

**ORGANIZACION DE LOS ESTADOS AMERICANOS  
ORGANIZATION OF AMERICAN STATES**

**Comisión Interamericana de Telecomunicaciones  
Inter-American Telecommunication Commission**

---

**30 REUNIÓN DEL COMITÉ  
CONSULTIVO PERMANENTE II:  
RADIOCOMUNICACIONES  
Del 27 de noviembre al 1 de diciembre de 2017  
Barranquilla, Colombia**

**OEA/Ser.L/XVII.4.2.30  
CCP.II-RADIO/doc. 4452/17  
13 noviembre 2017  
Original: español**

**UTILIZACIÓN DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO  
PARA LA VERIFICACIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN  
DE LOS ARREGLOS DE ANTENAS TRANSMISORAS PARA  
EL SERVICIO DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE**

**(Punto del temario: 3.4)**

**(Documento informativo presentado por TES America)**

INTRODUCCIÓN.....	3
SISTEMA DE MEDICION SOBRE UN VEHICULO NO TRIPULADO. ....	3
DISEÑO DE LOS ARREGLOS DE ANTENA PARA TDT.....	5
CONSIDERACIONES PARA INSTALAR EL SISTEMA RADIANTE .....	6
Medición de la orientación .....	6
Medición de la inclinación (tilt y rotación).....	6
Distancias entre antenas .....	6
PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	7
Medición del patrón Horizontal.....	7
Medición del patrón Vertical .....	7
PROCESAMIENTO DE RESULTADOS .....	8
Verificación de Lóbulos .....	8
Verificación de Nulos Horizontales.....	8
Verificación de Nulos Verticales (Null Fill).....	9
INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES .....	10
Posición del UAV .....	10
Sistema de medición de RF.....	10
Factores ambientales .....	10
CONCLUSIONES.....	10
BIBLIOGRAFÍA.....	11

## INTRODUCCIÓN

Después de la recomendación ITU-R BS.1195 [1] las mediciones de patrón de radiación de antenas usando vehículos aéreos no tripulados son una solución alternativa de caracterización de antenas que, por sus grandes dimensiones, no pueden ser evaluadas en cámaras anecoicas. Necesariamente el escenario de medición debe ser bastante ideal, condición que cumplen a cabalidad los arreglos de antenas utilizados por las estaciones de TDT.

En este documento se hace una recopilación de las experiencias de TES América durante las pruebas del prototipo de una unidad de medición capaz de realizar este tipo de mediciones pese a las dificultades que acá mismo se describen. En este documento se resume el escenario de mediciones de TDT con UAV en Colombia en donde los mismos escenarios de medición empiezan a imponer las dificultades dados los fuertes vientos, baja visibilidad.

Resultados comparativos entre las simulaciones y las mediciones reales son presentados con objeto de concienciar que, aunque son una muy buena aproximación para caracterizar un arreglo de antenas instalado, la incertidumbre de este tipo de verificaciones es mayor [2].

Aunque hay muchos factores de incertidumbre que pueden ser menguados son aquellos factores desconocidos o incontrolables, que especialmente corresponden al escenario de medición, los que causan las diferencias.

## SISTEMA DE MEDICION SOBRE UN VEHICULO NO TRIPULADO.

Aún existe un límite tecnológico en los vehículos aéreos no tripulados (UAV), comercialmente podría decirse que el UAV con una mayor resistencia al viento es de 15m/s, velocidad fácilmente lograble en una montaña colombiana.

Las condiciones de los escenarios para a verificación de patrón de radiación de antenas de TDT son básicamente los lugares en que se encuentran las estaciones, en algunos casos urbanos y en otros cerros en las montañas.

