

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIONES**



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE EN
COLOMBIA CON EL NUEVO ESTÁNDAR DVB-T2**

**AUTOR: GERARDO MARTINEZ PINZÓN
DIRECTOR: DAVID GÓMEZ BARQUERO
TUTOR: NARCÍS CARDONA MARCET**

Agradecimientos

A Dios porque creo que es nuestro guía y fuente de sabiduría en todas las etapas de nuestra vida.

A mis padres, hermanos, abuela y familia por su motivación, apoyo incondicional y por el esfuerzo realizado para poder hacer mi estancia en Valencia.

A mi tutor Narcís Cardona Marcet por su visión y apoyo en la realización del proyecto.

A mi director David Gómez Barquero por su guía y análisis constructivo para cumplir los objetivos propuestos del proyecto.

A mis compañeros del grupo iTEAM, por su apoyo, especialmente Jaime López Sánchez y Javier Beneyto Soriano por sus conocimientos compartidos y su consejo para encontrar soluciones a los inconvenientes encontrados.

Anette Acosta Martínez gracias por tu voz de aliento, motivación y apoyo incondicional.

A todos ellos muchas Gracias. Dios les continúe Bendiciendo en todos sus proyectos.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.2	MOTIVACIÓN	7
1.3	OBJETIVOS.....	8
1.4	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	8
2	ESTIMACIÓN DE COBERTURA EN REDES DE TDT	9
2.1	TOPOLOGÍAS DE RED DE TDT.....	9
2.1.1	<i>Red MFN</i>	9
2.1.2	<i>Red SFN</i>	9
2.2	MODULACIÓN OFDM	10
2.3	EFEECTO MULTITRAYECTO EN REDES SFN	11
2.4	INTERVALO DE ECUALIZACIÓN (IE) Y FUNCIÓN DE PONDERACIÓN EN DVB-T2	12
2.5	COMBINACIÓN DE SEÑALES OFDM	14
2.5.1	<i>Método de suma de potencias</i>	14
2.6	DERIVACIÓN DE LAS RELACIONES PORTADORA A RUIDO (CNR) UTILIZADAS EN PLANIFICACIÓN	15
2.7	CÁLCULO DE LA RELACIÓN PORTADORA A RUIDO MÁS INTERFERENCIA (CINR)	17
2.8	TIPOS DE RECEPCIÓN.....	18
2.9	LINK BUDGET.....	19
2.9.1	<i>Cálculo del link budget</i>	19
2.9.2	<i>Diferencias cálculo del link budget DVB-T Vs DVB-T2</i>	20
3	TECNOLOGÍAS DE TDT	23
3.1	DVB-T	23
3.1.1	<i>Tamaño de la FFT</i>	23
3.1.2	<i>Intervalo de guarda</i>	24
3.1.3	<i>Modulación y codificación (MODCOD)</i>	24
3.2	DVB-T2	24
3.2.1	<i>Tamaño de la FFT</i>	24
3.2.2	<i>Intervalo de guarda (GI)</i>	25
3.2.3	<i>Modulación y codificación (MODCOD)</i>	27
3.3	INDICADORES DE RENDIMIENTO	27
3.3.1	<i>Capacidad</i>	27
3.3.2	<i>Distancia máxima entre transmisores SFN</i>	29

4	METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE COBERTURA EN REDES TDT	33
4.1	CARTOGRAFÍA	33
4.1.1	<i>Mapa digital del terreno (DTM).....</i>	<i>33</i>
4.1.2	<i>Mapa digital de los límites administrativos de Colombia</i>	<i>34</i>
4.2	GENERAR LOS PATRONES DE RADIACIÓN DE LAS ANTENAS TRANSMISORAS CON SOFTWARE ANTIOS	34
4.3	PROCEDIMIENTO EN EL ANÁLISIS DE REDES SFN CON EL SOFTWARE ICS TELECOM	36
5	RESULTADOS	39
5.1	RESULTADOS DVB-T	39
5.1.1	<i>Estimaciones de cobertura para la red de TDT de RTVC.....</i>	<i>39</i>
5.1.2	<i>Modo referencia RTVC cobertura MFN utilizando 2 frecuencias.....</i>	<i>40</i>
5.1.3	<i>Modo referencia RTVC cobertura SFN única frecuencia</i>	<i>42</i>
5.2	RESULTADOS DVB-T/T2.....	46
5.2.1	<i>Ganancia en capacidad DVB-T2.....</i>	<i>46</i>
5.2.2	<i>Ganancia en cobertura DVB-T2</i>	<i>47</i>
5.2.3	<i>Ganancia SFN DVB-T2.....</i>	<i>53</i>
6	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO PARA LA RED TDT EN COLOMBIA CON DVB-T2.....	59
6.1	CONCLUSIONES.....	59
6.2	RECOMENDACIONES	62
6.3	TRABAJO FUTURO	63
	REFERENCIAS	64
	ABREVIATURAS	65
ANEXO A.	ESCENARIO DE PLANIFICACIÓN DE RED DVB-T	66
A.1	ESCENARIO ORIGINAL DVB-T.....	66
A.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SISTEMA RADIANTE	67
A.3	MODELOS DE PROPAGACIÓN	71
A.3.1	<i>Modelos de propagación determinísticos.....</i>	<i>71</i>
A.3.2	<i>Modelos de propagación estadísticos y mixtos</i>	<i>71</i>
A.3.3	<i>Modelos de propagación para sistemas de radiodifusión</i>	<i>72</i>

1 Introducción

1.1 Introducción

El despliegue de la televisión digital terrestre sigue un esquema similar al del mundo analógico en el cual ha habido diversidad de estándares a nivel internacional, siendo los principales estándares de Televisión Digital Terrestre (TDT) los siguientes: (I) DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*), en Europa, Oceanía, parte de África, Asia, y América; (II) ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*) en Japón, parte de Centro y Suramérica; (III) ATSC (*Advanced Television System Committee*)_en Norteamérica y algunos países del Caribe; (IV)DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*) en China, tal y como se observa en la Figura 1:

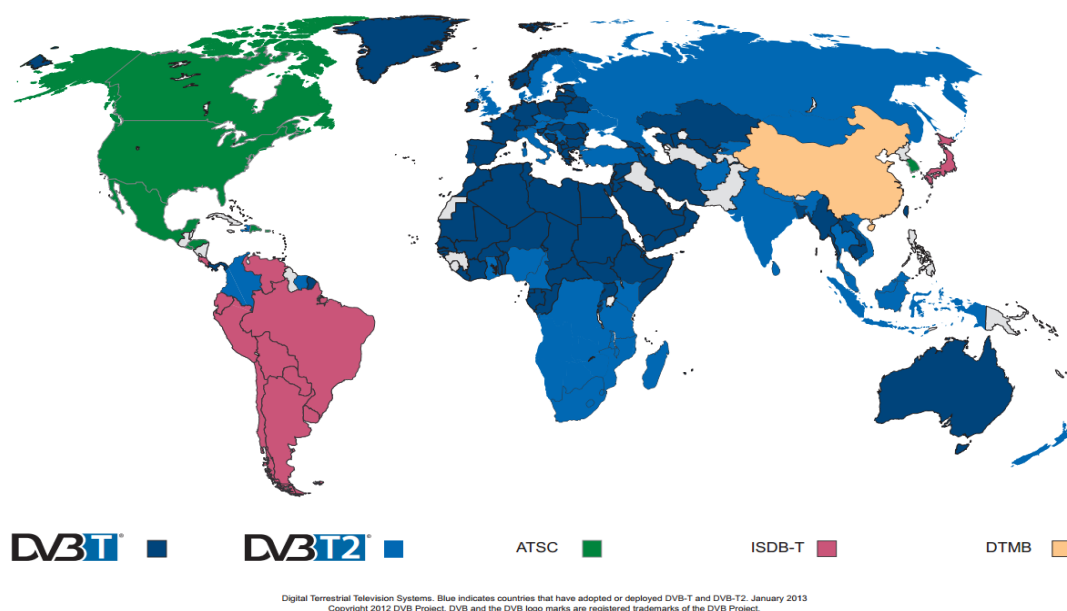


Figura 1. Adopción y despliegue de los estándares de TDT en el mundo. Fuente: www.dvb.org

El sistema DVB-T especifica los procesos de codificación de canal, estructura de tramas y modulación para la transmisión de televisión digital a través de redes de distribución terrestres utilizando los canales convencionales en las bandas VHF y UHF.

DVB-T2 es el estándar de segunda generación para la radiodifusión de servicios de TDT más avanzado del mundo, proporcionando velocidades de transmisión en un mismo ancho de banda como mínimo un 50% mayor con respecto a cualquier otro estándar de TDT. DVB-T2 no sólo posibilita un uso mucho más eficiente del espectro radioeléctrico, sino que también es mucho más robusto frente a ruido e interferencias. DVB-T2 ofrece la posibilidad de nuevos modelos de negocio, Como por ejemplo la transmisión de diferentes tipos de servicio (TV en calidad estándar SD, TV en alta definición HD, TV en tres dimensiones 3D, o TV móvil) en un mismo múltiplex (frecuencia) con diferentes parámetros de transmisión, así mismo la configuración de redes con única frecuencia.

Si comparamos DVB-T2 frente a su antecesor DVB-T, DVB-T2 incorpora los últimos avances tecnológicos en modulación y codificación del canal, además ofrece un alto grado de eficiencia, flexibilidad y robustez. Esta robustez de la señal se puede traducir en un aumento de la cobertura o un ahorro de energía si se establece el mismo porcentaje de cobertura objetivo [ETSI EN 302 755].

Colombia adoptó en agosto de 2008 el estándar TDT europeo DVB-T, utilizando compresión de video MPEG-4. En diciembre de 2011, se actualizó el estándar de TDT a DVB-T2, manteniendo el estándar de compresión de video MPEG-4.

Colombia diseñara dos redes de Televisión Digital Terrestre DVB-T2. Una red estará gestionada por el Consorcio de Canales Nacionales Privados (CCNP) para los canales Caracol y RCN y la otra red estará gestionada por Radio Televisión Pública de Colombia (RTVC) para los canales públicos nacionales y regionales. A manera de ejemplo, la Figura 2 muestra el primer diseño de la red de RTVC basado en dos frecuencias.



Figura 2 .Planificación de la red de DVB-T a dos frecuencias por RTVC

Las directivas tomadas para un primer estudio sobre el despliegue de la red de televisión digital terrestre en Colombia estaban basadas en optimizar costes y por lo tanto aprovechar al máximo la infraestructura, equipos y ubicación geográfica de las estaciones de televisión de la red analógica ya existentes.

El diseño inicial de RTVC para el despliegue de las redes de TDT fue proyectado para el estándar DVB-T basado en una combinación de topologías MFN (*Múltiple Frequency network*) y SFN (*Single Frequency Network*) para dar cubrimiento a más del 92% de la población. Por un

lado las redes MFN los transmisores emiten programas iguales o diferentes en frecuencias distintas entre áreas adyacentes con el fin de evitar interferencias. Si se requiere cubrir una zona extensa es posible el re-uso de frecuencias siempre que se asegure una distancia entre transmisores co canal que evite interferencias, en este diseño la distancia máxima entre transmisores es 90 km. Por otro lado la red SFN es una red en la que todos los transmisores emiten simultáneamente la misma señal a la misma frecuencia. El principal motivo por el cual resulta interesante la implementación de redes SFN es una mayor eficiencia en la utilización de recursos radio consiguiendo aprovechar mejor el espectro.

En concreto el diseño original de RTVC, es una planificación original basada en una configuración de dos frecuencias, dejando la posibilidad de asignar una tercera frecuencia para zonas con altos porcentajes de interferencia entre redes TDT o para transmisores fronterizos que puedan generar interferencia en otros países.

1.2 Motivación

Este Proyecto de Fin de Carrera nace de la necesidad de optimizar el diseño original de la red TDT de RTVC para DVB-T2.

RTVC tiene previsto extrapolar el modo de transmisión DVB-T a un modo de transmisión DVB-T2 que maximice la capacidad de transmisión para mantener el diseño de red DVB-T, es decir preservando la distancia máxima entre transmisores y la cobertura.

Como punto de partida en este proyecto se modela el diseño de red DVB-T de RTVC, haciendo distinción de pautas que se mantendrán del diseño original, tales como, ubicación de los emplazamientos, patrón de radiación de las antenas, potencia de emisión y modelo de propagación. Esta información presentada en este proyecto está basada en los datos del Anexo 2 de las especificaciones técnicas mínimas 04102012 de RTVC¹ y en el documento 20122030030631 de RTVC donde informa a la ANE las especificaciones técnicas de las estaciones de TDT que pretende desplegar en 2012 (Fase I).

Para el ámbito de este estudio se realizan ejercicios de cobertura e interferencia, probando diferentes modos de transmisión que nos permiten evaluar las prestaciones ofrecidas por DVB-T2, como ganancia en capacidad, cobertura y ganancia SFN. Igualmente se optimizan los retardos artificiales en los transmisores. El retardo artificial como su nombre lo indica es un retardo que se aplica a la señal de salida del transmisor para reducir las zonas de interferencia en la red SFN. Reduce las zonas de interferencias porque ayuda que la señal recibida contribuya constructivamente a la suma de potencia útil y por tanto ya no existe interferencia en ese punto.

Los datos de cobertura obtenidos en este proyecto son el resultado de simulaciones computacionales realizadas mediante la herramienta software ICS Telecom. La metodología de planificación y estimación de cobertura sigue las recomendaciones [UIT1368], [EBU3348], [TS102831] y del foro DVB [ETSI302755], [ETSIA14] para la planificación de redes de TDT.

Este proyecto ha sido realizado bajo el marco del proyecto de ciencia y tecnología entre la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia y el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la Universidad Politècnica de València (UPV). Asimismo los resultados obtenidos de este proyecto servirán como soporte para la publicación de un artículo en la Universidad Nacional de Colombia.

¹ http://www.rtv.gov.co/?option=com_contrat&task=showcontrat&tipo=3&id=172.

1.3 Objetivos

El objetivo general del proyecto es realizar un estudio para la optimización del diseño de red DVB-T para DVB-T2 el cual servirá para la provisión de servicios de TDT en toda Colombia. Este objetivo se subdivide en los siguientes objetivos específicos.

1. Aprender a planificar redes de TDT en configuraciones MFN (*Multi Frequency Network*) y SFN (*Single Frequency Network*) utilizando una herramienta de planificación de redes inalámbricas profesional.
2. Generar los patrones de radiación de las antenas transmisoras mediante un software profesional de diseño de antenas.
3. Modelar el diseño inicial de red DVB-T en configuración MFN fase I (14 Transmisores) del operador público Radio Televisión Nacional de Colombia (RTVC) evaluando cobertura e interferencias presentadas en la red.
4. Optimizar los retardos artificiales en los transmisores que ayudan a reducir zonas de interferencia en las redes de TDT.
5. Estudiar diferentes modos de transmisión DVB-T2 realizando ejercicios de cobertura e interferencia en la red de TDT que permitan evaluar las prestaciones de DVB-T2, tales como, ganancia en cobertura, capacidad y tamaño SFN frente a su antecesor DVB-T.
6. Recomendar un modo de transmisión para el despliegue de la red DVB-T2 en Colombia asegurando un compromiso en cobertura, capacidad y tamaño SFN.

1.4 Estructura de la memoria

El contenido del presente documento puede resumirse en los siguientes puntos:

En el capítulo dos explica los conceptos que intervienen en la estimación de cobertura en redes de TDT, se detallan los parámetros que actúan en el diseño de redes SFN, y se explica el procedimiento para el cálculo del link budget.

En el capítulo tres se exponen las tecnologías de TDT, se definen los estándares de televisión digital más importantes en el mundo: DVB-T y DVB-T2. Se profundizan sobre los principales parámetros de configuración de la red DVB-T2, tales como, modulación, codificación, tamaño de FFT e intervalo de guarda.

En el capítulo cuatro se detalla la metodología utilizada para la realización de este proyecto.

