

Radioatenuación Troposférica Por Lluvia Para La Costa Oriental Del Lago

(Tropospheric RadioAttenuation by Rain for the Oriental Coast of the Maracaibo Lake)

Iris Del V. Cols B. Ingeniero de Sistemas. Universidad Rafael Bellosillo Chacín. Maracaibo – Venezuela. C-electrónico: colsiris@gmail.com

Carlos Durante. Doctor en Ciencias. Universidad del Zulia.

Maracaibo – Venezuela. C-electrónico: cdurante@luz.edu.ve

Pedro V. González R. ingeniero en electrónica. Doctor en ciencias de la educación universidad del Zulia Maracaibo – Venezuela. C-electrónico: Pedrovgr@gmail.com

Jesús Cendros. Ingeniero Mecánico. Doctor en –ciencias Gerenciales. Postdoctorado en Gerencia de la Educación Superior. Director del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la URBE. jcendros@urbe.edu

RECIBIDO FEBRERO 2009 ACEPTADO MARZO 2009

RESUMEN

Esta investigación tuvo como finalidad pronosticar la radioatenuación troposférica por lluvia para la Costa Oriental del Lago entre los años 2005 hasta el 2009, utilizando los datos de lluvia para períodos anuales posteriores, derivados a partir del método de pronóstico de Promedio Móvil Integrado de Auto Regresión (ARIMA) para series temporales. Asimismo, el propósito para su desarrollo está directamente relacionado a los problemas que producen las precipitaciones en forma de lluvia en los enlaces de radiofrecuencias, donde se observa la pérdida en la potencia de la señal electromagnética a causa de la disipación de energía en forma de calor por las gotas de lluvia. El tipo de investigación es de modalidad de campo y predictiva, se considera según su diseño no experimental y longitudinal. El estudio está compuesto por 3 fases de procedimiento, basado en el análisis del método de pronóstico ARIMA para series temporales calculados con los datos de lluvia proporcionados por el Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM); a su vez, se determinó la intensidad de lluvia por hora pronosticada y por último se presentan los resultados de las radioatenuaciones para cada período mensual. Los resultados obtenidos fueron que la máxima radioatenuación troposférica e intensidad de lluvia la presenta la localidad de Bachaquero y la de menor nivel la de Cabimas.

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

ABSTRACT

This investigation had as purpose forecasting the tropospheric radioattenuation by rain for the Oriental Coast of the Maracaibo Lake between the years 2005 and 2009, derived from the forecasting method of Mobile Integrated Average of Car Regression (ARIMA) for temporary series. As well, the intention of this work is directly related to the problems produced by the rainfalls in the links of radio frequencies. It has been established that

the loss in the power of the electromagnetic signal occurs due to the dissipation of energy in the form of heat by the raindrops. This investigation is considered as predictive, longitudinal, not experimental and field-type. The study is composed by a three phases procedure, based on the analysis of the method of forecasting ARIMA for temporary series calculated with the information of rain provided by the Institute for the Control and the Conservation of the Cuenca of the Lake of Maracaibo (ICLAM). The intensity of rain in mm per hour is predicted and the results of the radioattenuation for every month are calculated. The obtained results show that the higher intensity of rain and tropospheric radio attenuation appear at Bachaquero and the lower level at Cabimas.

Keywords: forecast, radioattenuation, rain, atmosphere, troposphere, ARIMA.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la ciencia y tecnología hoy en día, está transformando las actividades políticas, sociales, económicas y recreativas, razones estas, que conllevan a prestarle especial atención como uno de los fenómenos más importante en este siglo.

Es posible que por medio de la acción de los satélites, estos permitan amplificar las señales recibidas de la tierra para retransmitirlas por medio de ondas electromagnéticas. Sin embargo, esta recepción algunas veces se ve afectada por fenómenos atmosféricos como la lluvia, reconocida como una de las principales causas que alteran la propagación de la energía electromagnética interrumpiendo la transmisión.

En busca de una solución a esta problemática, investigadores del mundo estudian el fenómeno apoyándose en modelos estadísticos de lluvia que permiten conocer el efecto de ésta en las comunicaciones. Los modelos se basan en análisis meteorológicos y climáticos de la región específica a la cual será enviada la señal electromagnética con el propósito de disminuir riesgos de falla en las transmisiones. La atenuación por lluvia depende del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, pero sobre todo de la cantidad global de agua en el aire. Debido a la dificultad de medir los primeros parámetros la atenuación se expresa en función de la intensidad de lluvia medida en mm/h o litros/hora.

La atenuación se produce por la disipación de efecto Joule debido al comportamiento del agua como dieléctrico con pérdidas, y a la dispersión de la energía en direcciones diferentes a la de propagación que producen las propias gotas. Esta atenuación varía con la frecuencia hasta unos 100 GHz y el Sector de Normalización de las Radiocomunicaciones (UIT-R) proporciona gráficas de atenuación en dB/km para distintos niveles de lluvia.

Asimismo, en Venezuela específicamente en la Costa Oriental del Lago propiamente en las localidades de Cabimas, Lagunillas, Bachaquero y Tía Juana, el clima es caluroso en todas partes de dichas zonas con temperaturas superiores a 30 °C todo el año, por ser regiones petroleras debido a la combustión de gas natural, se puede decir que los cambios climáticos son producto del calentamiento global y esto ha originado que en estas localidades se presenten alteraciones en los períodos de sequía y lluvia.