Un resumen de las condiciones de vuelo críticas sería:

- Elevaciones por encima de los 3000 msnm
- Velocidades promedio de hasta 10 m/s, Ver Figura. 1
- Alturas de vuelo por encima de los 150 m sobre el nivel del piso
- Visibilidad de menos de 50m
- Fuentes de interferencia de las señales de control

A veces más de uno de estos escenarios está combinado en un sitio, por lo que las características del UAV se hacen importantes. Por otro lado, dado que hay una relación inversa entre la duración de la batería de y el peso soportado se tuvo el reto de minimizar el set de medición a unos 0.7 kg de manera que se pudieran realizar vuelos durante más de 10 minutos, autonomía necesaria para realizar los vuelos 360° alrededor del set de medición.

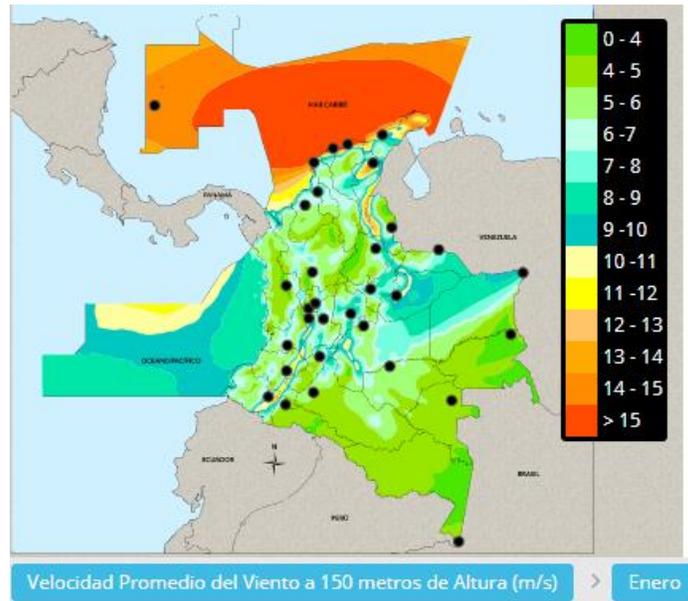


Figura. 1 Mapa de velocidad del viento a 150 metros sobre el nivel del suelo [3]

Por otro lado, con el objetivo de no tener elementos duplicados el gps con el que se realizaron las mediciones fue el mismo del UAV a través de una interface de control conectado al sistema de medición a partir de un software diseñado por TES America, lo que hace que el error de la posición sea debido a un único dispositivo.

Se realizó una modificación al software de monitoreo de espectro TESMonitor®, ver Figura. 2, con el objeto de tener una herramienta completa para la captura y análisis de los datos tomados por el UAV, en cuya interfase se puedan ver todas las trayectorias que recorre el patrón para revisar si la medición aún conserva una trayectoria válida para la medición y graficar, en sitio, los patrones de radiación. Esto resulta ser muy útil ya que permite detectar inmediatamente errores en instalación o fallas de componentes.