En el capítulo cinco se presentan los resultados de los ejercicios de cobertura e interferencia para el escenario proyectado por RTVC fase I (14 transmisores) que nos permitan estudiar la viabilidad de utilizar una única frecuencia para la provisión de servicios de TDT y evaluar prestaciones como ganancia en capacidad, cobertura, tamaño SFN para el nuevo estándar DVB-T2 comparado con su antecesor DVB-T.

En el capítulo seis resume las principales conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro que se extraen del proyecto.

2 Estimación de Cobertura en Redes de TDT

2.1 Topologías de red de TDT

Para realizar la planificación de una red de difusión de TV digital DVB-T en recepción fija y móvil se debe, en primer lugar, elegir una de las siguientes configuraciones de red posibles: MFN (*Multi Frequency Network*), SFN (*Single Frequency Network*) o una combinación de las dos:

2.1.1 Red MFN

Las redes de radiodifusión MFN trabajan con una frecuencia para cada transmisor y diferente entre transmisores adyacentes como se muestra en la Figura 3. Su planificación está ajustada a esquemas convencionales donde se debe garantizar la distancia suficiente entre transmisores con la misma frecuencia para evitar la interferencia cocanal. Las redes MFN son consideradas ineficientes espectralmente, ya que un canal RF no se puede reutilizar a menos que exista gran distancia entre transmisores. Sin embargo su gran ventaja es la posibilidad de emitir contenidos de carácter local.

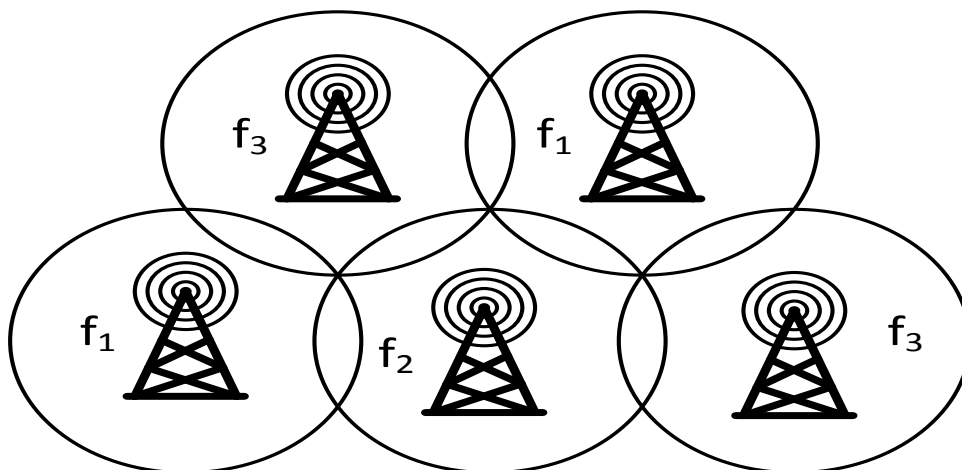


Figura 3. Topología de red MFN

2.1.2 Red SFN

Una Red SFN es una red en la que todos los transmisores emiten simultáneamente la misma señal a la misma frecuencia como se representa en la Figura 4. El receptor recibirá la misma señal proveniente de más de un transmisor, forzando una propagación multicamino. Este tipo de redes son posibles gracias a la modulación COFDM que proporciona inmunidad frente a ecos y la posibilidad de que éstos contribuyan constructivamente a la señal recibida. El principal motivo por el cual resulta interesante la implementación de redes SFN es una mayor eficiencia en la utilización de recursos radio consiguiendo aprovechar mejor el espectro.

Donde antes había un transmisor ahora puede haber varios, consiguiendo una distribución de cobertura más uniforme y evitando el sobredimensionamiento característico cuando se emplea un transmisor de alta potencia. Las redes SFN son ideales para transmisión de contenidos globales, pues es una única frecuencia para toda la red, y se presenta ganancia en regiones

donde hay cobertura de más de un transmisor. Gracias a la utilización de este tipo de redes se pueden disminuir las alturas de los transmisores, con lo que se produce un aumento de la inmunidad frente a interferencias.

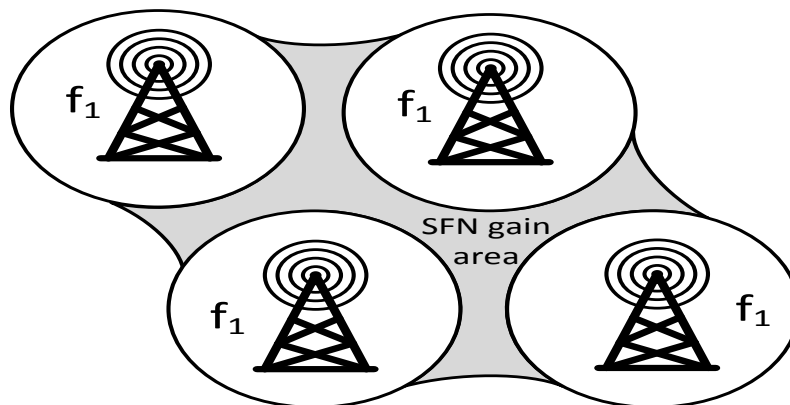


Figura 4. Topología de red SFN

Las principales ventajas de implementar una red SFN comparada con la convencional topología MFN son:

- Alta eficiencia espectral. En escenarios con escasos recursos espectrales disponibles es muy importante aumentar la eficiencia espectral ya sea para facilitar la transición de la televisión analógica a digital como para el aumento del número de programas disponibles a un largo plazo.
- En una red SFN la señal recibida es la superposición de varias señales provenientes de distintos transmisores. La probabilidad de interrupción del servicio es menor debido a que si en algún momento uno de las señales no está disponible las demás sí podrían estarlo. Este resultado se traduce en una alta probabilidad de localización comparada con una red de un único transmisor. Este fenómeno generalmente es considerado como ganancia de red o ganancia por diversidad.
- Como resultado de la ganancia de red, las topologías SFN pueden operar con menor potencia de transmisión y tener una cobertura más homogénea comparada con una red MFN.

Existen sin embargo algunas desventajas:

- La inserción de contenidos locales no es posible en redes SFN.
- Las topologías SFN requieren de un alto grado de sincronización a nivel de tiempo, frecuencia y bit.
- El uso de altas potencia de transmisión y dependiendo de la distancia entre transmisores se puede generar interferencia en áreas de cobertura el retardo de llegada de una señal a otra es mayor que el intervalo de guarda del sistema.

2.2 Modulación OFDM

La modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) consiste en enviar un conjunto de portadoras en diferentes frecuencias, donde cada una transporta información modulada en QAM o en PSK. Normalmente se realiza la multiplexación OFDM tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la

transmisión, entonces esta multiplexación se denomina COFDM (del inglés *Coded OFDM*). Las portadoras mantienen una ortogonalidad en el dominio de la frecuencia, situándose la energía de cada una de ellas en el cruce por cero de cualquier otra, facilitando la modulación como se muestra en la Figura 5. Para lograr esta ortogonalidad y evitar la interferencia entre símbolos, el espacio entre portadoras debe ser igual a la inversa del periodo de símbolo.

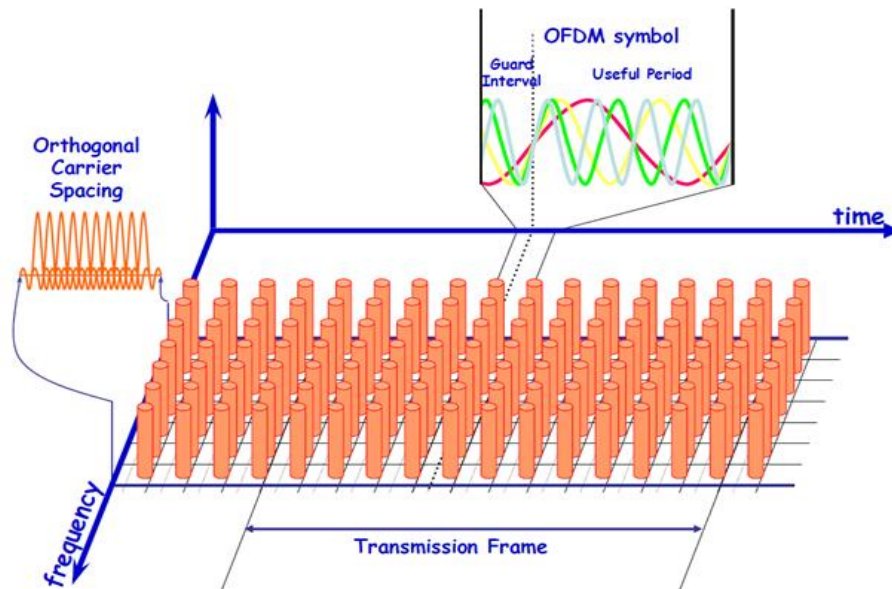


Figura 5. Concepto general de la modulación OFDM

COFDM es muy robusta frente al multitrayecto (*multi-path*), que es muy habitual en los canales de radiodifusión, frente a las atenuaciones selectivas en frecuencia y frente a las interferencias de RF. Debido a las características de esta multiplexación, es capaz de recuperar la información de entre las distintas señales con distintos retardos y amplitudes (*fading*) que llegan al receptor. Esta característica supondrá una ventaja en cuanto a la implementación de redes SFN que, como se verá más adelante, pueden tratarse como una propagación multicamino artificial ya que lo que se tendrá es un receptor que recibe señales de varios transmisores que difunden la misma señal en la misma frecuencia.

2.3 Efecto multitrayecto en redes SFN

En una red SFN múltiples copias de la señal original llegan con diferentes tiempos de retardo a la antena del receptor como se representa en la Figura 6. El tiempo de retardo es causado básicamente por dos mecanismos: el “natural” que es generado por efectos de reflexión de la onda en obstáculos presentes en el escenario, y el “artificial” derivado de la recepción de señales provenientes de transmisores cercanos. El retardo natural es generalmente limitado a 20-30 μs correspondiente a una variación en la propagación de la señal de hasta 10 km. Teniendo en cuenta que la duración de los símbolos OFDM son mucho más largos que estos tiempos “naturales” de retardo, en la mayoría de los casos se pueden considerar despreciables y por tanto la interferencia inter-símbolo es causada mayoritariamente por los retardos “artificiales”. Sin embargo el escenario colombiano es muy montañoso y su orografía puede generar tiempos de retardo significativos que deben ser tenidos en cuenta en la planificación.



Figura 6. Efecto multitrayecto en redes de radiodifusión

En sistemas OFDM la distribución de retardos experimentada por la señal es controlada por la longitud del símbolo transmitido y la fracción de intervalo de guarda definido para el mismo. Si los retardos experimentados por la señal son menores que el tiempo del intervalo de guarda, no se presenta interferencia inter-símbolo (*ISI por sus siglas en inglés*) y las señales contribuirán totalmente a la señal útil o deseada. Por el contrario si las señales provienen de transmisores muy lejanos y su tiempo de llegada esta por fuera del intervalo de guarda, estas señales causan ISI y son consideradas interferentes. Por lo tanto en redes SFN no solo el ruido sino también las señales que llegan fuera del intervalo de guarda tienen un importante impacto en la máxima cobertura obtenida

2.4 Intervalo de ecualización (IE) y función de ponderación en DVB-T2

El intervalo de ecualización (IE) es considerado como el intervalo de tiempo en el cual las señales DVB-T2 que arriban al receptor pueden ser correctamente ecualizadas. El límite teórico de este intervalo de ecualización o máximo tiempo de retardo que una señal puede tener con respecto a la primera señal en llegar al receptor para contribuir constructivamente es conocido como el tiempo de Nyquist (T_p). En DVB-T2 este tiempo de Nyquist y la posición de inicio del IE dependen del patrón de portadoras piloto seleccionado y del método de interpolación implementado en el receptor (interpolación en tiempo y frecuencia o solo en frecuencia). En DVB-T el patrón de portadoras es fijo y por lo tanto la duración del IE también es fija ($T_u/3$, donde T_u es el tiempo útil del símbolo OFDM). La Tabla 1 resume los tiempos de Nyquist disponibles en un sistema DVB-T2 en función del patrón de portadoras piloto y del tipo de interpolación implementado en el receptor.

Es importante resaltar que el *IE* es un intervalo y no un valor y por lo tanto puede ser considerado como una “ventana de ecualización”. Las señales que llegan al receptor con un tiempo de retardo relativo (t) dentro del *IE* contribuyen constructivamente a la decodificación de la información, por el contrario las señales que llegan por fuera del este intervalo son consideradas totalmente interferentes.

Patrón de Pilotos	Dx (Separación en portadoras)	Dy (Nº de símbolos formando una secuencias de pilotos dispersos)	Límite de Nyquist como fracción del T_u (interpolación en Frecuencia)	Límite de Nyquist como fracción del T_u (interpolación en Tiempo y Frecuencia)
PP1	3	4	1/12	1/3
PP2	6	2	1/12	1/6
PP3	6	4	1/24	1/6
PP4	12	2	1/24	1/12
PP5	12	4	1/48	1/12
PP6	24	2	1/48	1/24
PP7	24	4	1/96	1/24
PP8	6	16	1/96	1/6

Tabla 1. Límite de Nyquist para interpolación en tiempo y frecuencia

La función de ponderación $W_i(t)$ que establece la contribución útil o interferente de una i -ésima señal dependiendo de su tiempo relativo de llegada t es definido en la ecuación 1.

$$W_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } t \notin IE \\ \left(\frac{T_u + t}{T_u}\right)^2, & \text{if } t \in IE \text{ \& } t < 0 \\ 1, & \text{if } t \in IE \text{ \& } 0 \leq t \leq T_g \\ \left(\frac{T_u + T_g - t}{T_u}\right)^2, & \text{if } t \in IE \text{ \& } t > T_g \end{cases} \quad (1)$$

Donde IE es el intervalo de ecualización (la duración máxima es el tiempo de Nyquist T_p), T_u es el tiempo útil del símbolo OFDM y T_g es el tiempo del intervalo de guarda. Para mayor claridad, la función de ponderación $W_i(t)$ es representada en la Figura 7.

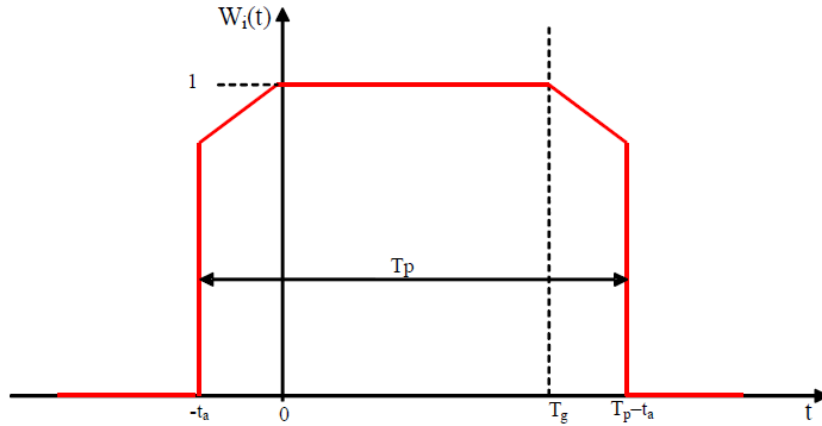


Figura 7. . Función de ponderación $W_i(t)$ con un intervalo de ecualización (IE) comenzando en t_a .

2.5 Combinación de señales OFDM

El cálculo de la relación CINR requiere la suma ponderada de las potencias recibidas de cada una de las señales útiles e interferentes provenientes de cada transmisor. Para determinar la cobertura de la red, idealmente se debería calcular el nivel de señal recibida en un número infinito de puntos dentro del área de servicio. Al no ser posible, el nivel de señal se determina en un conjunto finito de áreas, modelándose mediante una variable log-normal caracterizada por su valor medio y su desviación típica. En cada punto de test, el valor medio de la señal es calculado con el software profesional ICS Telecom, descrito en la sección 4.3, para este cálculo se hace uso de la cartografía digital de terreno disponible y del modelo de propagación ITU-526. La desviación típica se suele considerar de 5.5 dB para áreas de 100 m x 100 m de acuerdo a las recomendaciones [EBU3348]. Se debe tener en cuenta que en caso de considerar áreas más pequeñas, la desviación típica es menor.