Por todo lo antes expuesto, se puede decir que en la actualidad no se disponen de

los coeficientes de radioatenuación para estas localidades, ameritando un estudio para la determinación de la radioatenuación troposférica por lluvia. En esta investigación, el procedimiento llevado a cabo comienza con la recopilación de los datos de lluvia en mm/hr de 10 años proporcionados por el Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM), siguiendo con la aplicación y análisis del método de pronóstico ARIMA. Finalmente, se realizan los pronósticos de radioatenuaciones para 5 años siguientes, comenzando desde el año 2005.

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

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. Esta absorción molecular, 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.

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, es decir, 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 consideramos 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.

Por último, en trayectos de propagación de señales inclinadas o trayectos tierra-espacio, los valores de radioatenuación específica difieren a los 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.

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:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (6)$$

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 períodos anteriores. Por último, e_t es el error, o término residual, que representa las perturbaciones aleatorias que no pueden ser explicadas por el modelo.

En el mismo orden de ideas, la ecuación 6 se llama autoregresivo porque se asemeja a la ecuación de regresión ($Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + e$). La única 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 períodos.

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

$$Y_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (7)$$

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 6 y 7, 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:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t - \phi_1 e_{t-1} - \phi_2 e_{t-2} - \dots - \phi_q e_{t-q} \quad (8)$$

Para modelos con datos estacionales, las ecuaciones 6, 7 y 8 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:

$$Y_t = \phi_{12} Y_{t-12} + e_t \quad (9)$$

Para un modelo MA estacional mensual tendría la forma siguiente:

$$Y_t = e_t - \theta_{12} e_{t-12} \quad (10)$$

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

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

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 al método de pronóstico ARIMA aplicados para el posterior cálculo de la radioatenuación troposférica por lluvia para la Costa Oriental del Lago.

RECOPILACIÓN DE LOS DATOS DE LLUVIA

En esta fase se conforma la recopilación de los registros de lluvia del Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM), Este instituto posee los registros de las precipitaciones de lluvia medidas en mm de la Costa Oriental del Lago, específicamente de las zonas de Cabimas, Lagunillas, Tía Juana y Bachaquero comenzando desde el año 1994 hasta el 2004, de los cuales han sido revisados por el ente mediante observaciones simultáneas, siendo de vital importancia ya que se logra un aumento en la exactitud de los resultados para el pronóstico de la lluvia.

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 se detallan en los cuadros 6, 7, 8 y 9.

Cuadro 6. Muestra de medidas de lluvia mensuales de Cabimas

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1994	0.00	0.00	3.80	20.30	55.50	33.00	100.20	75.20	95.60	122.50	107.80	8.60
1995	22.60	1.70	24.40	11.00	104.50	159.00	89.10	59.80	124.00	160.40	11.60	0.00
1996	0.00	3.70	6.20	17.60	67.50	59.00	45.60	145.20	124.60	37.70	79.40	38.10
1997	9.10	1.30	0.00	4.80	38.00	41.10	51.80	41.30	115.10	63.00	32.60	0.00
1998	0.00	0.20	6.00	39.20	81.30	54.00	41.30	88.70	167.90	105.20	48.70	61.30
1999	0.20	0.70	4.20	61.50	65.70	21.30	111.50	84.30	50.80	42.30	21.40	31.20
2000	20.60	9.80	1.40	31.80	97.80	63.70	61.90	74.00	105.10	105.20	47.50	16.60
2001	5.70	3.20	7.00	37.00	97.80	63.70	61.90	74.00	105.10	105.20	47.50	16.60
2002	5.70	3.20	7.00	37.00	97.80	63.70	61.90	74.00	105.10	105.20	47.50	16.60
2003	0.00	0.00	0.00	12.30	29.80	39.40	21.30	29.20	44.00	110.10	30.30	14.90
2004	7.30	0.00	0.90	25.50	93.70	16.60	46.90	62.30	106.30	107.00	78.70	3.20

Cuadro 7. Muestra de medidas de lluvia mensuales de Lagunillas

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1994	0.00	1.50	19.60	108.50	30.60	40.20	153.20	82.70	275.10	176.40	73.40	19.70
AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1995	0.80	0.30	5.40	21.50	80.60	61.60	85.60	114.20	64.20	131.50	0.60	0.00
1996	0.40	1.10	0.00	2.90	62.50	25.90	24.00	68.40	63.70	68.70	49.50	9.60
1997	0.10	3.50	9.10	0.70	141.80	81.60	113.40	60.90	124.20	93.00	126.10	0.00
1998	0.00	3.20	12.70	63.00	165.00	35.20	80.90	95.40	143.80	71.50	27.00	80.50
1999	3.50	15.50	4.40	109.20	102.20	44.50	97.20	177.40	78.40	98.70	77.40	92.00
2000	47.50	5.20	0.30	38.40	117.20	11.00	79.80	107.90	124.80	107.30	58.70	33.40
2001	7.50	4.20	7.40	49.10	107.40	39.50	85.50	107.90	124.80	107.30	58.70	33.40
2002	7.50	4.20	7.40	49.10	107.40	39.50	85.50	107.90	124.80	107.30	58.70	33.40
2003	7.50	4.20	7.40	49.10	107.40	39.50	85.50	107.90	124.80	107.30	58.70	33.40
2004	7.50	4.24	7.40	49.00	158.00	15.60	49.90	156.30	124.10	110.70	58.70	33.40

