. Prueba de los efectos Inter. Sujetos

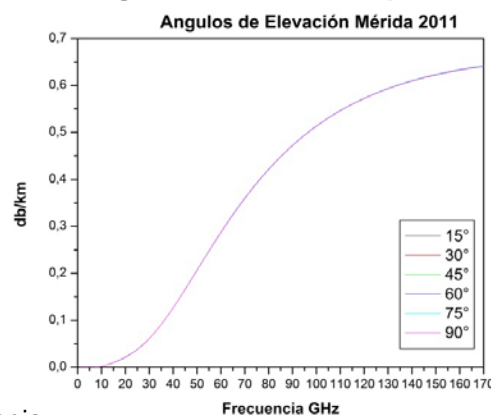
Fuente	Suma de cuadrados tipo III	GI	Media Cuadrática	F	Significación
Modelo Corregido	192,104 ^a	1019	,189	429,366	,000
Intersección	515,139	1	515,139	1173247,423	,000
Angulo	,000	5	5,503E-5	0,125	,987
Frecuencia	192,104	169	1,137	2588,895	,000
Ángulo * Frecuencia	7,120E-5	845	8,426E-8	0,000	1,000
Error	1,344	3060	,000		
Total	708,587	4080			
Tota Corregido	193,448	4079			

Fuente: elaboración propia.

La confirmación de lo anterior se obtiene al realizar una comparación múltiple de los datos pronosticados. Mediante una comparación múltiple post-hoc para las medias observadas por medio del método Duncan, donde se concluye que no existe diferencia entre los grupos ni Inter Grupos, solo se pudo constatar que existe menos radioatenuación a baja frecuencia y esta va aumentando conforme se incremente la misma.

Para establecer alguna tendencia con respecto a los ángulos de elevación con los datos pronosticados se procedió con la ayuda de la aplicación Origin, a analizar gráficamente los resultados que nos permitirán analizar dichos comportamientos. Considerando la figura 4, correspondiente al año 2011, donde se muestran los seis ángulos en estudio obtenidos a partir de los datos pronosticados, se puede constatar que el comportamiento no sufre una variación significativa para los distintos ángulos.

Figura 5. Ángulos de elevación pronosticados

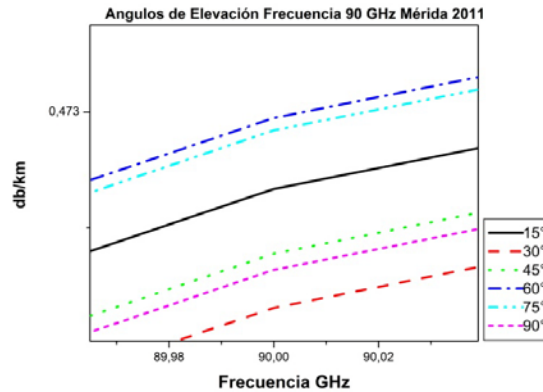


Fuente: elaboración propia.

Con el objeto de determinar la posibilidad de solapamiento de los datos, se procede a graficar en un rango ampliado, lo que permitió evaluar con mayor detalle el comportamiento de los datos en un punto dado. Se graficó entre los rangos de 89,98 y

90,02 GHz de frecuencia, con 0,473 dB/km de lluvia, con el fin de observar cual es el comportamiento de la onda con respecto a la variación del ángulo. El análisis de la figura 5 lleva a determinar que no existe una variación significativa en el comportamiento, de la serie en los distintos ángulos de elevación evaluados.

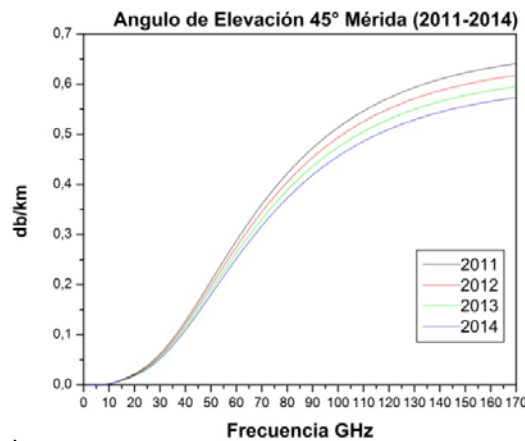
Figura 6. Ángulos de elevación en frecuencia de 90GHz Mérida 2011



Fuente: elaboración propia.