Asumiendo que la suma de variables aleatorias log-normales se puede aproximar por otra variable aleatoria log-normal, la relación portadora a ruido CINR es una variable aleatoria del mismo tipo cuya media y desviación típica se deben determinar. Existen varios métodos que modelan la suma de variables aleatorias con distribución log-normal, entre ellos el método log-normal [PIR103] y el de Schwarz & Yeh [SCH82].

La correlación entre las señales que llegan al receptor depende de varios factores, como pueden ser la dirección de llegada de las mismas y de la distancia entre los transmisores de los cuales provienen. Conforme mayor sea la correlación entre las señales que llegan al transmisor, menor será la cobertura proporcionada por la red. Los métodos de suma de variables aleatorias con distribuciones log-normal mencionadas anteriormente requieren un tratamiento especial en caso de que haya correlación entre las variables. Existen métodos que tienen en cuenta esta correlación, como son el método de Safak [SAF93], que es una generalización del de Schwarz & Yeh para variables entre las que existe correlación y el método de Wilkinson [PIR103].

2.5.1 Método de suma de potencias

En el software de planificación ICS Telecom utiliza el método de la suma de potencias. En este método el nivel de señal es calculado por una sumatoria no estadística de las señales de potencia individuales. La señal útil en una SFN, es representada por la suma de las potencias de las señales útiles. Para las señales no deseadas, los valores medios de potencias son sumados al mínimo nivel de señal útil presente (representando la contribución del ruido). En televisión

analógica un 50% de la localización es cubierta si obtiene que la suma de las señales no deseadas sea igual a la suma de los niveles de señal deseados. En televisión digital, un margen de protección debe ser añadido a la suma de las señales no deseadas en orden de cubrir con un porcentaje de localización de más del 50%. Este margen de protección está definido por el porcentaje objetivo de cobertura. Este valor no es derivado por el método de la suma de potencias. Usualmente su valor se deriva de la desviación estándar de una de las señales utilizadas.

Si el valor medio de la señal en dB es denotado por F , podemos definir la potencia P por la ecuación 2 como:

$$P = 10^{\frac{F}{10}} \quad (2)$$

Para n individuales señales las respectivas potencias son sumadas como indica en la ecuación 3:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n p_i \quad (3)$$

Y el valor medio F_{Σ} (en dB) es calculado como se indica en la ecuación 4:

$$F_{\Sigma} = 10 * \log_{10}(P_{\Sigma}) \quad (4)$$

2.6 Derivación de las relaciones portadora a ruido (CNR) utilizadas en planificación

Los umbrales mínimos de CNR en dB requeridos para una correcta decodificación² son resumidos en las guías de implementación de la [ETSI TS 102 831] para distintos canales de recepción. Debido a la ausencia de medidas de rendimiento de receptores reales DVB-T2, Los valores de CNR han sido obtenidos a partir de simulaciones computacionales.

En las recomendaciones [EBU3348] se propone una metodología de corrección de dichos valores de CNR con el ánimo de describir el comportamiento promedio de los receptores reales los cuales son utilizados en procesos de planificación de redes DVB-T2.

La metodología propuesta parte de los valores de CNR simulados para canal Gaussiano AWGN presentados en [TS 102 831] y resumidos en la Tabla 2, los cuales son válidos para cualquier tipo de canalización (6 MHz, 7 MHz, 8 MHz, etc.).

para conseguir un BER=10⁻⁶ después del codificador BCH.

Constelación	Tasa de Codificación	CNR (dB) Canal AWGN
QPSK	1/2	1.0
	3/5	2.2
	2/3	3.1
	3/4	4.1
	4/5	4.7
	5/6	5.2
16QAM	1/2	6.2
	3/5	7.6
	2/3	8.9
	3/4	10.0
	4/5	10.8
	5/6	11.3
64QAM	1/2	10.5
	3/5	12.3
	2/3	13.6
	3/4	15.1
	4/5	16.1
	5/6	16.7
256QAM	1/2	14.4
	3/5	16.7
	2/3	18.1
	3/4	20.0
	4/5	21.3
	5/6	22.0

Tabla 2. Relación de CNR (dB) para canales AWGN definidos en [TS 102 831]

Posteriormente, a estos valores se agrega los siguientes cinco factores de corrección que permitan emular el rendimiento de un receptor real:

1. Los valores de CNR han sido calculados para un $BER=10^{-6}$ después del codificador BCH, por tanto se debe sumar 0.1 dB para conseguir un $BER=10^{-7}$ después del LDPC.
2. Un factor de corrección por ajuste de potencia de las portadoras piloto. (Tabla 2.10 de la [EBU3348]) que depende del PP que se quiere utilizar.
3. Un factor de corrección por estimación real del canal y márgenes de diseño en la fabricación de los receptores reales (Tabla 2.10 de la [EBU3348]).
4. Factor para compensar el nivel back-stop noise a -33 dBc generado principalmente por el ruido de sintonización de fase y el ruido de ecualización (Tabla 2.11 de la [EBU3348]).
5. Delta para ajuste a canales Rice y Rayleigh (Tabla 2.13 de la [EBU3348]).

A manera de ejemplo, la Tabla 3 muestra los umbrales de CNR establecidos por la norma [TS 102 831] y los obtenidos para propósitos de planificación aplicando los factores de corrección para algunos de los modos de transmisión DVB-T2 utilizados en este proyecto.

		CNR (dB)	
		AWGN ³	canal Rice ⁴
Modo de Transmisión	16QAM, CR 3/4, FFT 8KE, PP1, GI 1/4.	10.0	12.97
	16QAM, CR 3/5, FFT 16KE, PP3, GI 1/8.	7.60	9.97
	64QAM, CR 3/5, FFT 32KE, PP2, GI 1/8.	12.30	15.2

Tabla 3. Umbrales de CNR utilizados para los ejercicios de planificación

2.7 Cálculo de la relación portadora a ruido más Interferencia (CINR)

Un receptor DVB-T2 puede operar satisfactoriamente en una localización determinada cuando la relación Portadora a Ruido más Interferencia (*CINR*) es mayor o igual a la mínima CNR requerida por el sistema (umbral descrito en la sección 2.6). Por lo tanto para propósitos de planificación y estimación de cobertura de una red DVB-T2 es necesario evaluar el valor de *CINR* en cada punto del escenario objetivo. La ecuación 5 define la *CINR* en cada punto de test en función de potencia recibida de cada transmisor P_{Tx_i} de la red SFN y de su aporte constructivo o destructivo dependiendo del retardo relativo de llegada y descrito por la función de ponderación $W_i(t)$.

³ Umbrales establecidos en [TS102831]

⁴ Umbrales después de las correcciones descritas en la recomendación [EBU3348].

$$CINR = \frac{C}{I_{self} + I_{ext} + P_N} = \frac{\sum_i P_{Tx_i} \cdot W(t_i - t_o)}{\sum_i P_{Tx_i} \cdot [1 - W(t_i - t_o)] + I_{ext} + P_N} \quad (5)$$

Donde, C es la potencia útil, I_{Self} es la interferencia producida por la propia red, I_{Ext} son las interferencias externas. P_{Tx_i} y t_i son la potencia recibida y el tiempo de llegada de la señal proveniente del transmisor i -esimo de la red, t_o es el instante de sincronización temporal y P_N es la potencia de ruido térmico.

2.8 Tipos de recepción

Para los estudios de planificación y simulaciones computacionales desarrollados en el marco de este proyecto se consideraran condiciones de recepción fija y recepción portable.

Recepción fija: se caracteriza porque utilizan antenas receptoras directivas, ubicadas a nivel del tejado de los hogares con una visión directa del transmisor, tomando un valor representativo de 10 m sobre el nivel del suelo, con unas ganancias de 11 dB en la banda de frecuencias UHF.

Recepción portable: se consideran antenas omnidireccionales, situadas a 1.5 metros sobre el nivel del suelo y con una ganancia de 0 dB. Para este tipo de recepción se considera que el usuario no está en movimiento y tan solo recibe la señal en equipo portátiles o de mano. En recepción portable las pérdidas por alimentación son 0 dB respecto a recepción fija que tiene unas pérdidas de 4 dB. Cuando se considera recepción indoor es necesario tener en cuenta unas pérdidas de penetración que dependen del tipo de material y de la ubicación dentro de la edificación.

El factor de corrección es requerido para asegurar un mínimo porcentaje de cobertura en los bordes del área del servicio. Los valores presentados en la tabla corresponden a una buena calidad de cobertura (i.e 95 % para recepción fija y portable). La Tabla 4 muestra los aspectos más relevantes entre los dos tipos de recepción fija y portable.

			Tipo de Recepción		
			Fija	Portable indoor	Portable outdoor
Perdidas en los alimentadores	L_f	dB	4,0	0,0	0,0
Perdidas por penetración en edificios o vehículos	L_b, L_h	dB	0,0	11,0	0,0
Perdidas por altura		dB	0,0	17	17
Perdidas por desvanecimiento Multicamino		dB	0,6	2,4	2,4
Desviación estándar pérdidas por penetración		dB	0,0	6,0	0,0
Margen para el ruido artificial	P_{mmn}	dB	0,0	1,0	1,0
Ganancia antena del receptor	G_d	dB	11,0	0,0	0,0
Factor de corrección por localización 95 %	CI	dB	9,0	13,0	13,0

Tabla 4. Parámetros adicionales para el balance de enlace en función del tipo de recepción.

Valores tomados de la Norma [EBU 3348]

2.9 Link budget

El link budget son las ganancias y pérdidas que se experimentan entre el transmisor y el receptor en un sistema de telecomunicaciones. El objetivo de este balance de enlace es contemplar todos los posibles factores que afectan el sistema de comunicación y en este caso particularmente a un sistema DVB-T2.

La potencia a la entrada del receptor se expresa de acuerdo a la ecuación 6:

$$Prx = Ptx - Ltx - Lfs - Lo + Gtx - Lrx + Grx \quad (6)$$

Donde Prx es la potencia recibida, Ptx representa la potencia transmitida, Ltx significa las pérdidas en el transmisor, Lfs son las pérdidas en espacio libre, Lo representa otras pérdidas, Gtx indica la ganancia de la antena transmisora, Lrx son las pérdidas en el receptor y Grx es la ganancia del receptor.

Para el link budget se tendrán en cuenta la recomendación [TS 102831]. Dicho balance nos servirá para conocer el valor medio de intensidad de campo mínimo a la entrada del receptor para hacer la estimación de cobertura. La estimación de cobertura de una red TDT se basa en estimar la cantidad de usuarios o puntos del escenario donde se superan los umbrales mínimos de intensidad de campo eléctrico en ciertas condiciones de recepción y con una determinada probabilidad.

2.9.1 Cálculo del link budget

Una vez se tiene definida la mínima CNR requerida por un determinado modo de transmisión DVB-T2 se puede derivar cual es el mínimo nivel de señal requerido en recepción P_s . En las guías de planificación de DVB-T [ETSI 101190] se sugiere una figura de ruido en el receptor F de 7 dB. Sin embargo, en las recomendaciones [EBU 3348] se sugiere la actualización de dicho valor F a 6 dB, teniendo en cuenta las mejoras tecnológicas conseguidas a día de hoy en el diseño de receptores DVB-T2. A partir de esta figura de ruido y dependiendo del ancho de banda de canal se puede estimar el nivel de la Potencia de Ruido P_n como se expresa en la ecuación 7:

$$P_n = F + 10 \log_{10}(KT_oB) \quad (7)$$

Donde K es la constante de Boltzmann, T_o equivale a la temperatura absoluta y B representa el ancho de banda del canal. Como se puede observar, este nivel de P_n depende del ancho de banda y por tanto es uno de los niveles que marca diferencia cuando se utiliza canalización 6 MHz con respecto a los valores para 8 MHz que generalmente aparecen en las guías de planificación. La utilización de los modos extendidos de DVB-T2 (8KE, 16KE y 32KE) incrementan en una muy pequeña proporción el ancho de banda del canal y por tanto se puede asumir el mismo valor de P_n del modo normal. Conociendo la mínima CNR requerida y el nivel de P_n es posible estimar el nivel de potencia mínimo requerido a la entrada del receptor P_{s_min} de acuerdo con ecuación 8.

$$P_{s_min} = \frac{C}{N} + P_n \quad (8)$$

El nivel de potencia mínimo requerido no tiene en cuenta ningún efecto de propagación. Por tanto para efectos de planificación de redes de televisión digital y manteniendo el criterio de planificación de la televisión analógica, es necesario establecer la mínima intensidad de campo eléctrico E_{min} requerida para un determinado modo de transmisión DVB-T2. El primer paso para definir la E_{min} es establecer la Densidad de flujo de potencia mínima en recepción (Φ_{min}), la cual depende de la P_{s_min} y de la apertura efectiva de la antena como lo muestra la ecuación 9:

$$\Phi_{min} = P_{s_min} - Aa = P_{s_min} - G_{ant} - 10 \log_{10} \left(1,64 * \frac{\lambda^2}{4 * \pi} \right) \quad (9)$$

El siguiente paso es evaluar el valor medio mínimo de la densidad de flujo de potencia (Φ_{med}), a partir de la densidad de flujo de potencia mínima en recepción, el margen del ruido artificial (P_{mnm}), factor de corrección de emplazamiento (Cl), Perdidas en altura, (Lh), Perdidas en penetración, (Lb), Perdidas en alimentador, (Lf). Teniendo en cuenta estos efectos de propagación, el valor de (Φ_{med}) puede ser calculado de acuerdo a la ecuación 10:

$$\Phi_{med} = \Phi_{min} + P_{mnm} + Cl + Lh + Lb + Lf \quad (10)$$

Por último, calculamos el valor medio mínimo de intensidad de campo, (E_{med}), requerido a la entrada del receptor, de acuerdo a la ecuación 11.

$$E_{med} = \Phi_{med} + 120 + 10 * \log_{10} (120 * \pi) \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que la E_{min} contempla los diferentes efectos de la propagación, es necesario estimar su mínimo valor para diferentes condiciones de recepción tales como fija, portable o móvil. Adicionalmente, en planificación es necesario tener en cuenta la rápida transición de una perfecta recepción a una no recepción con un pequeño cambio en la posición del receptor. Para ello se definen en planificación umbrales mínimos de E_{min} que deben ser superados en un alto porcentaje de localización. Estos porcentajes ha sido definidos como 70% (cobertura aceptable) y 90% (cobertura buena) para recepción fija, 70% (cobertura aceptable) y 95% (cobertura buena) para recepción portable y 90% (cobertura aceptable) y 99% (cobertura buena) para recepción móvil.

2.9.2 Diferencias cálculo del link budget DVB-T Vs DVB-T2

El objetivo del link budget como antes se menciona es contemplar todos los posibles factores que afectan el sistema de comunicación y en este caso particularmente a un sistema de Televisión Digital Terrestre. Dicho balance permite establecer el valor medio de intensidad de campo mínimo a la entrada del receptor para hacer la estimación de cobertura. A pesar de pertenecer a la misma familia de estándares DVB, existen algunas diferencias importantes entre las más recientes recomendaciones para el cálculo del link budget en un sistema DVB-T [ETSI 101190] y las recomendaciones de un sistema DVB.T2 [ETSI 302755]. Estas diferencias son debidas principalmente al desarrollo de campañas de medida en campo y laboratorio más exhaustivas y a la utilización de tecnologías más recientes.

La Tabla 5 resume las principales diferencias entre las recomendaciones de cálculo del link budget de DVB-T y DVB-T2.