Cuadro 8. Muestra de medidas de lluvia mensuales de Tía Juana

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1994	0.00	0.00	15.50	42.20	41.70	23.10	110.60	74.00	180.00	108.20	41.40	13.70
1995	8.90	0.00	5.70	20.70	56.90	62.50	154.40	50.60	86.90	191.90	40.30	0.00
1996	1.20	7.70	23.30	15.10	66.10	65.80	57.40	222.00	101.10	41.00	59.30	11.40
1997	5.50	3.10	0.00	9.20	199.30	85.00	66.70	9.90	66.80	52.50	60.70	0.00
1998	0.00	7.70	4.80	52.50	136.40	148.20	114.20	62.40	72.80	58.90	15.30	131.80
1999	2.20	44.50	35.00	81.30	108.40	35.40	142.10	171.70	61.10	94.20	25.40	58.60
2000	2.60	8.90	12.80	38.20	126.00	63.40	97.60	101.60	101.80	89.70	40.30	35.80
2001	2.60	8.90	12.80	38.20	126.00	63.40	97.60	101.60	101.80	89.70	40.30	35.80
2002	2.60	8.90	12.80	38.20	126.00	63.40	97.60	101.60	101.80	89.70	40.30	35.80
2003	2.60	8.90	12.80	38.20	126.00	63.40	97.60	101.60	101.80	89.70	40.30	35.80
2004	1.70	0.00	5.00	41.10	273.80	23.90	39.60	121.60	143.50	94.20	33.90	35.40

Cuadro 9. Muestra de medidas de lluvia mensuales de Bachaquero

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1994	0.20	0.80	8.50	95.60	109.80	49.00	97.80	76.10	266.70	56.10	80.70	21.90
1995	0.00	0.00	73.00	129.60	188.80	85.60	94.30	172.30	143.70	202.40	22.50	0.00
1996	27.40	66.40	132.70	37.20	92.80	67.00	28.70	53.00	83.70	88.70	124.50	54.20
1997	2.80	7.70	24.60	5.30	130.10	96.10	75.40	99.30	100.40	123.60	98.80	3.80
1998	0.30	38.10	23.60	369.20	112.00	52.00	97.90	35.20	125.80	114.10	23.00	53.20
1999	4.20	21.30	4.20	61.30	44.20	79.80	100.20	47.20	88.40	110.80	105.50	37.00
2000	5.60	19.50	38.60	63.10	125.80	64.50	80.60	80.80	134.90	115.80	75.70	28.30
2001	5.60	19.50	38.60	63.10	125.80	64.50	80.60	80.80	134.90	115.80	75.70	28.30
2002	5.60	19.50	38.60	63.10	125.80	64.50	80.60	80.80	134.90	115.80	75.70	28.30
2003	5.60	19.50	38.60	63.10	125.80	64.50	80.60	80.80	134.90	115.80	75.70	28.30
2004	5.00	3.50	4.40	73.40	202.70	22.60	70.40	80.80	134.90	115.80	75.70	28.30

APLICACIÓN Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE PRONÓSTICO

En esta fase de la investigación, se comienza con el análisis de series de tiempo utilizando las observaciones mensuales de lluvia recopiladas durante los años 1994 hasta el 2004. 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 2009. Cada paso será realizado para las zonas en estudio de la Costa Oriental del Lago.

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 qué frecuencia ocurre cada ciclo de lluvia. Como se muestran en las figuras 1, 2, 3 y 4 se puede observar un pico en la frecuencia 0.08, la cual corresponde al inverso del

período, es decir $1/0.08 = 12$ meses. Con este resultado se deduce un ciclo estacionario en la serie.

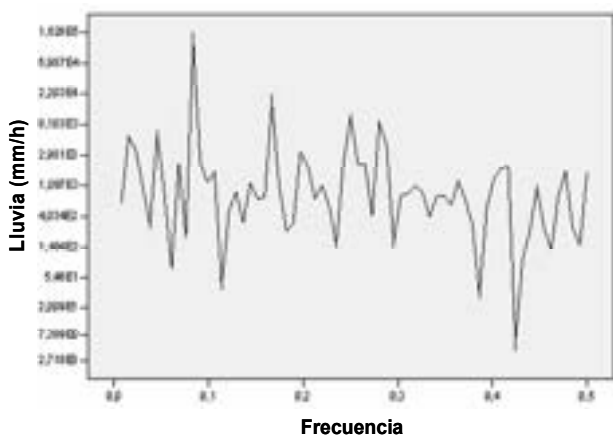


Figura 1. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real. (Localidad: Cabimas). Fuente: SPSS, Cols (2008)

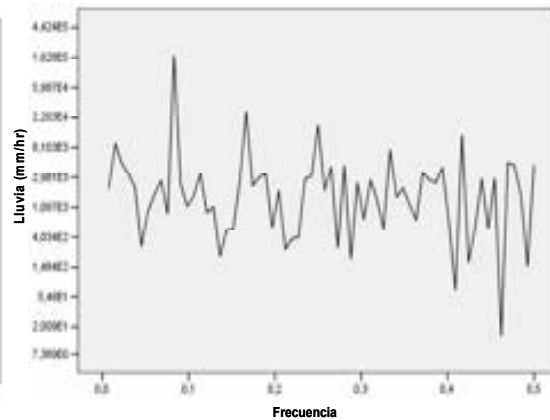


Figura 2. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real. (Lagunillas). Fuente: SPSS, Cols (2008).