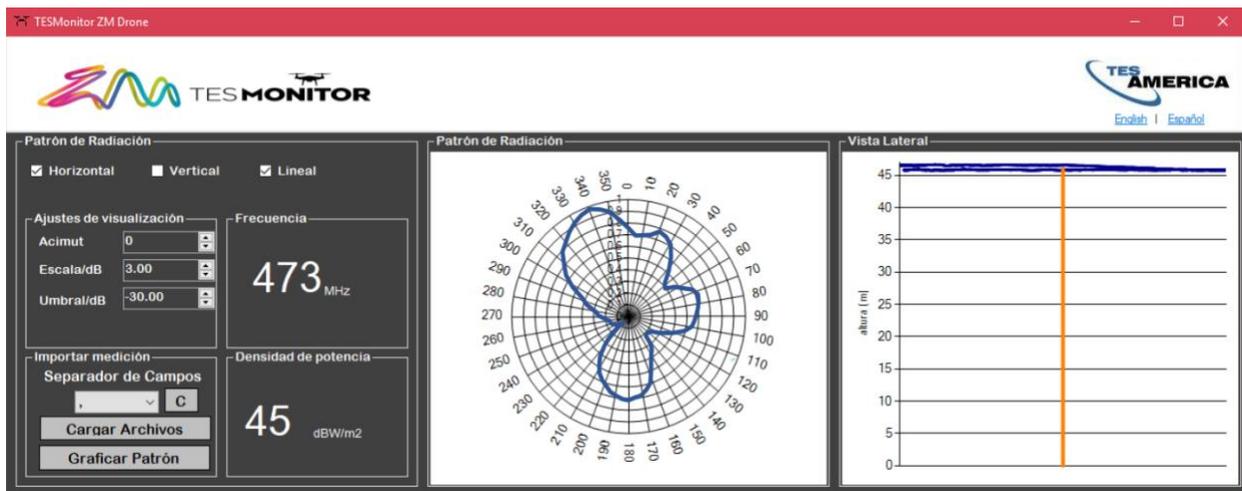


Figura. 2 Software de visualización de los resultados de medición

## DISEÑO DE LOS ARREGLOS DE ANTENA PARA TDT

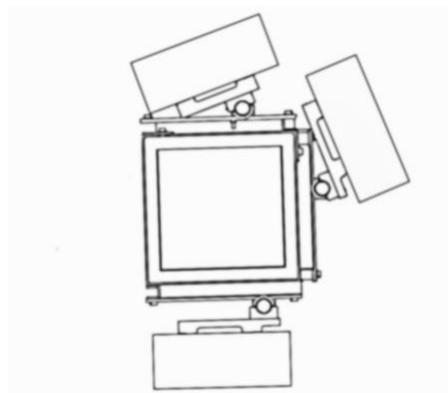
Los arreglos de antenas para televisión digital no son fáciles de probar en una cámara anecoica, especialmente por las distancias en que se encuentran sus regiones de campo lejano

*Tabla 1 Cálculo de la distancia de campo lejano para diferentes escenarios.*

Tamaño antena [m]	Frecuencia [MHz]	Inicio Región campo lejano [m]
2	470	12.53
2	700	18.67
6	470	112.80
6	700	168.00
8	470	200.53
8	700	298.67

Como se muestra en la tabla, las distancias de campo lejano para antenas de TDT en la banda UHF puede superar los 100 m, por lo que una prueba regular en una cámara anecoica no es útil, esto aunado a la dificultad de mantener exactamente las mismas características de las antenas al realizarse el montaje en la torre ya que por su tamaño el montaje se realiza elemento a elemento.

Cuando se realizan simulaciones para definir el arreglo de antenas de un patrón de radiación, esto se hace bajo condiciones muy ideales, sin considerar el escenario en el que resulta instalada la antena y también las condiciones propias de la instalación en las que la precisión es nada más que milimétrica, estos pequeños desfases de más de un milímetro además de las diferentes atenuaciones que tenga cada uno de los latiguillos que alimentan a los paneles provoca cambios en el patrón de radiación con un nivel de aleatoriedad que un simulador no podría lograr.



*Figura. 3 Ejemplo de diseño de arreglo de antenas sobre herrajes*



*Figura. 4 Arreglo de Antenas instalado en torre*

Los detalles que se consideran al momento de realizar la planeación de un arreglo es importante tener claro cuáles son los lugares objetivo de cobertura, para realizar apuntamiento de los lóbulos y diseño de los nulos teniendo en cuenta las condiciones de instalación.

Se suelen realizar simulaciones previas de los posibles arreglos para obtener patrones de radiación previos, y luego realizar simulaciones de cobertura con software especializado.

Además de los diseños de arreglos de antenas es importante tener también diseños de herrajes para el montaje que permitan que la instalación de las antenas en la torre sea completamente acorde a lo planeado en el diseño.

Una simulación arroja resultados ideales del patrón de radiación, considerando los factores más importantes como la orientación de las antenas, las distancias de los latiguillos que se conectan a las antenas (consideraciones de la fase)

## CONSIDERACIONES PARA INSTALAR EL SISTEMA RADIANTE

Las instalaciones son un proceso de detalle, cualquier error que modifique alguna de las distancias entre las antenas que componen el arreglo, o la orientación (tilt o acimut) de alguna de ellas afecta directamente al patrón de radiación, por lo que se deben realizar verificaciones de todas las distancias, orientaciones e inclinaciones del arreglo previa a la realización de las mediciones del patrón de radiación.