Parámetro	Recomendación DVB-T	Recomendación DVB-T2	Observaciones
Calculo de la CNR	Estimado a partir de simulaciones [RRC06].	Estimado a partir de simulaciones. Incluye factores de corrección A, B, C y D norma [EBU3348].	DVB-T2 requiere menos CNR que DVB-T para un mismo modo de transmisión, aprovechando los factores de corrección, uno de ellos la codificación FEC.
Factor de ruido	7 dB de acuerdo a la norma [ETSI101190]	6 dB de acuerdo a la norma [EBU3348]	DVB-T2 1 dB menos respecto DVB-T teniendo en cuenta las mejoras tecnológicas conseguidas a día de hoy en el diseño de receptores DVB-T2.
Perdidas por penetración	8 dB de acuerdo a la norma [RRC06]	11 dB de acuerdo a la norma [EBU3348]	DVB-T2 3 dB más respecto DVB-T debido principalmente a las campañas de medida realizadas en cada norma y correcciones en los valores obtenidos[ETSI102377]
Perdidas por altura	16 dB de acuerdo a la norma [RRC06] para la banda IV en un escenario suburbano.	17 dB de acuerdo a la norma [EBU3348] para la banda IV/V en un escenario suburbano.	DVB-T2 1 dB más respecto DVB-T debido principalmente diferentes criterios de cálculo en las normas.
Min. Equivalent receiver input voltage, 75 ohm	27.5 dB μ V para entorno portable indoor.	24.8 dB μ V para entorno portable indoor.	DVB-T2 frente DVB-T diferencia por los valores entre CNR y factor de ruido.

Tabla 5. Diferencias Cálculo del Link budget DVB-T Vs DVT-T2

A manera de ejemplo la Tabla 6 compara el cálculo de E_{min} para un sistema DVB-T (16QAM, CR 3/4, FFT 8K, GI 1/4) y un sistema DVB-T2 (64QAM, CR 3/5, FFT 16KE, GI 1/8), se puede observar las diferencias ente DVB-T Vs DVB-T2. Para el modo DVB-T2 escogido se mantiene la distancia entre transmisores SFN de 90 Km pero aumenta la capacidad de transmisión.


DVB-T Vs DVB-T2 			Fixed		Portable indoor		Portable outdoor	
			DVB-T	DVB-T2	DVB-T	DVB-T2	DVB-T	DVB-T2
Frequency	Freq	MHz	485,0	485,0	485,0	485,0	485,0	485,0
Minimum CIN required by system	CIN	dB	15,7	14,7	18,1	16,4	18,1	16,4
System Variant(Example)			DVB-T:16-QAM, FEC 3/4 , FFT 8K. Vs DVB-T2:64-QAM, FEC 3/5 ,FFT 16KE, PP3.					
Receiver Noise Figure	F	dB	7,0	6,0	7,0	6,0	7,0	6,0
Equivalent noise band width	B	MHz	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78	5,78
Receiver noise input power	Pn	dBW	-129,4	-130,4	-129,4	-130,4	-129,4	-130,4
Min. receiver signal input power	Ps min	dBW	-113,7	-115,7	-111,3	-114,0	-111,3	-114,0
Min. Equivalent receiver input voltage, 75 ohm	U min	dBuV	25,1	23,1	27,5	24,8	27,5	24,8
Feeder loss	Lf	dB	3,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Antenna gain relative to half dipole	Gd	dB	10,1	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Effective antenna aperture	Aa	dB²	-3,4	-2,0	-13,0	-13,0	-13,4	-13,0
Min Power flux density at receiving location	Φ min	dB(W)/m²	-107,2	-109,6	-98,2	-100,9	-97,9	-100,9
Min equivalent field strength at receiving location	Emin	dBuV/m	38,6	36,2	47,6	44,9	47,9	44,9
Allowance for main-made noise	Pmmn	dB	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
Penetration loss (Building or Vehicle)	Lb	dB	0,0	0,0	8,0	11,0	0,0	0,0
Height loss	Lh	dB	0,0	0,0	16,0	17,0	16,0	17,0
Standard derivation of the penetration loss		dB	0,0	0,0	6,0	6,0	0,0	0,0
Diversity gain	Div	dB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Location Probability		%	70	70	70	70	70	70
Distribution factor	μ		0,5244	0,5244	0,5244	0,5244	0,5244	0,5244
Standard deviation	σ		5,5	5,5	8,1	8,1	5,5	5,5
Location correction factor	Cl	dB	2,8842	2,8842	4,2476	4,2476	2,8842	2,8842
Minimum median power flux density at reception height ; 50 % time and 50% locations	Φ med	dB(W)/m²	-104,3	-106,8	-70,0	-67,7	-79,0	-80,1
Minimum median equivalent field strength at reception height; 50 % time and 50 % location	Emed_15m	dBuV/m	41,5	39,0	75,8	78,1	66,8	65,7
Location Probability		%	95	95	95	95	95	95
Distribution factor			1,6449	1,6449	1,6449	1,6449	1,6449	1,6449
Standard deviation			5,5	5,5	8,1	8,1	5,5	5,5
Location correction factor	Cl	dB	9,0470	9,0470	13,3237	13,3237	9,0470	9,0470
Minimum median power flux density at reception height ; 50 % time and 50% locations	Φ med	dB(W)/m²	-98,2	-100,6	-60,9	-58,6	-72,9	-73,9
Minimum median equivalent field strength at reception height; 50 % time and 50 % location	Emed_15m	dBuV/m	47,6	45,2	84,9	87,2	72,9	71,9

Tabla 6. Calculo link budget DVB-T Vs DVB-T2

3 Tecnologías de TDT

3.1 DVB-T

El estándar DVB-T forma parte de toda una familia de estándares de televisión digital terrestre, DVB, que se divide según diversas tecnologías:

- DVB-T: emitido a través la red de distribución terrestre de señal utilizada en la antigua televisión analógica tradicional.
- DVB-S: emitido desde satélites geoestacionarios (GEO).
- DVB-C: emitido vía cable.
- DVB-H: destinado a emisiones a dispositivos móviles con reducida capacidad de procesamiento.
- DVB-IPTV: destinado a emisión de televisión por Internet (ADSL).
- DAB: utilizado para las emisoras de radio en formato Radio-digital.
- DVB-T2: evolución del estándar DVB-T.

El estándar DVB-T se diseñó teniendo en cuenta dos requisitos importantes. Por un lado, debía coexistir con la transmisión de televisión analógica, con lo cual se debía definir un sistema robusto frente a interferencias cocanal. Por otra parte se requería alta eficiencia espectral, ya que las bandas utilizadas (UHF y VHF) se encuentran muy saturadas actualmente. DVB-T ha definido un sistema empleando modulación COFDM (*Code Orthogonal Frequency Division Multiplex*), capaz de ofrecer capacidades que van desde 5 Mb/s hasta 32 Mb/s en anchos de banda del canal de 6, 7 u 8 MHz, lo cual significa que en un canal de televisión analógico se puede transmitir hasta 6 canales digitales. Por otra parte, la utilización del espectro es óptima gracias a la posibilidad de implementar redes SFN.

3.1.1 Tamaño de la FFT

El estándar contempla dos modos a la hora de realizar la FFT (*Fast Fourier Transform*) de la señal: 2K y 8K. Tomando canales de 8 MHz, el número de portadoras en el sistema para el caso de 8K será de 6817 (6048 útiles, el resto para señalización y sincronización) y en el caso de 2K serán 1705 (1512 útiles). Dependiendo de estos dos modos, el periodo de símbolo tomara distintos valores y, de igual modo, el intervalo de guarda se verá afectado. Un tamaño de FFT mayor provoca que la densidad de portadoras sea mayor y, por tanto, disminuya la separación entre las mismas. Una menor separación entre portadoras provoca un mayor tiempo útil y a su vez un mayor tiempo de intervalo de guarda, permitiendo una mayor distancia entre transmisores. Adicionalmente, una menor separación entre portadoras limita el máximo Doppler permitido y por tanto la velocidad máxima a la que puede desplazarse un receptor móvil.

3.1.2 Intervalo de guarda

El intervalo de guarda es considerado como el tiempo de espera entre un símbolo OFDM y otro, permitiendo la contribución positiva a la señal útil, de señales con tiempo de retardo inferior a este. Las señales o ecos con tiempo de llegada superior al intervalo de guarda son considerados como interferencia. El estándar DVB-T contempla cuatro posibles longitudes para este intervalo de guarda, definido como una fracción del periodo total del símbolo: 1/4, 1/8, 1/16 o 1/32. Cuanto mayor sea el intervalo de guarda, el retardo de los ecos que podrán contribuir positivamente en la señal será mayor, proporcionando una mayor distancia máxima entre transmisores, a costa de una disminución de la capacidad del sistema. Por otro lado un mayor tiempo de guarda redundante en la mejora de la ganancia de la red SFN dando así una alta probabilidad de cobertura.

3.1.3 Modulación y codificación (MODCOD)

Los tipos de modulación posibles en el estándar DVB-T son tres: QPSK, 16-QAM, 64-QAM y esquemas de modulación jerárquica. El tipo de modulación utilizada está relacionada directamente con la eficiencia espectral y la robustez de la señal. Conforme aumentemos el orden de la modulación, la modulación tendrá mayor eficiencia espectral (incremento de la velocidad de transmisión manteniendo el ancho de banda). Sin embargo, aumentar el número de bits implica una reducción de la inmunidad frente al ruido.

El esquema de transmisión de DVB-T utiliza un codificador convolucional con el fin de corregir errores en la transmisión, las posibles tasas que refleja el estándar son: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8. Un aumento de bits redundantes proporciona mayor robustez al sistema, a costa de una disminución de la capacidad del sistema. En condiciones de recepción fija con antena en tejados, bajos valores de tasa de codificación pueden ser utilizados (2/3, 3/4); sin embargo y aun si el consumo de *bit rate* útil es alto, fuertes tasas de codificación son requeridas para ayudar al receptor a compensar las degradaciones experimentadas en ambientes móviles.

3.2 DVB-T2

DVB-T2 es el estándar de segunda generación para la radiodifusión de servicios de Televisión Digital Terrestre (TDT) a receptores fijos, portables y móviles. DVB-T2 se ha convertido en el medio de transporte más eficiente para la radiodifusión de servicios de TV en alta definición (HDTV) y televisión tridimensional (3DTV) en aquellos países pioneros que ya han desplegado redes TDT de segunda generación tales como UK, Italia, Suecia y Finlandia.

DVB-T2 es el más avanzado sistema de transmisión para TDT con un alto grado de eficiencia, flexibilidad y robustez que ningún otro estándar puede igualar, entre sus características encontramos la gran flexibilidad de configuración y mejora en rendimiento comparado con su antecesor DVB-T y con el estándar de televisión diseñado inicialmente en Japón, modificado en Brasil y adoptado en la mayor parte de los países de América del Sur conocido como ISDB-TB.

3.2.1 Tamaño de la FFT

El estándar DVB-T2 contempla nueve modos a la hora de realizar la FFT (*Fast Fourier Transform*) de la señal (1k, 2k, 4k, 8k, 8k extendido, 16k, 16k extendido, 32k, 32k extendido).

La Tabla 7 resume las principales características de cada modo FFT.

	Tamaño de FFT					
	1K	2K	4K	8K	16K	32K
Nº de portadoras modo normal	853	1705	3409	6817	13633	27265
Nº de portadoras modo Extendido	NA	NA	NA	6913	13921	27841
Ganancia Nº portadoras	0%	0%	0%	1.41%	2.11%	2.11%
Duración de símbolo [us]	149	298	596	1192	2384	4768
Separación entre portadoras [Hz]	6711	3355	1677	838	419	209
Ancho de banda Modo Normal [MHz]	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71
Ancho de banda Modo extendido [MHz]	NA	NA	NA	5.78	5.83	5.83

Tabla 7. Características de los tamaños de FFT @ 6 MHz

Un tamaño de FFT mayor provoca que la densidad de portadoras sea mayor y, por tanto, disminuya la separación entre las mismas. Una menor separación entre portadoras provoca un mayor tiempo útil y a su vez un mayor tiempo de intervalo de guarda, permitiendo una mayor distancia entre transmisores. Adicionalmente, una menor separación entre portadoras limita el máximo Doppler permitido y por tanto la velocidad máxima a la que puede desplazarse un receptor móvil.

3.2.2 Intervalo de guarda (GI)

El intervalo de guarda es un periodo de tiempo sin información útil que es insertado al inicio de cada símbolo OFDM para reducir el efecto de la interferencia entre símbolos que se produce debido al efecto multitrayecto o a los ecos propios de una red SFN. Para generar este GI se toma un segmento de la última parte del símbolo útil y se replica al inicio del mismo símbolo como se muestra en la Figura 8.

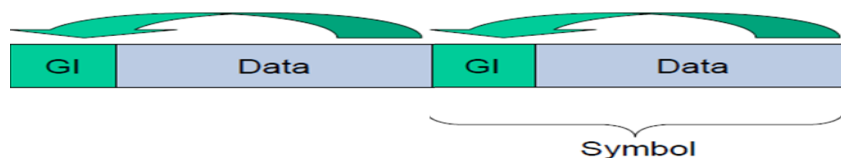


Figura 8 Generación del Intervalo de Guarda (GI)

En DVB-T2 La duración del GI es un porcentaje del tiempo útil de símbolo y puede tomar valores de 1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16 o 1/32, 1/128. La Tabla 8 resume las distintas duraciones del tiempo de guarda en función del tamaño de FFT.

		Intervalo de Guarda (GI) en μs						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
Tamaño de FFT	32K	37	150	298	354	597	709	-
	16K	18	74	150	177	298	354	597
	8K	9	37	74	88	150	177	298
	4K	-	18	37	-	74	-	150
	2K	-	9	18	-	37	-	74
	1K	-	-	9	-	18	-	37

Tabla 8. Tiempos de guarda disponible en un sistema DVB-T2 @6MHz

Mientras el retardo de las señales de eco sea menor que el intervalo de guarda, existirá un beneficio constructivo en la recepción como se puede apreciar en la Figura 9, de lo contrario se presentará un efecto de interferencia. La desventaja de la introducción del intervalo de guarda estriba en una reducción de la eficiencia espectral, ya que hay que transmitir muestras que no aportan información útil.

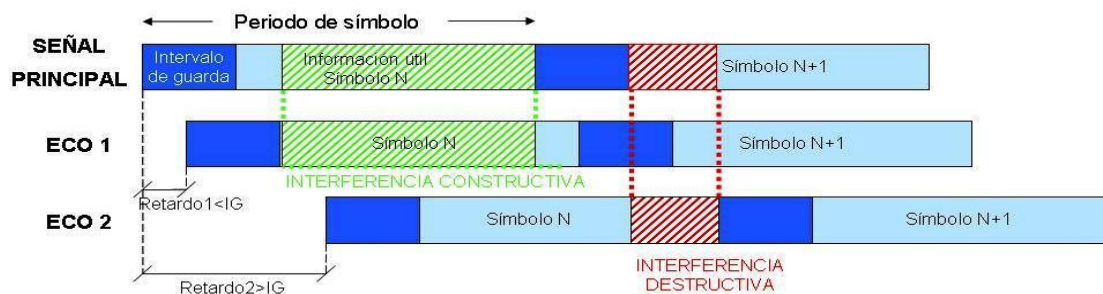


Figura 9 Interferencia constructiva y destructiva dependiendo el tiempo de llegada de la señal OFDM.

3.2.3 Modulación y codificación (MODCOD)

Un sistema DVB-T2 incluye esquemas de modulación QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM y tasas de codificación 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5 y 5/6. Dependiendo de la combinación de esquema de modulación y tasa de codificación seleccionada se requiere una mínima *CNIR*.

3.3 Indicadores de rendimiento

En la planificación de una red DVB-T2 es necesario conocer y establecer el fuerte compromiso que existe entre la máxima capacidad del sistema, la máxima distancia entre transmisores y el rendimiento en distintas condiciones de recepción. A continuación se describe el efecto de los principales parámetros DVB-T2 en el diseño de redes SFN:

3.3.1 Capacidad

3.3.1.1 Efecto del patrón portadoras piloto (PPs)

Las portadoras piloto son símbolos con amplitud y fase conocida por los receptores que son usadas para estimar/ecualizar las características del canal en tiempo y frecuencia. Existen portadoras que son utilizadas continuamente como pilotos y otras que son asignadas dinámicamente. En DVB-T, una de cada 12 celdas OFDM es una portadora piloto, lo cual representa un 8,33% de overhead (Equivalente al PP1 de DVB-T2). La densidad de portadoras piloto óptima depende de la variabilidad del canal, siendo necesarias un mayor número de ellas en recepción móvil que en recepción fija. DVB-T2 define 8 patrones de portadoras piloto con el fin de minimizar el overhead en función del tipo de recepción a la que está orientado el servicio. La Tabla 9 resume el porcentaje de overhead generado al sistema en función del PP utilizado.