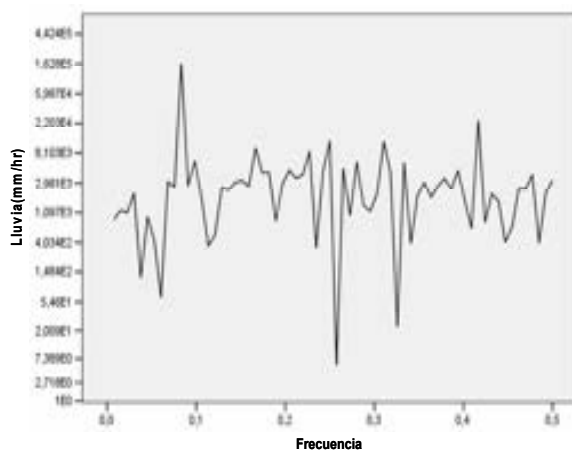
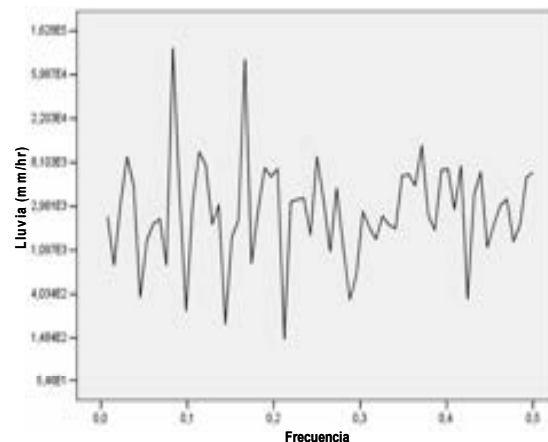


Figura 3. Diagrama Espectral para determinar la estacionalidad de la serie de datos de lluvia real. (Tía Juana). Fuente: SPSS, Cols, (2008).



Ahora, se recurren a las gráficas que representan los valores de lluvia real y pronosticada desde el año 1994 hasta el año 2009, calculadas con el método de ARIMA, observándose que la lluvia pronosticada es semejante al comportamiento anual de lluvia real. Para visualizar mejor los resultados obtenidos, se muestran las figuras 5, 6, 7 y 8.

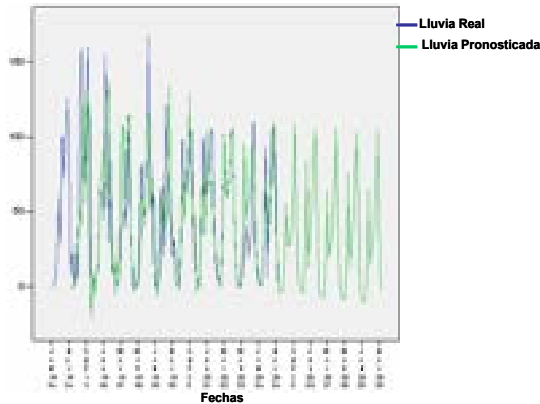


Figura 5. Valores de Lluvia real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA. (Localidad: Cabimas). Fuente: SPSS, Cols (2008).

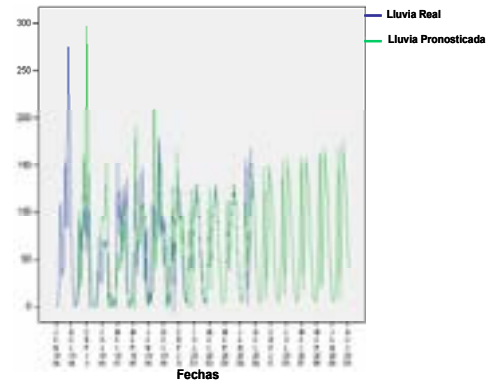


Figura 6. Valores de Lluvia real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA. (Localidad: Lagunillas). Fuente: SPSS, Cols (2008).

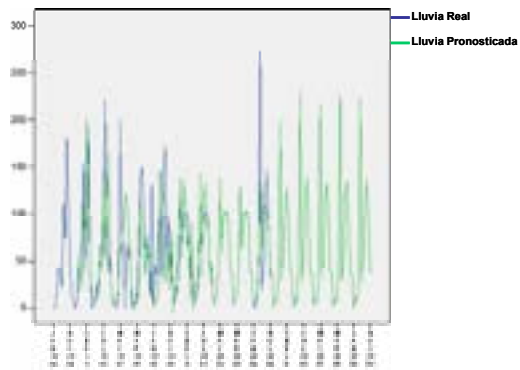


Figura 7. Valores de Lluvia real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA. (Localidad: Tía Juana). Fuente: SPSS, Cols (2008).

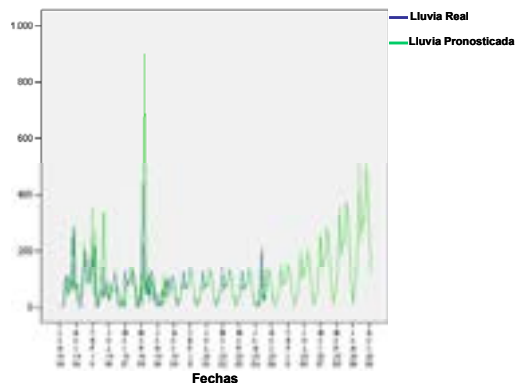


Figura 8. Valores de Lluvia real y pronosticada aplicando el Método de ARIMA. (Localidad: Bachaquero). Fuente: SPSS, Cols (2008).

DETERMINACIÓN DE LA RADIOATENUACIÓN TROPOSFÉRICA

En esta última fase de la investigación, se presentan en base a los resultados obtenidos del pronóstico desde los años 2005 hasta el 2009, los valores específicos de radioatenuación troposférica por lluvia.

El cálculo se realizó con la aplicación de cómputo MATLAB, que permite obtener una gráfica para el parámetro de atenuación en función de la frecuencia y de la cantidad de lluvia en la zona.