### Medición de la orientación

Existen recomendaciones relevantes para este tipo de mediciones que se deben tener en cuenta ya que un error en la orientación puede causar que el patrón de radiación cambie o que todo el arreglo apunte en una dirección equivocada. Es importante considerar:

- La declinación magnética de la tierra si se realizan mediciones con brújula.
- El usar brújula o GPS sobre los paneles puede causar errores ya que por la geometría de estos es no siempre es posible tomarlos como referencia exacta.
- Es preferible puntos de referencia fijos sobre la tierra en los acimuts de instalación.

### Medición de la inclinación (tilt y rotación)

Es necesario que todos los sectores se encuentren perfectamente alienados, o en caso de que haya algún tipo de offset tengan el mismo tilt.

En la mayoría de las instalaciones las antenas se encuentran todas con una inclinación de 0° respecto al horizonte y ninguna de las antenas debe tener algún tipo de rotación, sin embargo, no se recomienda el uso de cintas plomadas dado que los fuertes vientos pueden alterar la medición. Existen medidores de inclinación que no se ven afectados por el viento y que utilizado en todos los paneles.

### Distancias entre antenas

La precisión de la distancia entre las antenas debe ser milimétrica, las distancias que se deben respetar y verificar corresponden a:

- Separación entre paneles
- Offset por diseño
- Rotaciones y tilts no deseados.
- Distancias entre las diferentes caras.

Todos estos parámetros deben verificarse que sean tal cual el diseño, en la figura se observa una recomendación de los errores comunes en la instalación por cara.

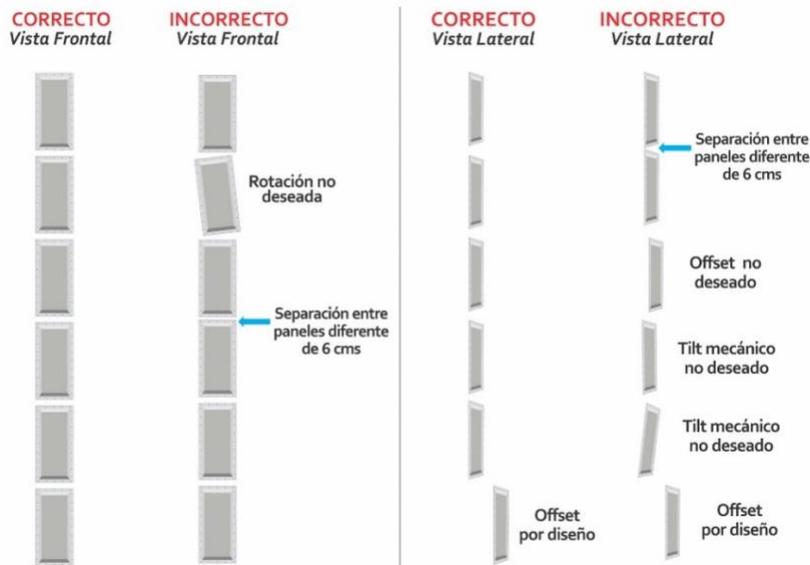


Figura. 5 posibles variaciones consideradas erróneas en el arreglo de antenas

## PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

El patrón de radiación se verifica en los planos H y V lo que significa que se deben realizar dos mediciones diferentes:

### Medición del patrón Horizontal

Se realizan dos vuelos horizontales alrededor de la estación cubriendo 360° a velocidad constante con radios descritos de acuerdo con el plan de vuelo logrando una precisión mejor que 1° con más de 10 muestras por grado.

Los vuelos horizontales se realizan uno por cada tilt que tenga el diseño del arreglo de antenas (Cada tilt se representa mediante un vuelo a una altura diferente como una suerte de corte transversal ver líneas azules en Figura. 6), cada uno de estos vuelos debe tener un radio superior a la región de campo lejano del arreglo, ver Figura. 7.