Se aplica un procedimiento similar donde graficamos un ángulo de elevación en específico para evaluar su tendencia en el período pronosticado, escogiendo como ángulo el de 45°, para los años pronosticados 2011-2014, con el fin de verificar la incidencia del ángulo con respecto al pronóstico, como si muestra en la figura 6. De igual forma al evaluar un ángulo de elevación de 45° en todos los años pronosticados, se puede definir que para la serie de datos de la ciudad de Mérida, no existe una variación significativa, debido a que la única diferencia entre las tendencias se debe al margen de error del modelo de pronóstico más alejado de la data histórica.

Figura 7. Ángulos de elevación 45° Mérida 2011-2014



Fuente: elaboración propia.



DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los diversos fenómenos atmosféricos pueden alterar el comportamiento estable de los enlaces de telecomunicaciones basadas en ondas electromagnéticas y ángulos de elevación. Esto se debe principalmente a la disipación de energía por las precipitaciones en forma de lluvia.

Luego de aplicar el método ARIMA es importante señalar que dicho método de pronóstico se empleó para estimar la lluvia mensual de los períodos posteriores, se basó en el comportamiento de la serie de lluvia real recolectada, ratificando, lo expuesto por Peña (2005, p. 96): "la modelación ARIMA es uno de los métodos modernos de predicción más sofisticados para series temporales con estacionalidad. Utiliza variaciones y regresiones de datos estadísticos con el fin de encontrar patrones para una predicción hacia el futuro". Seguidamente se compararon los valores de lluvia pronosticados con los datos reales, presentando similitud, lo que indica que el pronóstico se ajusta a la realidad.

En el cálculo de la radioatenuación troposférica pronosticada en distintos ángulos de elevación para la ciudad de Mérida, se evidencia que los valores de radioatenuación dependen directamente de la intensidad de lluvia, a mayor intensidad de lluvia mayor radioatenuación tal como lo afirma Amaya (2006, p. 47) "se pudo determinar que los diferentes valores de atenuación en las diferentes frecuencias de transmisión, dependen directamente de los valores de intensidad de lluvia", caso contrario que no incide el ángulo de elevación.

Dicha situación se cumple según los cálculos realizados para obtener el pronóstico, los que muestran que durante los cuatro años pronosticados para la ciudad de Mérida se presenta una tendencia similar en todos los años, es decir, que se aprecia una media de radioatenuación de aproximadamente 0,60 dB/km, para el mes de octubre. Esto se debe a que es el mes con mayor intensidad de lluvia, lo que da cumplimiento a la teoría antes mencionada.

La deducción del error del método de pronóstico ARIMA determinó que dicho método presenta un porcentaje de error medio de 0,4%, lo que define la confiabilidad de dicho método de pronóstico, tal como lo afirma Sandoval (2006, p. 85) "si el porcentaje de error está cercano a cero quiere decir que el pronóstico no está sesgado, es decir, presenta tendencia a la realidad".

Para la evaluación de la tendencia en los distintos ángulos de elevación, se realizó una serie de cálculos utilizando la ecuación (2), correspondiente a la radioatenuación de la señal por lluvia, alternando los ángulos de elevación en 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90° respectivamente, basados en la recomendación UIT-R P.838-3, se hizo el ajuste con 45°, para la polarización circular.

Los cálculos realizados mediante el software Matlab, utilizando la ecuación (2) para los ángulos de elevación evaluados y las frecuencias de señal desde 1 GHz hasta 170 GHz, dio como resultado los valores pronosticados para una frecuencia dada, por cada



ángulo de elevación, con las cuales se generaron una serie de gráficas representativas, donde se observó un comportamiento similar.