En el mismo orden de ideas, para realizar el cálculo se utiliza el rango de frecuencias comenzando desde 1 GHz hasta los 100 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 los gráficos con la radioatenuación troposférica por lluvia mensual estimada para la Costa Oriental del Lago, específicamente las zonas de Cabimas, Lagunillas, Tía Juana y Bachaquero para los años 2005 hasta el 2009.

Como se observa en la figura 9, la máxima radioatenuación registrada para el año 2005 fue de 0,46 dB/Km correspondiente al mes de octubre, con una intensidad igual a 0,14 mm/hr en la frecuencia desde 1 GHz hasta los 170 GHz. Las demás radioatenuaciones significativas registradas pertenecen a los meses de mayo y

septiembre, con intensidades de lluvia iguales a 0.06 mm/hr y 0,08 mm/hr respectivamente.

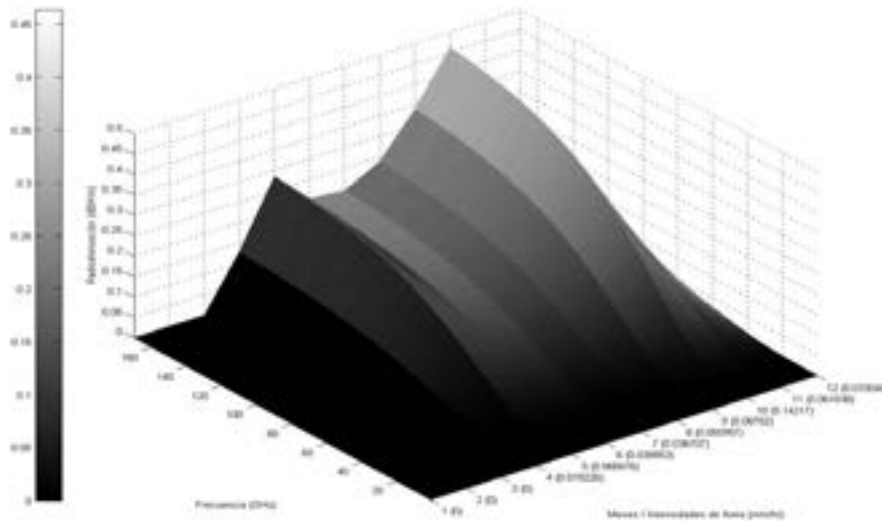


Figura 9. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2005. (Cabimas) Fuente: MATLAB, Cols (2008).

Asimismo, las radioatenuaciones más leves en el orden de la misma frecuencia registradas para el año 2005 pertenecen a los meses de enero, febrero y marzo con una radioatenuación igual a 0 dB/Km respectivamente para los tres meses.

Finalmente, en la figura 10, se presenta la radioatenuación para el último año pronosticado (2009) de la zona de Cabimas, donde se observa que para los meses de septiembre y octubre se registraran intensidades de lluvia de 0,09 mm/hr y 0,13 mm/hr y con radioatenuaciones de 0,35 dB/Km y 0,43 mm/hr.

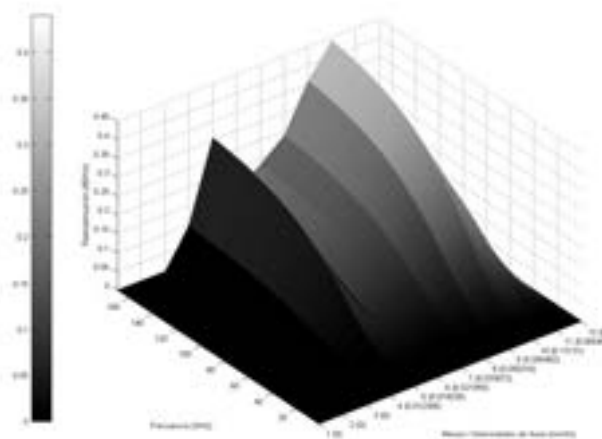


Figura 10. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2009. (Cabimas) Fuente: MATLAB, Cols (2008).

La radioatenuación más leve que se registrara será para los meses de enero a marzo con 0 dB/Km.

En el mismo orden de ideas, se presenta los gráficos con la radioatenuación troposférica por lluvia mensual estimada para la zona de Lagunillas. Comenzando que para el año 2005, como se ve en la figura 11, se puede decir que la máxima intensidad de lluvia registrada fue para los meses de mayo y septiembre, con una radioatenuación de 0,55 dB/Km y 0,52 dB/Km en el orden de los 164 GHz respectivamente. A su vez, le siguen los meses de octubre y noviembre con una radioatenuación de 0,47 dB/Km y 0,32 dB/Km respectivamente con intensidades de lluvia iguales a 0,14 mm/hr y 0,08 mm/hr.

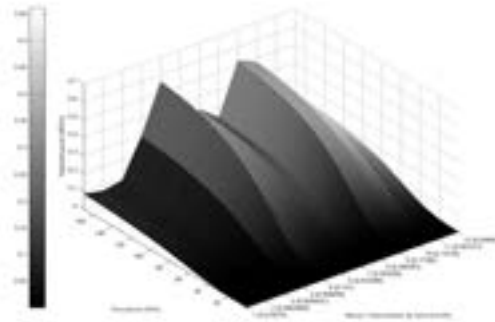


Figura 11. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2005. (Lagunillas) Fuente: MATLAB, Cols (2008).

Asimismo, las radioatenuaciones más leves en el orden de los 170 GHz registradas para el año 2005 pertenecen a los meses de febrero y marzo con una radioatenuación igual a 0,06 dB/Km y 0,08 dB/Km respectivamente con intensidades de lluvia iguales a 0,006 mm/hr y 0,009 mm/hr.