	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8	Descripción
D_x	3	6	6	12	12	24	24	6	Separación entre portadoras
D_y	4	2	4	2	4	2	4	16	Longitud secuencia en símbolos
$1/(D_x D_y)$	8.33 %	8.33 %	4.17 %	4.17 %	2.08 %	2.08 %	1.04 %	1.04 %	Overhead por pilotos dispersas

Tabla 9. Comparación de los patrones de portadoras piloto

3.3.1.2 Efecto de la modulación y codificación (MODCOD)

Un sistema DVB-T2 incluye esquemas de modulación QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM y tasas de codificación 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5 y 5/6. Dependiendo de la combinación de esquema de modulación y tasa de codificación seleccionados el sistema puede ofrecer una mayor o menor capacidad de transmisión útil. Altos órdenes de modulación (64QAM, 256QAM) transmiten mayor cantidad de información en un mismo símbolo (6 y 8 bits respectivamente) comparados con los esquemas de menor orden (QPSK y 16QAM), pero exigen un mayor nivel de relación *CNIR* en recepción. Un aumento en la *CNIR* significa una menor tolerancia a interferencias ya sea de la misma red o de otras redes, y por tanto una reducción en el máximo radio o área de cobertura de una red SFN. Por otra parte, las tasas de codificación 1/2, 3/5 y 2/3 protegen con mayor cantidad de bits de paridad la información (comparados con 3/4, 4/5 y 5/6) pero penalizan fuertemente la capacidad útil de transmisión. A modo de ejemplo, la Tabla 10 resume la variación de la capacidad de transmisión de un sistema 16KE, PP2 con duración de trama 250 ms en función del MODCOD, el cual es un modo de referencia de las redes TDT en Colombia.

	Tasa de codificación	CNR (dB)		Capacidad (Mbps)	
		Canal Rice	Canal Rayleigh	GI 1/8	GI 19/128
QPSK	1/2	3,70	4,50	4,5	4,36
	3/5	4,90	6,00	5,41	5,25
	2/3	5,90	7,40	6,04	5,86
	3/4	6,90	8,70	6,77	6,57
	4/5	7,50	9,60	7,23	7,01
	5/6	8,10	10,40	7,54	7,32
16QAM	1/2	8,90	10,20	9,04	8,77
	3/5	10,30	11,80	10,86	10,53
	2/3	11,60	13,30	12,09	11,72
	3/4	12,90	14,90	13,59	13,18
	4/5	13,70	16,10	14,50	14,06
	5/6	14,20	16,90	15,09	14,63
64QAM	1/2	13,30	15,00	13,54	13,13
	3/5	15,10	16,80	16,27	15,78
	2/3	16,40	18,20	18,13	17,59
	3/4	17,90	20,20	20,36	19,75
	4/5	19,10	21,70	21,72	21,07
	5/6	19,60	22,60	22,68	21,99
256QAM	1/2	17,30	19,30	18,09	17,54
	3/5	19,40	21,40	21,72	21,07
	2/3	20,90	22,90	24,13	23,40
	3/4	22,80	25,10	27,17	26,36
	4/5	24,20	26,80	28,99	28,12
	5/6	24,90	27,90	30,22	29,31

Tabla 10. Umbrales de CNR y máxima capacidad de transmisión para un modo DVB-T2 FFT 16K extendida, PP2 y una duración de trama 250ms.

3.3.2 Distancia máxima entre transmisores SFN

3.3.2.1 Efecto del tamaño de FFT y del GI

Los tamaños de FFT que a priori favorecen el despliegue de una red SFN de gran tamaño son el 16K y 32K por sus largos tiempos de símbolo OFDM. Estos tamaños de FFT tienen mayor número de portadoras y por tanto una menor separación entre ellas en un mismo ancho de banda del canal, siendo aún menor en canalización 6 MHz como es el caso de Colombia comparada con la canalización 8 MHz utilizada en Europa. Esta menor separación aumenta la probabilidad de interferencia entre portadoras (ICI por sus siglas en inglés) causada por el efecto Doppler, lo que significa un peor rendimiento en recepción móvil comparado con el obtenido en tamaños de FFT más bajos. Generalmente se utilizan altos tamaños de FFT para redes TDT orientadas a recepción fija con antenas en tejados para maximizar la capacidad de transmisión, teniendo en cuenta que es un canal estático y que poca desviación de las portadoras se puede presentar. Un ejemplo es presentado en la Figura 10, donde podemos observar que la longitud del símbolo OFDM en el modo 32K es 4 veces más grande que la longitud en 8K y por tanto, para un modo DVB-T/T2 con FFT 8K, un GI de 1/4 significa una penalización en capacidad del 25%, mientras que para el mismo tiempo de GI en un modo DVB-T2 con FFT 32K, este significa tan solo el 6%.

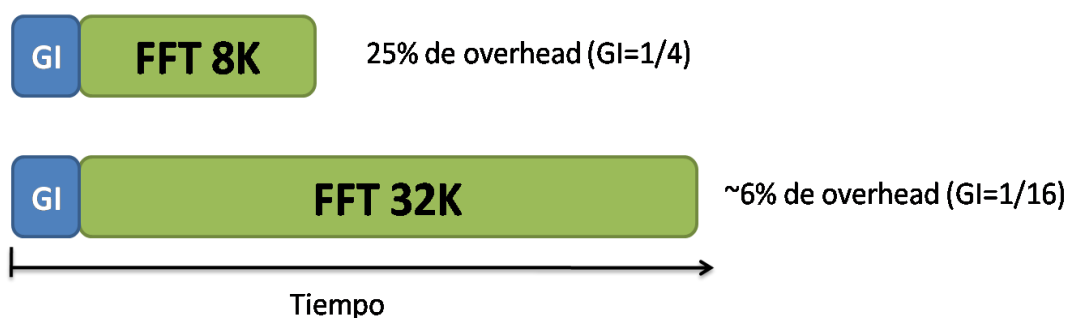


Figura 10. Ejemplo de reducción del overhead del intervalo de guarda utilizando FFTs de mayor tamaño.

La Tabla 11, resume la máxima capacidad de un sistema DVB-T2 con modulación 64QAM, CR 3/5 en función del tamaño de la FFT, del intervalo de guarda y para el modo de PP que mayor capacidad de transmisión permite. Se puede apreciar que para una determinada fracción de GI la capacidad máxima es casi constante en todos los tamaños de FFT. Sin embargo, al cambiar la FFT cambia el tiempo del símbolo y por tanto también cambiara el tiempo de guarda del sistema. Por otra parte, para un tamaño de FFT fijo podemos ver la reducción en la capacidad de transmisión del sistema a medida que se utilizan fracciones de GI más grandes con el ánimo de obtener tamaños de red SFN más grandes. De aquí el fuerte compromiso entre la capacidad de transmisión y la distancia máxima entre transmisores.

		Intervalo de Guarda (GI)						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
Tamaño de FFT	32K ext.	20,39 (PP7)	19,70 (PP6)	18,59 (PP4)	18,33 (PP4)	16,25 (PP2)	15,81 (PP2)	
	32K	19,97 (PP7)	19,29 (PP6)	18,21 (PP4)	18,21 (PP4)	15,91 (PP2)	15,48 (PP2)	-
	16K ext.	20,39 (PP7)	19,91 (PP7)	19,02 (PP5)	18,79 (PP5)	17,25 (PP3)	16,70 (PP3)	13,48 (PP1)
	16K	19,97 (PP7)	19,50 (PP7)	18,63 (PP5)	18,40 (PP5)	16,89 (PP3)	16,35 (PP3)	13,21 (PP1)
	8K ext.	20,21 (PP7)	19,72 (PP7)	18,87 (PP5)	18,64 (PP5)	17,11 (PP3)	16,62 (PP3)	13,47 (PP1)
	8K	19,94 (PP7)	19,46 (PP7)	18,61 (PP5)	18,38 (PP5)	16,88 (PP3)	16,40 (PP3)	13,28 (PP1)
	4K	-	19,39 (PP7)	18,57 (PP5)	-	16,80 (PP3)	-	13,26 (PP1)
	2K	-	19,26 (PP7)	18,47 (PP5)	-	16,69 (PP3)	-	13,11 (PP1)
	1K	-	-	18,55 (PP5)	-	16,81 (PP3)	-	13,27 (PP1)

Tabla 11. Capacidad de transmisión en Mbps de un sistema DVB-T2 64QAM, CR 3/5 en función del tamaño de la FFT, el GI y el PP que mayor capacidad permite.

3.3.2.2 Efecto del modo extendido

Los modos más altos de FFT (8K, 16K y 32K) permiten la implementación de un modo extendido del espectro, gracias a que estos tamaños de FFT tienen una caída del espectro fuera de banda mucho más rápida que la de los FFT más pequeños, como se aprecia en la Figura 11.

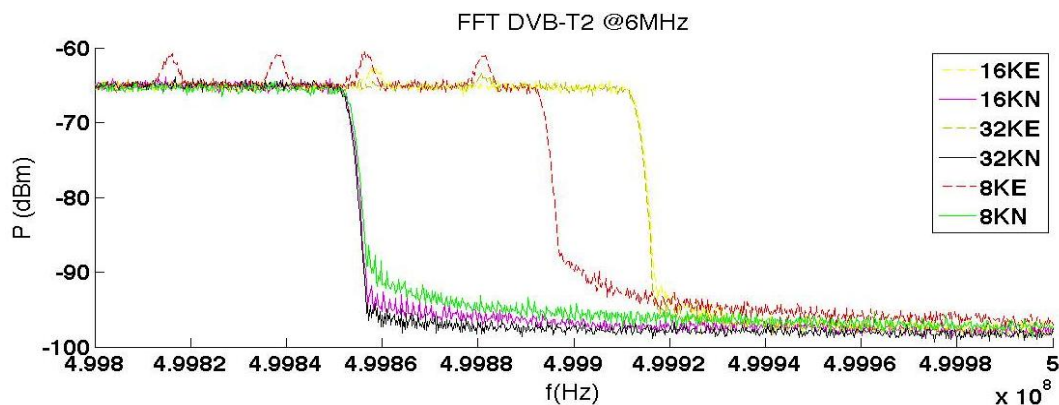


Figura 11. Respuesta espectral para diferentes tamaños de FFT.

3.3.2.3 Máxima distancia entre transmisores en una red SFN DVB-T2

La separación entre transmisores está básicamente definida por la combinación de FFT, intervalo de guarda y el patrón de portadoras piloto. DVB-T2 incluye nuevos tamaños de FFT que permiten por un lado mejorar el rendimiento de las redes SFN (tamaños más grandes, 16K o 32K) y por otro mejorar el rendimiento en movilidad (1K o 4K).

La incorporación de tamaños de FFT más grandes (16K y 32K) se traducen en tiempos de símbolo OFDM más largos, comparado con el máximo permitido en DVB-T (8K). Estos largos periodos de símbolo permiten aumentar el tiempo del intervalo de guarda del sistema DVB-T2 hasta en 2.5 veces comparado con el máximo permitido en DVB-T. El aumento del tiempo del intervalo de guarda se traduce en un aumento directo en la máxima distancia entre transmisores. La Tabla 12 resume las máximas distancias permitidas en un sistema DVB-T2 con canalización 6 MHz en función del tamaño de FFT y de la fracción de intervalo de guarda GI.

		Intervalo de Guarda (GI)						
		1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
Tamaño de FFT	32K	11.2 km	44.8 km	89.6 km	106.4 km	179.2 km	212.8 km	-
	16K	5.6 km	22.4 km	44.8 km	53.2 km	89.6 km	106.4 km	179.2 km
	8K	2.8 km	11.2 km	22.4 km	26.6 km	44.8 km	53.2 Km	89.6 km
	4K	-	5.6 km	11.2 km	-	22.4 km	-	44.8 km
	2K	-	2.8 km	5.6 km	-	11.2 km	-	22.4 km
	1K	-	-	2.8 km	-	5.6 km	-	11.2 km

Tabla 12. Máxima distancia entre transmisores para un sistema DVB-T2@6MHz.

De la tabla podemos resaltar que no todas las combinaciones de FFT y GI son posibles y que la máxima distancia entre transmisores es de 212.8 km obtenida con la combinación de FFT 32K y GI 19/128. Dependiendo del escenario de despliegue, estas distancias pueden ser mayores en función del patrón de portadoras piloto y de la inserción de retardos artificiales en la red, siendo el escenario montañoso el más crítico debido a la presencia de ecos con un alto nivel de

potencia y un retraso significativo. Es importante resaltar que los sistemas OFDM con canalización de 6 MHz tienen la ventaja de tener tiempos de símbolo más largo que los sistemas con canalización 8 MHz.

3.3.2.4 Ganancia en el tamaño de la red SFN por tolerancia a señales con llegada más allá del intervalo de guarda

En principio la separación máxima entre transmisores está definida por el tiempo del intervalo de guarda del sistema T_g , sin embargo en DVB-T2 dependiendo del patrón de portadoras utilizado y del tipo de interpolación hecho en el receptor es posible aumentar la distancia entre transmisores. Como se describió en la sección 2.4, el intervalo de tiempo en el cual las señales DVB-T2 que arriban al receptor pueden ser correctamente ecualizadas se conoce IE y su máximo tiempo de retardo que una señal puede tener con respecto a la primera señal en llegar al receptor para contribuir constructivamente es conocido como el tiempo de Nyquist (T_p).

En DVB-T2 este tiempo de Nyquist depende del patrón de portadoras pilotos seleccionado y del método de interpolación implementado en el receptor (interpolación en tiempo y frecuencia o solo en frecuencia) y debe ser mayor que el tiempo de guarda establecido por la combinación FFT y GI para que la configuración sea válida e implementable. Para propósitos de planificación, en la [EBU3348] se recomienda asumir que un receptor real DVB-T2 ecualiza correctamente una señal si tiene un tiempo relativo de llegada de 57/64 (=89.1%) del tiempo de Nyquist y que los receptores implementan interpolación tanto en tiempo como en frecuencia. Como se detalla en la Tabla 13 a modo de ejemplo, para determinados modos de transmisión DVB-T2 esta fracción del tiempo de Nyquist es igual o mayor al tiempo de intervalo de guarda y por tanto el receptor puede tolerar señales que lleguen con un retardo relativo superior al establecido por la combinación del FFT y el GI. Este efecto de tolerancia a señales que lleguen un poco más allá del tiempo de guarda propio del sistema hace que la separación entre transmisores de una red SFN pueda ser mayor y que exista una degradación gradual de la señal en los bordes de las zonas con interferencia.

Parámetro	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
Modulación	256QAM	256QAM	256QAM	16QAM	256QAM
FFT	32K	32K	32K	16K	32K
Tasa Codificación	2/3	3/4	3/5	1/2	3/5
PP	PP4	PP2	PP4	PP3	PP7
GI	1/16	1/8	19/256	1/8	1/128
T_G (μ s)	298	597	354	298	37
T_u (μ s)	4776	4776	4776	2388	4776
Límite de Nyquist como fracción del T_u	1/12	1/6	1/12	1/6	1/96
Límite de Nyquist	398	796	398	398	49
Factor Ecualización	57/64	57/64	57/64	57/64	57/64
T_p (μ s)	354	708	354	354	43

Tabla 13. Cálculo del correcto intervalo de ecualización para algunos modos DVB-T2.