Esta similitud de la radioatenuación para todos los ángulos evaluados, conlleva a establecer la significancia de las diferencias existentes entre ellas, para determinar si existe realmente incidencia en el ángulo de elevación de la señal. Para lo cual se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos, en el mes con mayor radioatenuación, para todos los años pronosticados.

El análisis estadístico realizado donde se evaluó la diferencia Inter-grupos, con el modelo de Duncan, indicó que no existía diferencia estadística entre los ángulos de elevación y las frecuencias, si no únicamente por frecuencias, mostrando que a mayor frecuencia existía mayor radioatenuación y a menor frecuencia, existía menor radioatenuación de la señal, para todos los ángulos.

Con el fin de determinar una tendencia, se procedió a analizar las gráficas de los datos aumentando la escala en un ángulo y frecuencia específico para todos los años evaluados. Se determinó que no existía tendencia alguna, solo existe diferencia originada por la calidad del pronóstico, la cual decae a medida que se alejan de los datos históricos.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación y con las herramientas utilizadas para el análisis e interpretación de los mismos, se presentan las siguientes conclusiones:

El método de pronóstico ARIMA arrojó un porcentaje de error cercano a cero, lo que significa que el pronóstico realizado no está sesgado. Los datos de lluvia real con los pronosticados presentan similitud. Los parámetros de los coeficientes óptimos adecuados para la aplicación del método ARIMA fueron MA (1) y MA (1), los cuales alcanzaron un patrón de autocorrelación válido.

Los valores de intensidad de lluvia en la ciudad de Mérida se incrementan principalmente en el mes octubre mostrando una intensidad de precipitación de 0,20 mm/h, lo que produce una atenuación de 0,64 dB/km. El promedio de radioatenuación troposférica anual es de aproximadamente 0,60 dB/km para los cuatro años pronosticados.

Además, los análisis gráficos y estadísticos de los resultados mostraron que no existe variación de los valores pronosticados con respecto a los diversos ángulos evaluados, lo cual indica que no hay incidencia del ángulo de elevación que minimice la influencia de la radioatenuación de la señal.

Por último, la similitud de los pronósticos resultantes indica que la recomendación UIT-R P.838-3 no varía la polarización de onda ya que solo considera la polarización circular basada en la forma de la gota, sin tomar en cuenta otros factores como la polarización lineal y elíptica en determinadas frecuencias.



RECOMENDACIONES

A la IUT Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Union Telecommunication), para profundizar los estudios de la recomendación UIT-R P.838-3, con el fin de que considere otros factores además de la forma de la gota, como lo son la polarización lineal y elíptica en determinadas frecuencias.

A los Centros de Investigación, para el desarrollo amplio de los estudios de este fenómeno climatológico y su interrelación con las ondas electromagnéticas de longitudes milimétricas.

A la Aviación Militar Bolivariana de Venezuela para la publicación y difusión de los registros del promedio máximo mensual de intensidades de lluvia por hora a nivel nacional, para así facilitar e incentivar los estudios del grado de radioatenuación troposférica por causa de las precipitaciones en forma de lluvia.

A la Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín, para continuar con la investigación de las radioatenuación con respecto a las distintas modalidades de las telecomunicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaya, F. (2006). Atenuación troposférica de los radio enlaces en el estado Táchira. Tesis de Maestría para optar al título de Magíster en Telemática. Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín. Venezuela.
- Hanke, J. (2006). Pronósticos en los Negocios. Octava Edición. México. Editorial Pearson.
- International Telecommunication Union (2005). Recommendation ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Suiza. ITU
- Makridakis, S. (2004). Métodos de Pronósticos. México. Limusa.
- Peña, D. (2005). Análisis de series temporales. España. Editorial alianza.
- Sandoval, E. (2006). Métodos predictivos. Brasil. Editorial Prentice Hall.
- Servicio de Meteorología de la Aviación (2011). Datos mensuales de precipitación (mm), estación meteorológica Aeropuerto de Mérida. Documento en línea. Disponible en: http://www.meteorologia.mil.ve/index_under.php. Consulta: 07/03/2011.