Por otra parte, tenemos el último año 2009 de radioatenuación troposférica de la localidad de Lagunillas, observándose en la figura 12, los meses con valores más altos como mayo y agosto con intensidades de lluvia de 0,195 mm/hr y 0,194 mm/hr similar a la del año 2007. Y los meses más leves febrero y marzo con radioatenuaciones de 0,06 dB/Km y 0,08 dB/Km igual a la del año anteriormente mencionado.

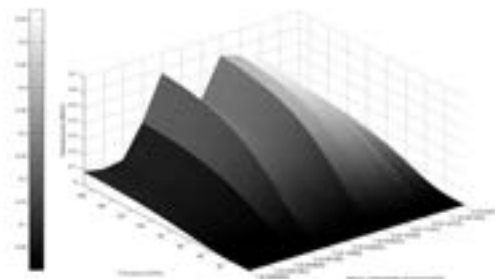


Figura 12. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2009. (Lagunillas) Fuente: MATLAB, Cols (2008).

A continuación, se muestra los gráficos con la radioatenuación troposférica por lluvia mensual estimada para la localidad de Tía Juana, como se observa en la figura 13, la máxima radioatenuación registrada para el año 2005 fue para los meses de mayo y septiembre, con valores de 0,69 dB/Km y 0,52 dB/Km, para una intensidad igual a 0,26 mm/hr y 0,17 mm/hr en la frecuencia de los 170 GHz.

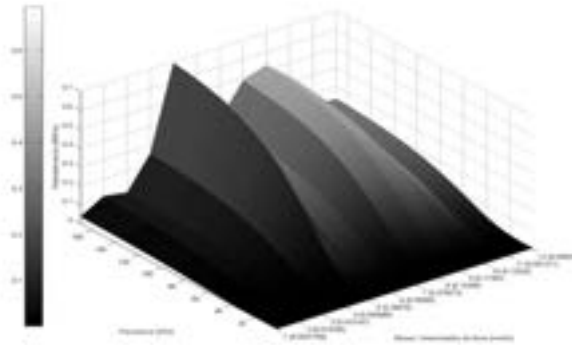


Figura 13. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2005. (Tía Juana) Fuente: MATLAB, Cols (2008).

Para las menores radioatenuaciones en el mismo orden de los 170 GHz, se registran en los meses de enero y marzo intensidades de lluvia estimados de 0,002 mm/hr y 0,010 mm/hr respectivamente, con radioatenuaciones de 0,03 dB/Km y 0,08 dB/Km.

Por último, tenemos el año 2009 (ver figura 14) se puede decir que la máxima intensidad de lluvia que se registrara será para los meses de mayo y septiembre, con una radioatenuación de 0,750 dB/Km y 0,550 dB/Km en el orden de los 170 GHz respectivamente. A su vez, le siguen los meses de agosto y octubre con una radioatenuación de 0,500 dB/Km y 0,435 dB/Km respectivamente, con intensidades de lluvia iguales a 0,16 mm/hr y 0,12 mm/hr.

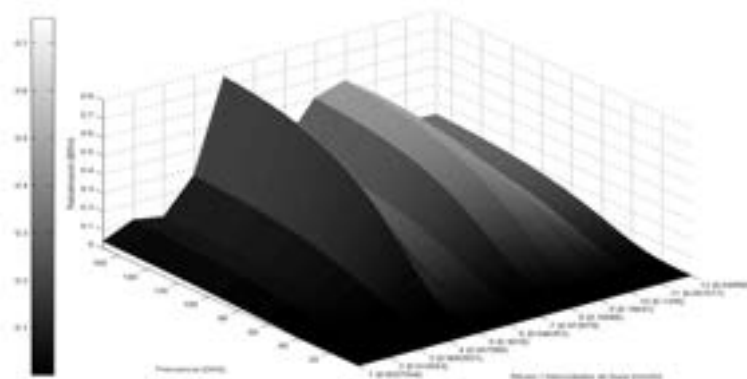


Figura 14. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2009. (Tía Juana). Fuente: MATLAB, Cols (2008).

Y los meses más leves serán enero y marzo con radioatenuaciones de 0,03 dB/Km y 0,08 dB/Km.

Ya para finalizar, esta Fase III llamada determinación de la radioatenuación troposférica, se mostrará los resultados obtenidos de la zona de Bachaquero, comenzando que para el año 2005 (ver figura 15), se puede decir que la máxima intensidad de lluvia registrada fue para los meses de mayo y septiembre, con una radioatenuación de 0,554 dB/Km y 0,597 dB/Km en el orden de los 170 GHz respectivamente. A su vez, le siguen los meses de julio y octubre con una radioatenuación de 0,434 dB/Km y 0,539 dB/Km respectivamente con intensidades de lluvia iguales a 0,12 mm/hr y 0,18 mm/hr.

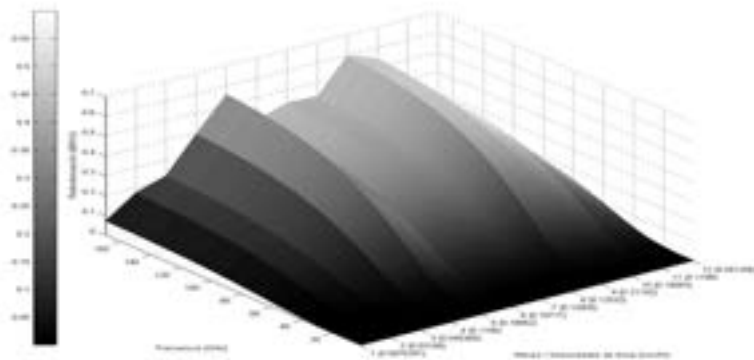


Figura 15. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2005. (Bachaquero) Fuente: MATLAB, Cols (2008).