### Medición del patrón Vertical

Los vuelos verticales se realizan mediante ascensos en cada uno de los acimuts de instalación, respetando la distancia de campo cercano, para verificar el patrón vertical del arreglo de antenas.

Se realizan vuelos de ascenso a velocidad constante que cubran entre -5° y 15° de inclinación con respecto al centro de radiación de la antena, ver línea roja en Figura. 6.

En estos vuelos es de vital importancia verificar el tilt que tiene el arreglo en el acimut indicado y el relleno de nulos del primer nulo del patrón, en algunos casos este se diseña de manera que pueda cubrir estaciones cercanas.

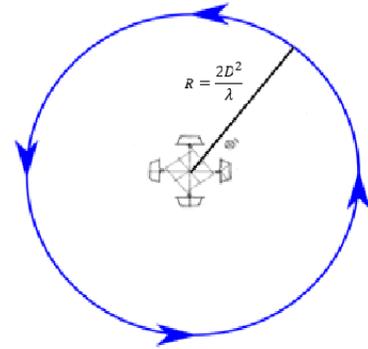
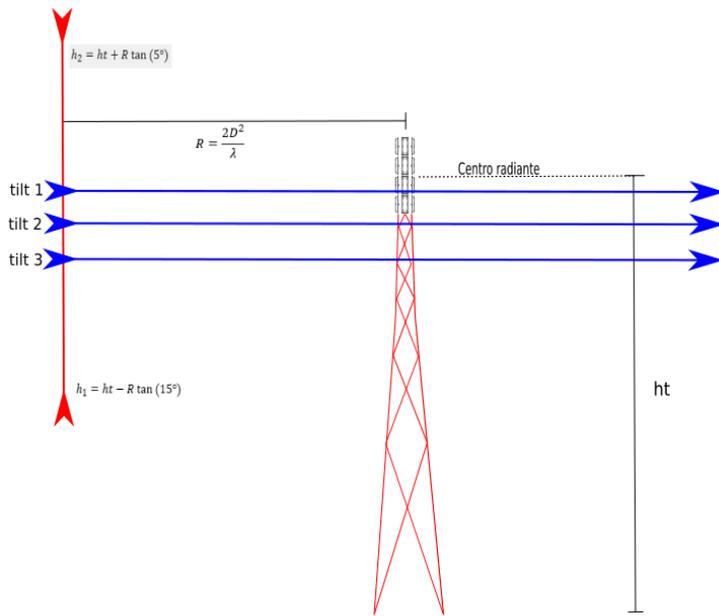


Figura. 7 Detalle de los vuelos circulares, líneas azules de la Figura. 6

Figura. 6 Vuelos incluidos en un plan de medición con UAV,  $ht$  es la altura del centro de radiación,  $R$  es el radio de vuelo.

Es importante aclarar que la altura  $ht$  en la Figura. 6 debe ser medida desde el punto de referencia de vuelo del UAV hasta el centro radiante de la antena con el objetivo de asegurar la altura de los vuelos.

## PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

El software se encarga de tomar todos los datos que se midieron con el equipo de medición de nivel y realizar el promedio de los datos que se encuentran dentro del área de precisión del GPS y dar el resultado del nivel de señal por punto (usualmente se toman datos en forma de campo eléctrico [E en V/m]) y los gráficos se forman con la relación de este valor tomado sobre el mayor valor de campo eléctrico registrado  $E_{max}$ .

Es apenas entendible que el patrón teórico resulte muy diferente del patrón de radiación real [4] por la incertidumbre de la medición, así como la precisión del patrón de radiación simulado que en muchos casos suele estar en un 5%. Es por ello por lo que parte importante del análisis consiste en 3 pasos fundamentales:

### Verificación de Lóbulos

Los lóbulos son los encargados de evidenciar las direcciones en que se dará cobertura. Como resultado se espera tener los lóbulos en las direcciones deseadas y que sus atenuaciones sean acordes al diseño realizado.