4 Metodología para Estimación de Cobertura en Redes TDT

4.1 Cartografía

4.1.1 Mapa digital del terreno (DTM)

Un Mapa Digital de Terreno es una representación en 3D de la superficie de un terreno o de un planeta, creada a partir de los datos de altitud del terreno. Se puede descargar los datos de la Misión Topográfica de Radar (SRTM)⁵, estos datos son imágenes raster en formato GRID, con una precisión de 3 arcos de segundo, lo que viene siendo aproximadamente 1 punto por cada 90m, estas imágenes luego pueden ser procesadas mediante un software de información geográfica (SIG).

Colombia se ha obtenido en partes, en total se descargó nueve imágenes raster, que luego fueron procesadas mediante el software de información geográfica ArcGis que contiene la herramienta ArcMap. El trabajo realizado para poder obtener un mapa digital del terreno de toda Colombia es resumido a continuación:

- ❖ A partir de las nueve imágenes raster se crea un mosaico dataset, el objetivo básicamente es poder juntar todas las partes en una sola imagen raster cumpliendo unas reglas para que mantengan la homogenización de los datos.
- ❖ Teniendo una imagen raster de toda Colombia, procederemos a recortar los límites fronterizos con otros países. A partir de la imagen completa de Colombia y una capa que contiene los límites territoriales a nivel país, se recorta la imagen de tal forma que se obtiene el mapa digital del terreno de Colombia delimitado por sus fronteras con otros países.
- ❖ Ahora se procede a proyectar el raster con un sistema de coordenadas, el cual nos ayudara a definir cada punto con una posición y orientación. En nuestro caso hemos definido el DTM con el sistema de coordenadas geográficas WGS84 (*World Geodetic System 84*).
- ❖ Por último se hace un cambio de formato de imagen al mapa digital del terreno para poder ser cargado en el software ICS Telecom. A manera de ejemplo, la Figura 6 muestra dos imágenes raster de Colombia en formato GRID en software ArcMAP:

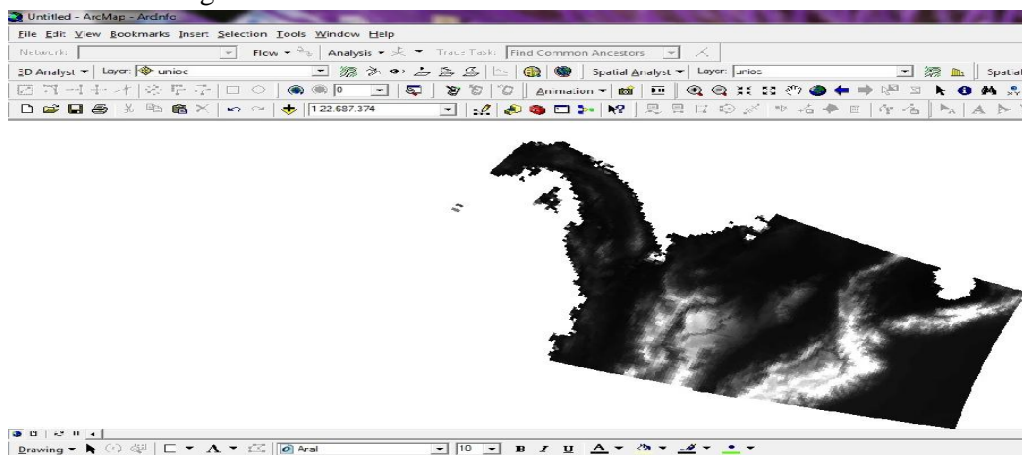


Figura 12 Partes del mapa digital de Colombia en el software ArcMap

⁵ <http://srtm.csi.org/>

4.1.2 Mapa digital de los límites administrativos de Colombia

Es un mapa raster con el contorno de los departamentos en los que está dividido el territorio Colombiano. Con este mapa y la información de la población en Colombia para el año 2012 extraída del Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE), se desarrolló el siguiente trabajo:

- ❖ Haciendo uso del software Atoll, se actualizó el mapa digital de los límites administrativos de Colombia con la población del año 2012 asociando el número de habitantes a su respectivo municipio (1120 municipios en Colombia) y además se corrigieron algunos contornos de algunos municipios.

4.2 Generar los patrones de radiación de las antenas transmisoras con Software Antios

Antios es un software profesional de diseño de antenas en 2D y 3D, proporciona ajuste en tiempo real de los patrones de radiación. La información para generar los patrones de radiación está basada en los datos del anexo 2 de las especificaciones técnicas mínimas 04102012 de RTVC⁶. En este ejemplo los datos suministrados para la estación el Bello son resumidos en la Tabla 14:

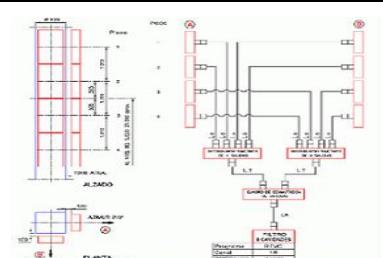
ESTACIÓN	SSRR				Vista Lateral del Sistema Radiante
	Configuración	Azimet del Arreglo (°)	"Tilt" Eléctrico (°)	"Zero Fill" 1 (%)	
BELLO	(4:4::)	(210:300)	(6:6)	(20:20)	

Tabla 14. Principales parámetros de configuración de las antenas transmisores de RTVC

El trabajo realizado para generar el patrón de radiación de las antenas con el software profesional Antios se describe así:

- ❖ **Generar diagrama de radiación de la antena base**, Como se observa en la Tabla 14 en la pestaña vista lateral del sistema radiante el patrón de radiación de las antenas está conformado por un arreglo de dipolos. El dipolo modelo es la antena AT15.250, la información de esta antena es obtenida en la web del fabricante.
- ❖ **Configuración del sistema radiante**, parámetros de configuración del sistema radiante, tales como, dimensiones de las torres de las antenas, separación entre antena y torre. La Figura 13 muestra la configuración en el software Antios para la estación el Bello.

⁶ http://www.rtv.gov.co/?option=com_contrat&task=showcontrat&tipo=3&id=172

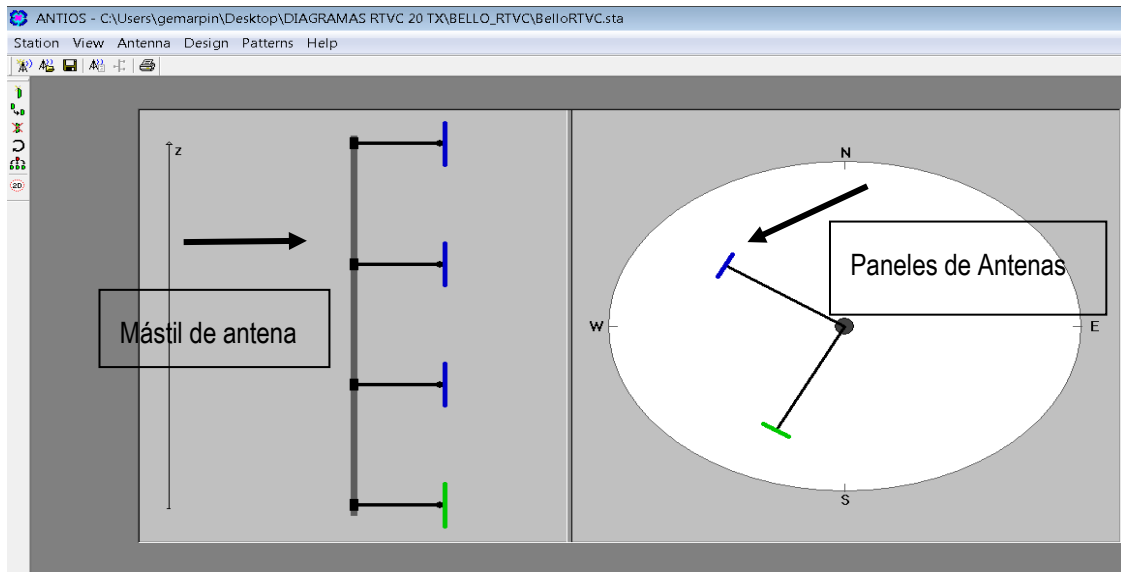


Figura 13. Configuración sistema radiante estación el Bello de RTVC en el software Antios

- ❖ **Configurar fases eléctricas del arreglo de dipolos,** En cuanto a las fases eléctricas de cada elemento, hay que tener en cuenta que ellas determinan el relleno de ceros del patrón de radiación del arreglo (*Null fill*) y el ángulo vertical en el que se inclina el lóbulo principal (*tilt*). Se realizó el cálculo de las fases eléctricas de los elementos del arreglo haciendo uso del programa suministrado por la ANE “Fases_electricas.xlsx” teniendo en cuenta el *Null fill* y el *tilt*.
- ❖ **Generar el patrón de radiación de la antena horizontal y vertical,** Habiendo configurado todos los parámetros del arreglo de dipolos en el software Antios, se genera el patrón de radiación de la antena horizontal y vertical en 2D y 3D, La figura 14 muestra el patrón de radiación para la estación el Bello.

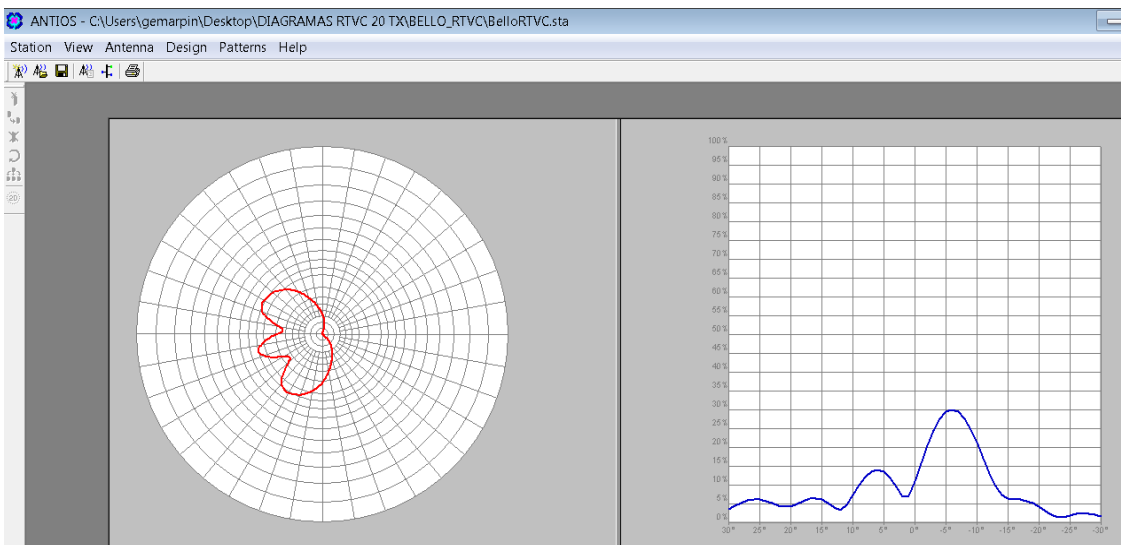


Figura 14. (Izquierda) Patrón de radiación horizontal estación Bello
(Derecha) Patrón de radiación vertical estación Bello

4.3 Procedimiento en el análisis de redes SFN con el Software ICS Telecom

ICS Telecom es un software profesional de simulación que emplea un sistema de información geográfica orientado a la radio propagación. Está diseñado para simular la cobertura de todos los tipos de redes de radio, realizar análisis de población, análisis de cobertura y perfiles de punto a punto. La Figura 15 muestra la barra de herramientas del software:

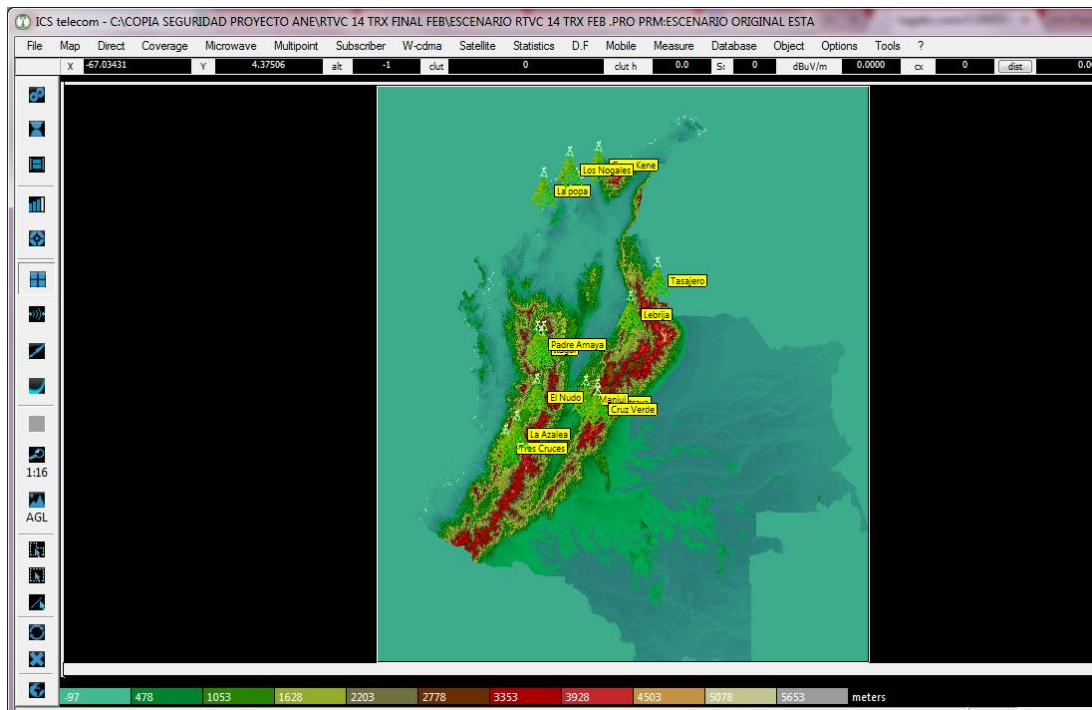


Figura 15. Mapa digital del terreno de Colombia en ICS Telecom

Un procedimiento general a seguir con el software profesional de planificación ICS Telecom es descrito a continuación.

- ❖ **Mapa digital del terreno**, cargamos el mapa digital de Colombia, con una precisión de 90 m resolución, se ha ge referenciado con el sistema de coordenadas geográficas WGS84.
- ❖ **Configurar parámetros técnicos de la red**, tales como, ubicación geográfica de los transmisores, potencia de emisión estaciones base, frecuencia, sistema radiante, modo de transmisión.
- ❖ **Elegir modelo de propagación**. ITU-R 526, escogido por la ANE, se describen con mayor profundidad en el Anexo A.3.
- ❖ **Definir umbrales para el cálculo de la cobertura**, se definen los umbrales mínimos de CNR requerida por el receptor para que pueda decodificar la señal y la mínima intensidad de campo requerida E_{min} . El procedimiento de calcular estos umbrales fue descrito en la sección 2.6 para el mínimo umbral de CNR y en la sección 2.9 para el cálculo de la E_{min} .