Finalmente, tenemos el último año 2009 de radioatenuación troposférica de la localidad de Bachaquero, observándose en la figura 16, los meses que tendrán los valores más altos como mayo y septiembre con intensidades de lluvia de 0,61 mm/hr y 0,69 mm/hr respectivamente, con una radioatenuación de 1,186 dB/Km y 1,279 dB/Km.

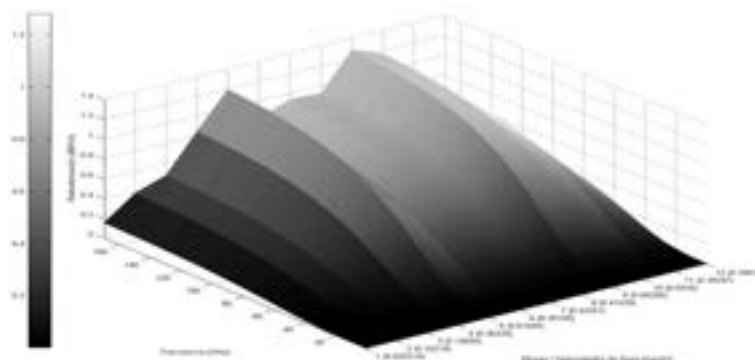


Figura 16. Radioatenuación troposférica por Lluvia para el año 2009. (Bachaquero) Fuente: MATLAB, Cols (2008).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Toda la serie de estudios realizados por otras investigaciones, dan a lugar a escoger como mejor método de pronóstico ARIMA, por ser un método diseñado para analizar las series temporales de tiempo, para lograr el resultado del pronóstico se debe realizar una serie de ensayos de las autocorrelaciones y así se logra los coeficientes óptimos para el cálculo del ARIMA.

Asimismo, es importante considerar que los diversos fenómenos atmosféricos pueden alterar el comportamiento estable de los enlaces de telecomunicaciones basadas en ondas electromagnéticas. Debido a la disipación de energía en forma de calor causada por los gases o por las precipitaciones en forma de lluvia, nieve o granizo.

Hoy en día, existen diversas maneras de pronosticar las precipitaciones en forma de lluvia, una de ellas es mediante el uso de los métodos cuantitativos, para esta investigación se utilizó el Método ARIMA, que es un método de análisis de series de tiempo más adaptable ya que se puede tratar con cualquier patrón de datos, según lo afirma Pérez (2005).

Al realizar el pronóstico del Método ARIMA, para la Costa Oriental del Lago, se obtuvo los siguientes resultados de los parámetros de coeficientes óptimos para cada una de las localidades, teniendo que para Cabimas es $(0,0,1)$ $(1,1,0)_{12}$, Lagunillas $(1,1,0)$ $(1,1,0)_{12}$, Tía Juana $(1,1,0)$ $(0,0,1)_{12}$ y Bachaquero $(0,1,1)$ $(1,0,0)_{12}$, dichos valores contienen el menor error residual.

En la determinación de la radioatenuación troposférica por lluvia para la Costa Oriental del Lago se observó que para la zona de Cabimas en el año 2005 (ver figura 9), la máxima radioatenuación registrada en la frecuencia de 170 GHz fue de 0,46 dB/Km en el mes de octubre y su intensidad de lluvia igual a 0,14 mm/hr; mientras que las radioatenuaciones menores pertenecen a los meses de enero, febrero y marzo con 0 dB/Km respectivamente para los tres meses.

Para el último año pronosticado (2009) de la zona de Cabimas (ver figura 10), los máximos valores pertenecen a septiembre y octubre con intensidades de 0,09 mm/hr y 0,13 mm/hr, y una radioatenuación de 0,35 dB/Km y 0,43 mm/hr, con respecto a las frecuencias de 170 GHz.

En el mismo orden de ideas, para Lagunillas se tiene que en el 2005 (ver figura 11), la intensidad de lluvia más elevada se registró en los meses de mayo y septiembre, con radioatenuaciones de 0,55 dB/Km y 0,52 dB/Km en el orden de los 164 GHz; y las menos leves en febrero y marzo con una radioatenuación de 0,06 dB/Km y 0,08 dB/Km, y la intensidad igual a 0,006 mm/hr y 0,009 mm/hr.

En el último año pronosticado 2009 (ver figura 12), los meses con valores más altos son mayo, agosto con frecuencias en el orden de los 170 GHz y su intensidad de lluvia es de 0,195 mm/hr y 0,194 mm/hr similar a la del año 2007.

A continuación, se muestran los valores de máxima radioatenuación para la localidad de Tía Juana del año 2005 (ver figura 13), de mayo y septiembre igual a 0,69 dB/Km y 0,52 dB/Km, con una intensidad de lluvia de 0,26 mm/hr y 0,17 mm/hr, en la frecuencia de los 170 GHz. Las menores se presentaron en enero, marzo con intensidad estimada de 0,002 mm/hr y 0,010 mm/hr respectivamente, y una radioatenuación de 0,03 dB/km y 0,08 dB/Km.

Por último, tenemos el 2009 (ver figura 14), donde la máxima radioatenuación se registrara en los meses de mayo y septiembre con 0,750 dB/Km y 0,550 dB/Km. Y las más leves enero, marzo con valores iguales a 0,03 dB/Km y 0,08 dB/Km, en la frecuencia de 170 GHz.