### Verificación de Nulos Horizontales

Los nulos son de vital verificación ya que la existencia de un nulo horizontal no planeado puede causar dejar sin cobertura una región completa, del mismo modo lo que se espera es verificar cada uno de los con la atenuación puesta por diseño.

En el ejemplo de la Figura. 8 se espera tener los siguientes lóbulos y nulos descritos en la Tabla 2 y la Tabla 3 respectivamente

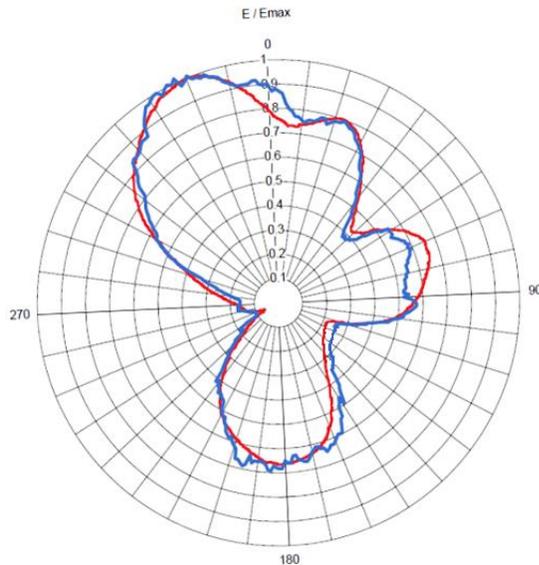


Figura. 8 Comparaciones de un patrón de radiación simulado (Rojo) con uno medido (Azul)

Tabla 2 Detalle de Lóbulos

Dirección lóbulo	Atenuación (E/Emax)
20°	0.8
70°	0.6
180°	0.7
340°	1

Tabla 3 Detalle de nulos

Dirección Nulo	Atenuación (E/Emax)
8°	0.73
50°	0.41
120°	0.22
245°	0.05

### Verificación de Nulos Verticales (Null Fill)

Este es otro de los parámetros importantes de la verificación ya que lo que se espera es tener la aproximación de lo propuesto en el diseño, este tipo de medición tiene como compromiso asegurar la cobertura de las zonas aledañas a la estación.

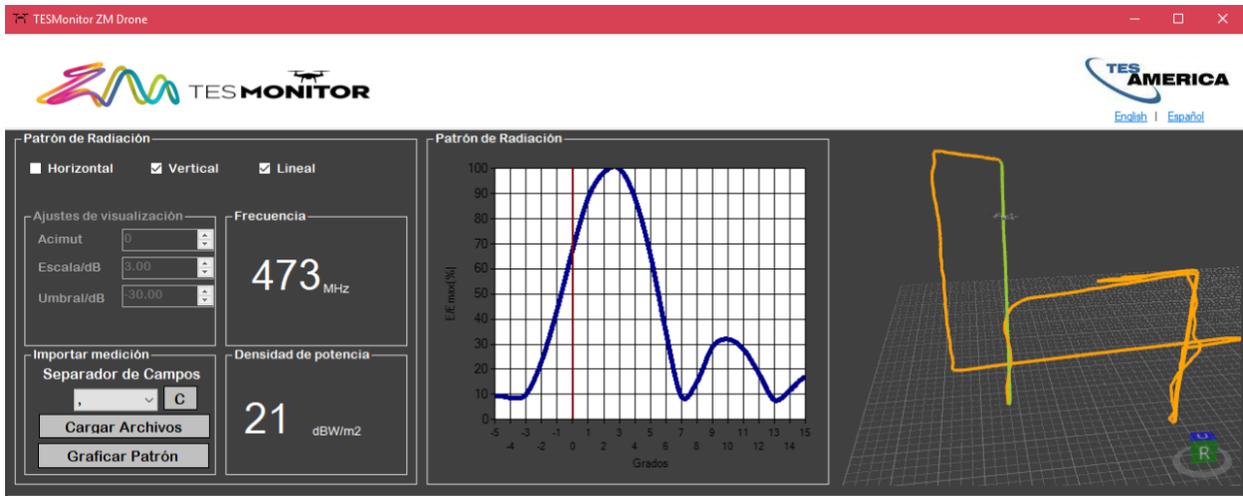


Figura. 9 Resultado de medición del patrón de radiación vertical, Recorrido tomado para la medición en verde y en naranja el resto de la trayectoria del UAV

## INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES

Ya se han realizado varias mediciones con UAV, y en algunos casos se habla de niveles de precisión de  $\pm 2.2$  dB [5] por lo que es necesario considerar todos los factores que pueden producir errores en las mediciones y buscar reducirlos.

### Posición del UAV

Es recomendable usar un GPS con una precisión cercana a los  $\pm 1$ m, aunque en algunos casos se puedan utilizar GPS de precisión centimétrica [6] sin embargo esto es importante solo para mediciones de campo cercano. Dado que en las mediciones para antenas de televisión se requieren mediciones de diferentes tilt, variaciones de  $1^\circ$  a menos de 14m no superarían el tamaño aproximado del UAV (0.25m) mientras que a distancias superiores a 100 m se tienen diferencias de inclinación de más de 1.7 m que ya son notables cambios y pueden considerarse como mediciones diferentes teniendo en cuenta que se debe utilizar la altura barométrica del UAV ya que esta es de 10 cm.

### Sistema de medición de RF

El sistema de medición de RF agrega un grado más de incertidumbre a las mediciones ya que por norma internacional de laboratorios de calibración la tolerancia permitida es del 95% [7], una recomendación para minimizar este error es utilizar técnicas de promediado espacial y temporal.

### Factores ambientales

Las mediciones no se realizan durante lluvias, sin embargo, los factores ambientales son los que introducen la incertidumbre menos deseada ya que no es posible calcularla, factores como:

- Cambios repentinos en la intensidad y dirección del viento
- Columnas térmicas

Estos factores agregan error que no es predecible pero muchas veces observables a simple vista y la única manera de sortearlos es a través de la repetición de las mediciones promediando varios resultados.

## CONCLUSIONES

La verificación de patrones de radiación requiere condiciones especiales del set de medición, así como un protocolo de pruebas muy detallado ya que los factores que causan incertidumbre son aún más que una medición regular de espectro o nivel de señal.

Hay que tener presente que siempre va a existir una diferencia entre los patrones teóricos y los obtenidos a partir de las mediciones, diferencias que pueden ser causadas por las condiciones finales de instalación, así como la incertidumbre propia de la medición y los diferentes factores ambientales.

Las mediciones de patrón de radiación para arreglos de antenas en estaciones de radiodifusión tienen su mayor aplicación en la verificación de la instalación que en la caracterización exacta del arreglo, esto debido a que el alto grado de incertidumbre haría muy costoso obtener una precisión por encima del 95% de confiabilidad. Mientras que a partir de la confirmación de

lóbulos y nulos puede responderse de manera más certera a las dudas sobre la cobertura de este tipo de estaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sector de Radiocomunicaciones UIT, «Recomendación UIT-R BS.1195-1 Características de las antenas transmisoras en ondas métricas y decimétricas,» 2013.
- [2] Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, «Informe UIT-R SM.2056-1 Verificación con aeronave de los diagramas de antena de las estaciones de radiodifusión,» 2014.
- [3] IDEAM -Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «Atlas de Viento de Colombia,» [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.
- [4] F. Üstüner, et al., «Antenna radiation pattern measurement using an unmanned aerial vehicle (UAV),» de *General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI*, Beijing, China, 2014.
- [5] J. Schreiber, «Antenna pattern reconstruction using unmanned aerial vehicles (UAVs),» de *IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Syracuse, NY, USA, 2016.
- [6] M. G. Fernández, Y. Á. López, A. Arboleya, et al, «Antenna Diagnostics and Characterization using Unmanned Aerial Vehicles,» *IEEE Access*, 2017.
- [7] BIPM, Oficina Internacional de Pesas y Medidas, «Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement,» 2008.