- ❖ **Analizar e identificar las zonas de interferencia en la red SFN**, conociendo el valor de intensidad de campo recibido en cada punto, se procede a reconocer las zonas de cobertura e interferencia en la red. A continuación se explica con un ejemplo:

El resultado obtenido es el valor de C/I recibido en cada punto de recepción, por lo tanto aquellas zonas que superen la mínima intensidad de campo recibida y el mínimo valor de C/I requerido por el receptor, se consideraran como zonas cubiertas. En la

Figura 16 observamos que:

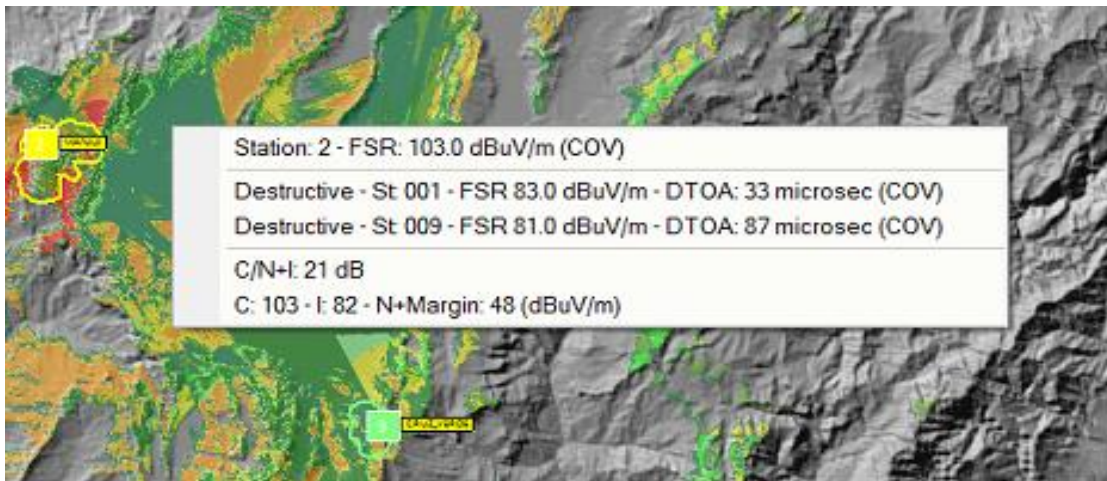


Figura 16. Valor recibido en un punto de C/N+I con interferencia

- El punto de recepción es cubierto por la estación 2 con una intensidad de campo de 103 dB μ V/m. La mínima intensidad de campo requerida en este caso es de 42 dB μ V/m.
- Se observa interferencia, dos señales son destructivas en este punto porque llegan fuera del intervalo de guarda, procedentes de los transmisores uno y nueve.
- El valor de C/N+I es las diferencias de potencias entre la señal útil y la suma ponderada de las señales interferentes. La ecuación 11 muestra el valor de C/N+I :

$$\frac{C}{N+I} = \frac{103}{82} = 21 \text{ dB} \quad (11)$$

- ❖ **Optimización de los retardos artificiales en los transmisores**, El retardo artificial como su nombre lo indica es un retardo que se aplica a la señal de salida del transmisor para reducir las zonas de interferencia en la red SFN. Reduce las zonas de interferencias porque ayuda que la señal recibida contribuya constructivamente a la suma de potencia útil y por tanto ya no existe interferencia en ese punto. La forma en que se optimizan los retardos es descrita a continuación:

- **Ajustes del retardo de los transmisores de forma automática:** Conociendo las zonas de interferencia en la red TDT haremos un ajuste de dicho parámetro en los transmisores de forma automática con un algoritmo de asignación dinámica que implementa el software ICS Telecom, escogiendo el retardo que ofrece la menor potencia interferente en una zona de estudio.

- **Ajustes del retardo de los transmisores de forma manual:** Posteriormente de obtener los retardos artificiales en los transmisores, calculamos nuevamente las zonas de cobertura e interferencia. Identificamos las nuevas zonas de interferencia y conociendo el tiempo en que llega la señal al receptor (fuera del intervalo de guarda). Empezaremos ajustar el retardo artificial en el transmisor de tal forma que la señal recibida en ese punto contribuya positivamente, es decir, llegue dentro del intervalo de guarda, por ende, contribuye constructivamente a la suma de potencia útil y por tanto ya no existe interferencia en ese punto.

- ❖ **Obtener porcentajes del área cubierta e interferente de todos los municipios de Colombia,** A partir de la capa de población suministrada por la ANE se calculan los resultados de porcentaje de población cubierta e interferente en el territorio Colombiano. La función de esta capa es obtener el porcentaje de área cubierta para cada municipio de Colombia.

5 Resultados

5.1 Resultados DVB-T

5.1.1 Estimaciones de cobertura para la red de TDT de RTVC

Los datos de cobertura suministrados a continuación son el resultado de simulaciones computacionales realizadas mediante la herramienta software ICS Telecom. La cartografía utilizada consta básicamente de un mapa digital de terreno obtenida a partir de mapas de la NASA, una capa de municipios con información de coordenadas centrales latitud, longitud y población proyectada a 2012 en Colombia. Los resultados presentados en este documento se derivan de la cantidad de población cubierta, e interferida estimada a nivel de municipio y para todo el territorio nacional.

La metodología de planificación sigue las recomendaciones [UITI368], [EBU3348], [TS102831] y del foro DVB [ETSI 101190], [ETSI A14] para la planificación de redes de TDT. Sin embargo al tratarse de una simulación, pueden existir diferencias entre la cobertura prevista y la real, debido a errores estadísticos intrínsecos al modelo teórico de propagación y a inexactitudes de los patrones de radiación de las antenas y demás parámetros que caracterizan una estación base y en el propio modelo digital del terreno. Las interferencias consideradas en este estudio son solo las generadas por la propia red SFN y por tanto los resultados pueden diferir de futuros estudios que consideren factores adicionales de interferencia derivados de la coexistencia con otras redes de comunicaciones, la presencia de señales no autorizadas, interferencias por condiciones atmosféricas adversas, etc.

Visualización de las zonas con cobertura, sin cobertura y con interferencia

Para mayor claridad en la interpretación de las huellas de cobertura presentadas en esta sección, es importante resaltar:

- ✓ Las zonas marcadas como cubiertas son aquellos puntos del escenario donde tanto la intensidad de campo eléctrica total útil (E_{min}) como la mínima CNIR superan el umbral mínimo requerido por el sistema (para determinado modo de recepción). Se ha definido el color azul para representar la cobertura en recepción fija 70%.
- ✓ Las zonas marcadas con interferencias corresponden a aquellos puntos del escenario donde el nivel E_{min} total de señal útil está por encima del umbral mínimo requerido, pero por efectos de un alto nivel de señal no deseada se obtiene una relación CINR muy baja que no supera el umbral mínimo para una correcta decodificación. Esto significa que son puntos del escenario donde se podría tener cobertura (fija o indoor dependiendo el caso) de no ser por el alto nivel de interferencia generado por la propia red SFN. Por lo tanto las huellas de interferencia serán diferentes para cada tipo de recepción, teniendo en cuenta que primero se delimitan las zonas de cobertura y luego sobre ellas se marcan en color rojo los puntos que tiene un alto nivel de interferencia.
- ✓ Las zonas sin color sobre el mapa representan los puntos del escenario donde no se supera el umbral mínimo intensidad de campo eléctrico E_{min} requerido por el sistema.

5.1.1.1 Modo de transmisión propuesto por RTVC para la red DVB-T en Colombia

El diseño original de RTVC, es una planificación original basada en una configuración de dos frecuencias, dejando la posibilidad de asignar una tercera frecuencia para zonas con altos porcentajes de interferencia entre redes TDT o para transmisores fronterizos que puedan generar interferencia en otros países. El modo de transmisión DVB-T es descrito en la Tabla 15.

	RTVC
	DVB-T
Tamaño FFT	8K
GI	1/4
Modulación	16QAM
CR	3/4
Patrón de Portadoras	PP1
CNR Rice ⁷ (dB)	15.7 dB ⁸
Capacidad (Mbps)	11.2 Mbps
Distancia entre TxS SFN	90 km

Tabla 15. Modo de transmisión DVB-T seleccionados actualmente por RTVC

5.1.2 Modo referencia RTVC cobertura MFN utilizando 2 frecuencias

La planificación original de las redes de TDT de RTVC está basada en una configuración de dos frecuencias. En este escenario se utilizan 14 estaciones base proyectadas por RTVC para el despliegue de la red TDT fase I y se heredan parámetros de configuración, tales como, ubicación de los emplazamientos, patrón de radiación de las antenas, potencia de emisión y modelo de propagación.

En la asignación de frecuencias a las estaciones base de toma como punto de partida la información suministrada por la ANE en el fichero "*Frecuencias 2013 y 2013.xlsx*", en dicho fichero se ha adjudicado la frecuencia 16 (485 MHz) en nueve estaciones, las otras estaciones se utilizará otra frecuencia que puede estar en el rango del canal 21 al 27. Esta frecuencia particularmente será adjudicada a los transmisores fronterizos que puedan generar interferencia en otros países, en este diseño particular se utilizó la frecuencia 23 (525 MHz). A continuación se desglosa el plan de frecuencias:

- ✓ Estaciones base RTVC Frecuencia 16: Calatrava, Manjui, Tres cruces, Bello, Cerro Kennedy, Cruz Verde, Itagüí, Los Nogales y La azalea.
- ✓ Estaciones base RTVC Frecuencia 23: Lebrija, La Popa, Padre Amaya, Tasajero y El Nudo.

⁷ Umbral calculado siguiendo el procedimiento descrito para DVB-T2 en las recomendaciones [EBU3348]

⁸ Umbral calculado siguiendo el procedimiento para DVB-T del acuerdo de Ginebra de 2006 [GE06] y las actas de la conferencia regional de radiocomunicaciones de la UIT de 2006 [CRR-2006].

La Figura 17 muestra las huellas de cobertura obtenida por el diseño de red TDT del operador público RTVC en topología MFN a dos frecuencias y utilizando el modo de transmisión DVB-T 16 QAM CR 3/4 originalmente propuesto para dicho diseño. Se ha utilizado una FFT 8KE y un GI de 1/4 con lo cual se consigue una separación máxima entre transmisores de 90 km (tiempo de guarda 298 μ s). El umbral de mínima intensidad de campo E_{min} utilizado es 41,5 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}^2$ y un valor mínimo de CNR de 15.7 dB requerido para la correcta recepción fija 70% de DVB-T.

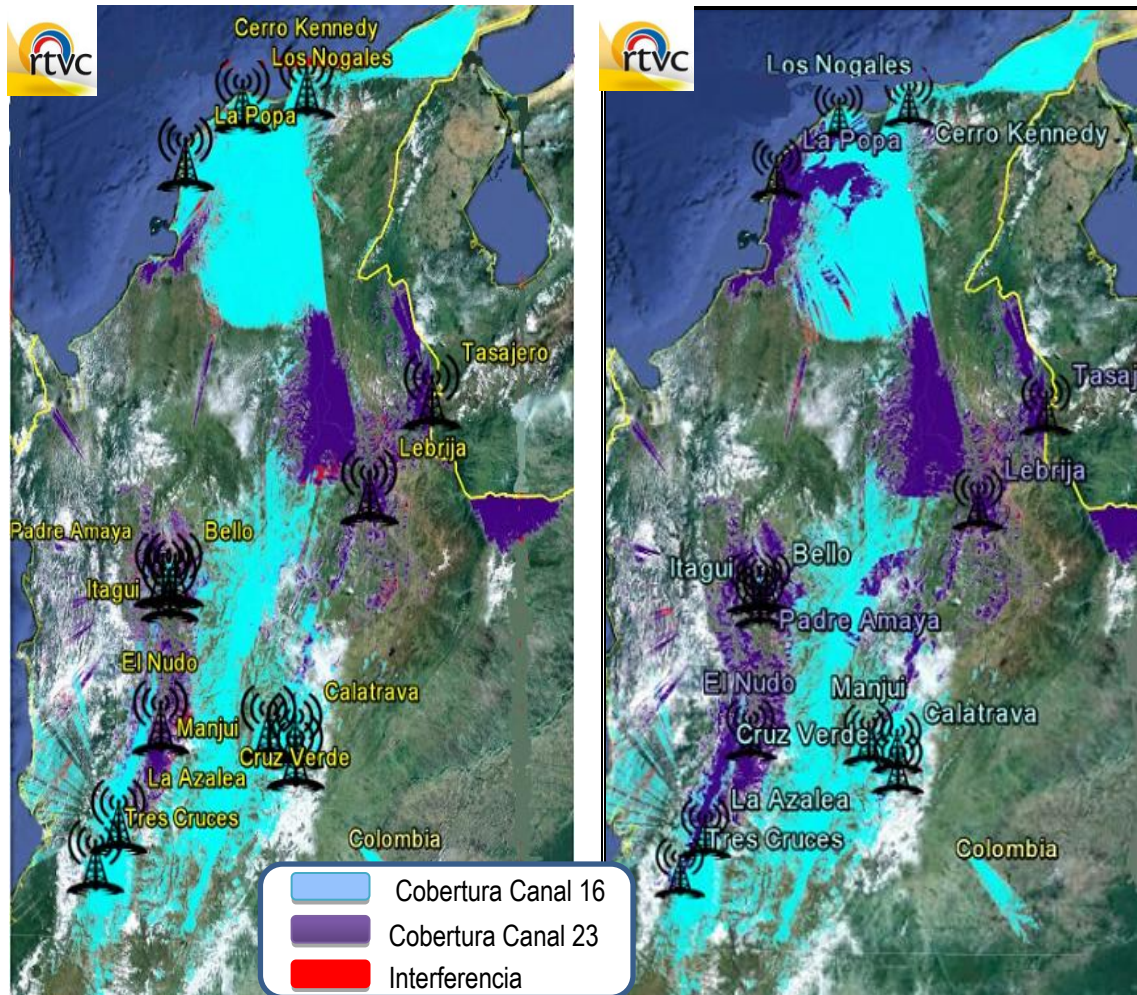


Figura 17 .Cobertura del modo de referencia DVB-T a dos frecuencias (8K, GI 1/4) en recepción fija 70% (Izquierda) sin retardos artificiales, (Derecha) con retardos artificiales en los transmisores.

Para reducir las zonas de interferencia generada por la propia red MFN, se calcularon retardos artificiales para insertar en los transmisores. La Tabla 16 resume los retardos artificiales y su respectivo transmisor. En la Figura 17 se aprecia como los retardos artificiales reducen las zonas de interferencias presentes en la zona centro del país, en especial la zona de cobertura de solapamiento de los transmisores Lebrija y Padre Amaya.

Transmisor Frecuencia 16 (485 MHz).									
	Calatrava	Manjui	Tres Cruces	Bello	Cerro Kennedy	Cruz verde	Itagiñí	Los Nogales	La Azalea
Retardo,µs	000	000	450	410	000	000	720	000	360
Transmisor Frecuencia 23 (525 MHz).									
	Lebrija	La Popa	Padre Amaya	Tasajeo	El nudo				
Retardo,µs	070	540	-320	-170	-090				

Tabla 16 . Retardos artificiales para el modo de referencia DVB-T de RTVC a dos frecuencias

La Tabla 17 resume los porcentajes de población con cobertura e interferencia de dicha topología de red en condiciones de recepción fija 70% estimada a partir de la capa de municipios de Colombia.

MFN NACIONAL DOS FRECUENCIAS FFT 8KE GI 1/4		Recepción Fija 70%		Recepción Fija 70% Con Retardos	
Indicador	Total Colombia	Cobertura	Interferencia	Cobertura	Interferencia
Población	46'507.282	59,8	1,5	60,7	0,6

Tabla 17. Estimaciones para el modo de referencia DVB-T de RTVC (FFT 8K, GI 1/4, 16QAM, CR 3/4).

En la Tabla 17 se deduce que la fase I del despliegue de red TDT de RTVC habiendo optimizado los retardos artificiales en los transmisores consigue una cobertura del 60,7%. Sin embargo, podemos observar que para recepción fija 70% se presenta un 1,5% de población con interferencia en caso de implementar la red sin retardos artificiales. El uso de estos retardos artificiales podría reducir el porcentaje de población con interferencia a tan *solo el 0,6%(279.043 de habitantes), es decir que al aplicar los retardos artificiales en los transmisores reduce 60% las interferencias.*

5.1.3 Modo referencia RTVC cobertura SFN única frecuencia

La Figura 18 muestra las huellas de cobertura obtenida en topología SFN frente a MFN, utilizando el modo de transmisión DVB-T 16QAM CR 3/4 originalmente propuesto para dicho diseño. Se representa las huellas de cobertura obtenidas para recepción fija 70% (zonas azules). Así mismo se representa las zonas con interferencia producida por la misma red (zonas rojas).