La zona de Bachaquero en el 2005 (ver figura 15), tuvo como máxima radioatenuación los meses de mayo y septiembre con valores de 0,554 dB/Km y 0,597 dB/Km, las más leves son de enero y febrero con 0,06 dB/km y 0,16 dB/Km, en el orden de la frecuencia de 150 GHz. El año 2006 (ver figura 41), presentó valores altos de intensidad de lluvia y de radioatenuación en mayo, septiembre con 0,67 dB/Km y 0,72 dB/Km, 0,25 mm/hr y 0,28 mm/hr. Y la menor fue para enero, febrero con 0,08 dB/Km y 0,21 dB/Km, y 0,01 mm/hr y 0,04 mm/hr, con frecuencias de 170 GHz.

Finalmente, tenemos el último año pronosticado 2009 (ver figura 44) de radioatenuación troposférica de Bachaquero, donde los meses que tendrán los valores más altos son mayo y septiembre con intensidades de lluvia de 0,61 mm/hr y 0,69 mm/hr, y una radioatenuación de 1,186 dB/Km y 1,279 dB/Km. Y los meses más leves enero y febrero con 0,152 dB/Km y 0,374 dB/Km y 0,025 mm/hr y 0,102 mm/hr, en la frecuencia de 170 GHz.

Con todo lo antes expuesto, se puede decir que en la determinación de la radioatenuación troposférica por lluvia, la máxima radioatenuación e intensidad de lluvia la presenta la localidad de Bachaquero; y la zona con menos nivel es la de Cabimas.

CONCLUSIONES

Al describir el método de pronóstico ARIMA, se determinó como el más adecuado y avanzado en su tipo, compatible con las características de la serie de datos real y sus patrones estacionales. Logrando el comportamiento de la serie de datos de lluvia mensual, con la identificación del patrón de estacionalidad y estacionariedad de la data.

Para el análisis del pronóstico de lluvia obtenido a través del método ARIMA, se logró los gráficos de las autocorrelaciones simples y parciales de la serie, donde se pudo observar que los retrasos caen hacia cero, para llegar transformar la serie es necesario que se busque la estacionariedad, por lo tanto, se tiene que diferenciar para así obtener los coeficientes óptimos de ARIMA, y decir que se ha llegado al pronóstico de lluvia.

Por otra parte, se pudo comparar los valores obtenidos con los valores de lluvia real, lográndose que la lluvia pronosticada fuera semejante al comportamiento anual de lluvia real, es decir, que se mantiene en el mismo parámetro, no se aprecie que exista mucha variación entre ambos datos.

Al calcular la radioatenuación troposférica con la intensidad de lluvia obtenida con el método ARIMA, para la Costa Oriental del Lago, se determinó los meses donde existe mayor y menor radioatenuación e intensidad de lluvia de los años pronosticados, es decir, desde el 2005 hasta el 2009, apreciando que para la localidad de Cabimas los meses donde existe un nivel alto de radioatenuación son los de septiembre y octubre y el más bajo en los meses de enero, febrero y marzo. Obteniéndose, que el año 2005 es el que presentó la máxima radioatenuación e intensidad con valores de 0,46 dB/Km y 0,14 mm/hr.

En cuanto, a la zona de Lagunillas los meses con más y menos radioatenuación e intensidad son agosto, mayo, febrero y marzo, mostrando que el año donde se concentró la máxima radioatenuación fue en el 2006, presentando valores de 0,57 dB/Km y 0,197 mm/hr.

Por otro lado, Tía Juana, presentó los meses de mayo y septiembre con máxima radioatenuación e intensidad de lluvia, y la más leve fue en enero y marzo; observándose, el año 2006 donde hubo más lluvia con unos valores de 0,76 dB/Km y 0,30 mm/hr.

Para finalizar, en Bachaquero el nivel más alto de radioatenuación se obtuvo en mayo y septiembre, y el más bajo en enero y febrero, presentando al 2009 como el año que tendrá los máximos valores de lluvia con 1,279 dB/Km y 0,69 mm/hr.

En conclusión, se puede decir que la localidad de Cabimas presenta los niveles más bajos de radioatenuación troposférica e intensidades de lluvia, mientras que en Bachaquero existen los valores máximos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arteaga, R. (2007). Pronóstico de la Radioatenuación Troposférica por Lluvia para la ciudad de Maracaibo. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.

Bravo, L., Ramírez, T. y Méndez, P. (2005). La Investigación Documental y Bibliográfica. Caracas: Panapo.

Cardama, A. (1998). Antenas. Ediciones UPC. Barcelona, España.

Cuadrat, J. y Pita, M. (2006). Climatología. Ediciones Cátedra. 4ta. Edición.

Chávez, N. (1994). Introducción a la Investigación Educativa. Maracaibo: Editorial Universal.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2003). Metodología de la Investigación. México: McGraw-Hill.

ITU (2005). Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods. Recommendation ITU-RP.838-3.

Lamed, C. (2007) Cálculo de Radioatenuación Troposférica por Lluvia en las Frecuencias de 0.4 y 60 GHz. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.

Makridakis, S. y Wheelwright, S. (2004). Métodos de Pronósticos. México: Limusa.

Moncada, D. (2006) Efectos de Atenuación por Lluvia en los Medios de Transmisión entre Sistemas y Estaciones Terrestres. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.

Moreno, H. (2006). Cálculo del Índice de Atenuación Troposférica en Radio-Enlaces para el Departamento de Cesar Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Belloso Chacín.

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

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

Zsarolyani, A. (2007). Pronóstico de Radioatenuación Troposférica por lluvia para la ciudad de Maracay. Tesis de Maestría, Universidad Rafael Bellosó Chacín.