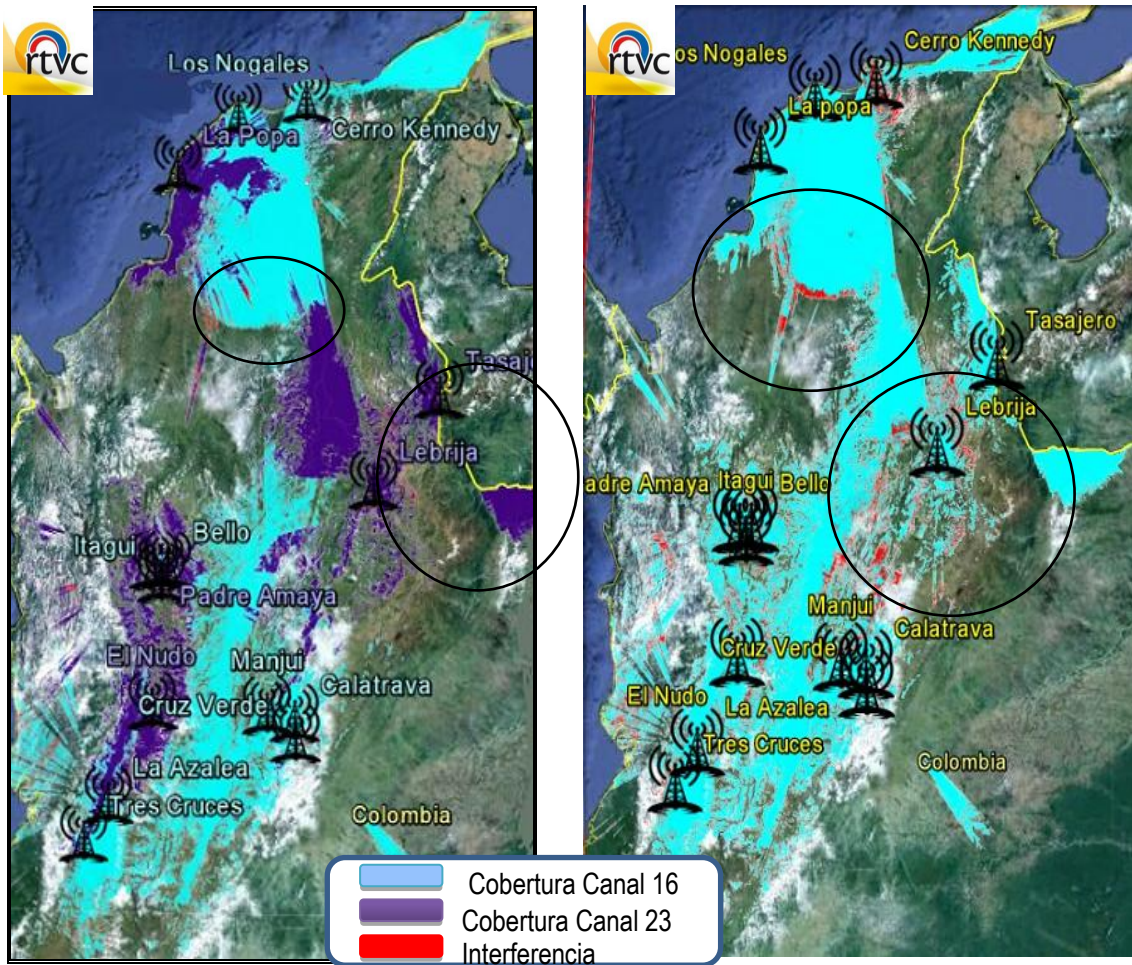


Figura 18. Cobertura del modo de referencia DVB-T (8K, GI 1/4) para recepción fija 70% con retardos artificiales en los transmisores. (Izquierda) Diseño MFN (Derecha) Diseño SFN.

Para reducir las amplias zonas de interferencia generada por la propia red SFN, se calcularon retardos artificiales para insertar en los transmisores siguiendo la metodología descrita en la sección 4.3. Se aprecia en la Figura 18 que al evaluar el modo de referencia DVB-T en una única frecuencia aparecen interferencias en la zona norte y zona central del país. La Tabla 18 resume los retardos artificiales y su respectivo transmisor.

	Transmisor Frecuencia 16 (485 MHz).						
	Calatrava	Manjui	Tres Cruces	Bello	Lebrija	La Popa	Cerro Kennedy
Retardo (µs)	000	000	520	250	490	700	420
	Cruz Verde	Itagüí	Los Nogales	Padre Amaya	La Azalea	Tasajero	El nudo
Retardo (µs)	120	530	550	270	420	450	480

Tabla 18. Retardos artificiales para el modo referencia DVB-T en SFN de RTVC.

La Tabla 19 resume los porcentajes de población con cobertura e interferencia para recepción fija 70% de dicha topología de red:

Tipo de Recepción		Recepción Fija 70%		Recepción Fija 70% Con Retardos		Reducción Interferencia
Modo de Transmisión	Población Colombia	Cobertura	Interferencia	Cobertura	Interferencia	Reducción Interferencia (%)
MFN -16QAM CR 3/4FFT 8K GI 1/4	46'507.282	59,8	1,5	60,7	0,6	59,8
SFN-16QAM CR 3/4FFT 8K GI 1/4	46'507.282	58,9	2,8	60,3	1,4	50

Tabla 19. Estimaciones de cobertura para el modo de referencia DVB-T de RTVC

De acuerdo con la Tabla 19, los resultados de la red DVB-T en configuración SFN se consigue 58,9% de cobertura para recepción fija 70% sin aplicar retardos artificiales en los transmisores. Optimizando la red con retardos artificiales se logra aumentar la cobertura a 60,3%, lo cual representa *un 0,8% menos de cobertura que la conseguida por la misma red en dos frecuencias*. De igual forma podemos identificar que al aplicar retardos artificiales en los transmisores solo *el 1.4% de la población Colombiana tendría interferencias* para recepción fija, es decir se logra reducir hasta un 50% la población que sufre interferencia en el diseño SFN.

Adicionalmente se ha calculado los porcentajes de población con cobertura e interferencia de dicha topología de red en condiciones de recepción *portable outdoor e indoor al 95 %*, estimada a partir de la capa de municipios de Colombia. En la Tabla 20 se consigue un 41,2% de población cubierta para recepción *portable outdoor 95%* y 30,4% para recepción *portable indoor 95%*. *Es importante resaltar que con el despliegue de esta primera fase en configuración SFN los porcentajes de población con interferencia se mantienen en 0% tanto para recepción Outdoor como para recepción indoor 95 %*. Por lo tanto, en el marco de este proyecto para los estudios de rendimiento de diseños de red SFN de gran tamaño se limitará a estimaciones de cobertura fija 70% donde se presentan zonas de no cobertura por interferencias generadas por la propia red DVB-T2.

Tipo de Recepción		Recepción Outdoor 95%		Recepción Indoor 95%	
Modo de Transmisión	Población Colombia	Cobertura	Interferencia	Cobertura	Interferencia
16QAM CR 3/4 FFT 8K GI 1/4	46'507.282	41,2	0,05	30,4	0,0

Tabla 20. Estimaciones de cobertura para el modo de referencia DVB-T de RTVC recepción portable outdoor e indoor 95%

La Figura 19 muestra las huellas de cobertura para recepción portable outdoor e indoor 95% obtenida en topología SFN donde no se observa interferencia (zonas rojas):

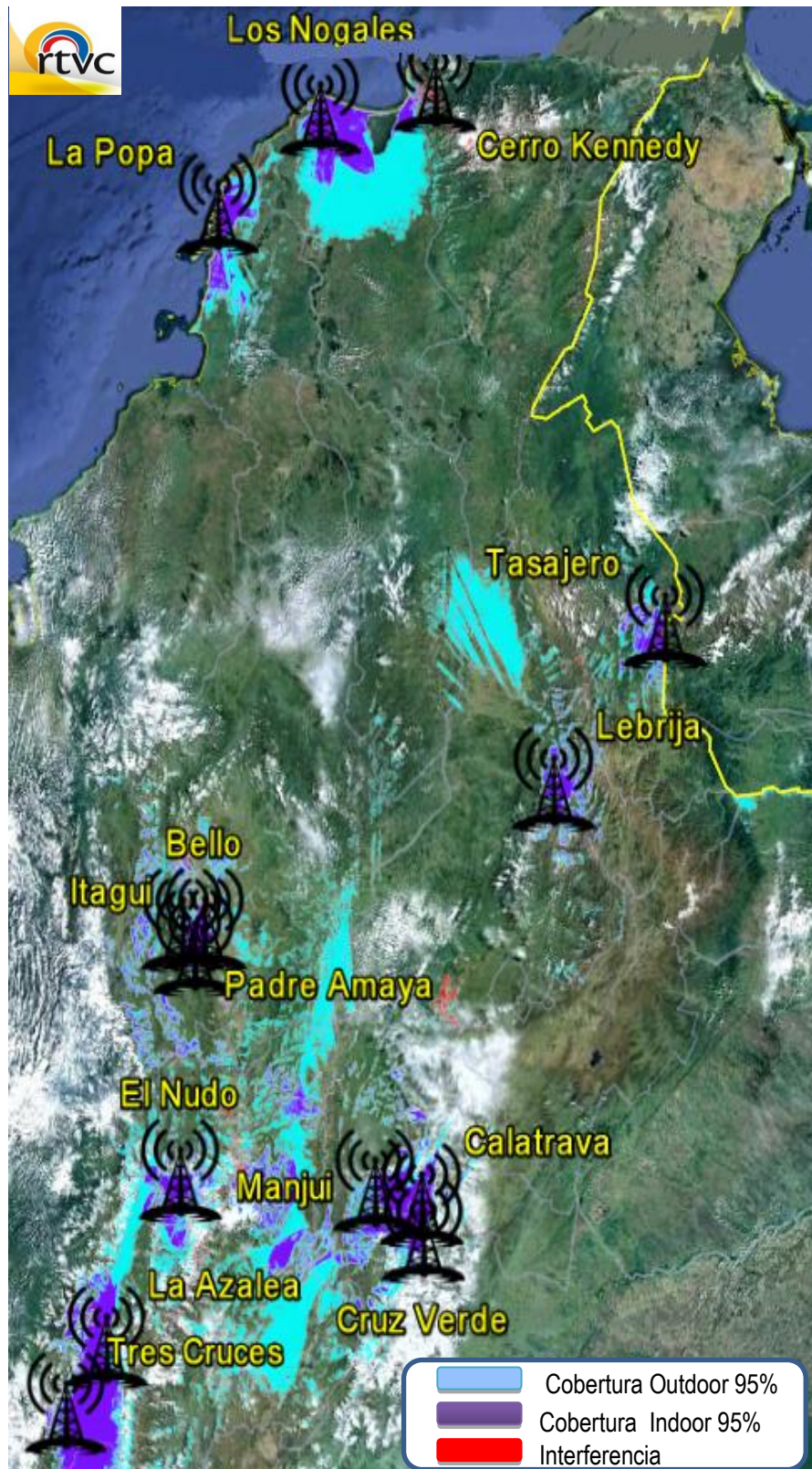


Figura 19. Huella de cobertura del modo de referencia DVB-T (8K, GI 1/4) de RTVC para recepción portable *outdoor* 95% (zonas azules) portable *indoor*.95%(zonas moradas)

5.2 Resultados DVB-T/T2

5.2.1 Ganancia en capacidad DVB-T2

	MODO DE TRANSMISIÓN			
	DVB-T (Referencia)	DVB-T2 opción 1	DVB-T2 opción 2	DVB-T2 opción 3
Tamaño FFT	8K	32K	16K	16K
Modo Normal/ Extendido	Extendido	Extendido	Extendido	Extendido
GI	1/4	1/16	1/8	1/8
Modulación	16QAM	64QAM	64QAM	64QAM
CR	3/4	3/5	3/5	2/3
PP	PP1	PP4	PP3	PP3
CNR Rice ⁹ (dB)	15.7 ¹⁰	14.8 ⁹	14.8 ⁹	16.1 ⁹
Distancia entre TxS SFN	90 km	90 km	90 km	90 km
Capacidad de transmisión	11.2 Mbps	18.6 Mbps	17.2 Mbps	19.2 Mbps
Ganancia Capacidad	0%	+64,6%	+53,5%	+70,2%
Porcentaje Población Cubierta (%)	58,9	59,7	59,7	59,0

Tabla 21. Modos de transmisión a evaluar para ganancia en capacidad DVB-T2 en SFN para Colombia

En la Tabla 21 se presentan 3 (tres) modos de transmisión DVB-T2 que mantienen la cobertura y distancia entre transmisores SFN respecto a DVB-T, dichos modos se caracterizan porque maximizan la capacidad del canal. *El modo DVB-T2 opción 3 ofrece hasta 70,2% más capacidad frente al modo de referencia DVB-T, principalmente por el cambio de MODCOD y la FFT.* Comparando el modo DVB-T2 opción 3 con el modo opción 2 ofrece un 23.7% más de capacidad por solo cambiar el *Code Rate*, es decir, proteger con menor cantidad de bits de paridad la información. Sin embargo esta ganancia en capacidad significa un pequeño aumento en los umbrales mínimos requeridos para una correcta recepción, comparando el modo DVB-T2 opción 3 con el modo DVB-T significa un aumento de 0.4 dB.

Adicionalmente, podemos observar que los modos que cambian el tamaño FFT de 8K a 16K ó 32K sufren una penalización en movilidad debido a que la separación entre portadoras se reduce (mayor número de portadoras en el mismo ancho de banda) y por tanto aumenta la probabilidad de la Interferencia.

⁹Umbral calculado siguiendo el procedimiento descrito para DVB-T2 en las recomendaciones [EBU3348]

¹⁰ Umbral calculado siguiendo el procedimiento para DVB-T del acuerdo de Ginebra de 2006 [GE06] y las actas de la conferencia regional de radiocomunicaciones de la UIT de 2006 [CRR-2006].

5.2.2 Ganancia en cobertura DVB-T2

5.2.2.1 Modos de transmisión propuestos DVB-T2

	MODO DE TRANSMISIÓN		
	DVB-T (Referencia)	DVB-T2 opción 1	DVB-T2 opción 2
Tamaño FFT	8K	8K	16K
Modo Normal/ Extendido	Extendido	Extendido	Extendido
GI	1/4	1/4	1/8
Modulación	16QAM	16QAM	16QAM
CR	3/4	3/4	3/5
PP	PP1	PP1	PP3
CNR Rice (dB) ⁹	15.7 ¹⁰	12.97 ⁹	9,97 ⁹
Intensidad de Campo Mínimo E_{min} (dB μ V/m ²) Recepción Fija 70%	41,5	37,3	34,3
Distancia entre TxS SFN	90 km	90 km	90 km
Capacidad de transmisión	11.2 Mbps	11.3 Mbps	11.5 Mbps
Reducción Nivel CNR	--	2,7 dB	5,7 dB

Tabla 22. Modos de transmisión a evaluar para ganancia en cobertura DVB-T2 en SFN para Colombia

En la Tabla 22 presenta 2 (dos) modos de transmisión DVB-T2 que ofrecen la misma capacidad de transmisión y mantienen la distancia entre transmisores SFN comparado con su antecesor DVB-T. Los niveles mínimos de CNR para una correcta decodificación sufre un decremento de 2.7 dB para el modo DVB-T2 opción 1 y 5.7 dB para el modo DVB-T2 opción 2. La diferencia de 3 dB entre los modos DVB-T2 es debido principalmente al cambio del *code rate* y el patrón de portadoras pilotos.

En la Figura 20 se observa la superposición de las huellas de cobertura para el modo DVB-T frente a los modos DVB-T2 propuestos para evaluar la ganancia en cobertura que ofrece el estándar de segunda generación, se puede ver claramente cómo se incrementan los niveles de cobertura, estos incrementos se cuantifican en las siguientes secciones.

Las zonas de cobertura para el modo de referencia DVB-T (16 QAM CR 3/4 FFT 8KE GI 1/4) son visualizadas en color morado, para el modo DVB-T2 opción 1 (16 QAM CR 3/4 FFT 8KE GI 1/4) en color amarillo y finalmente para el modo DVB-T2 opción 2 (16 QAM CR 3/5 FFT 16KE GI 1/8) en color azul marino.

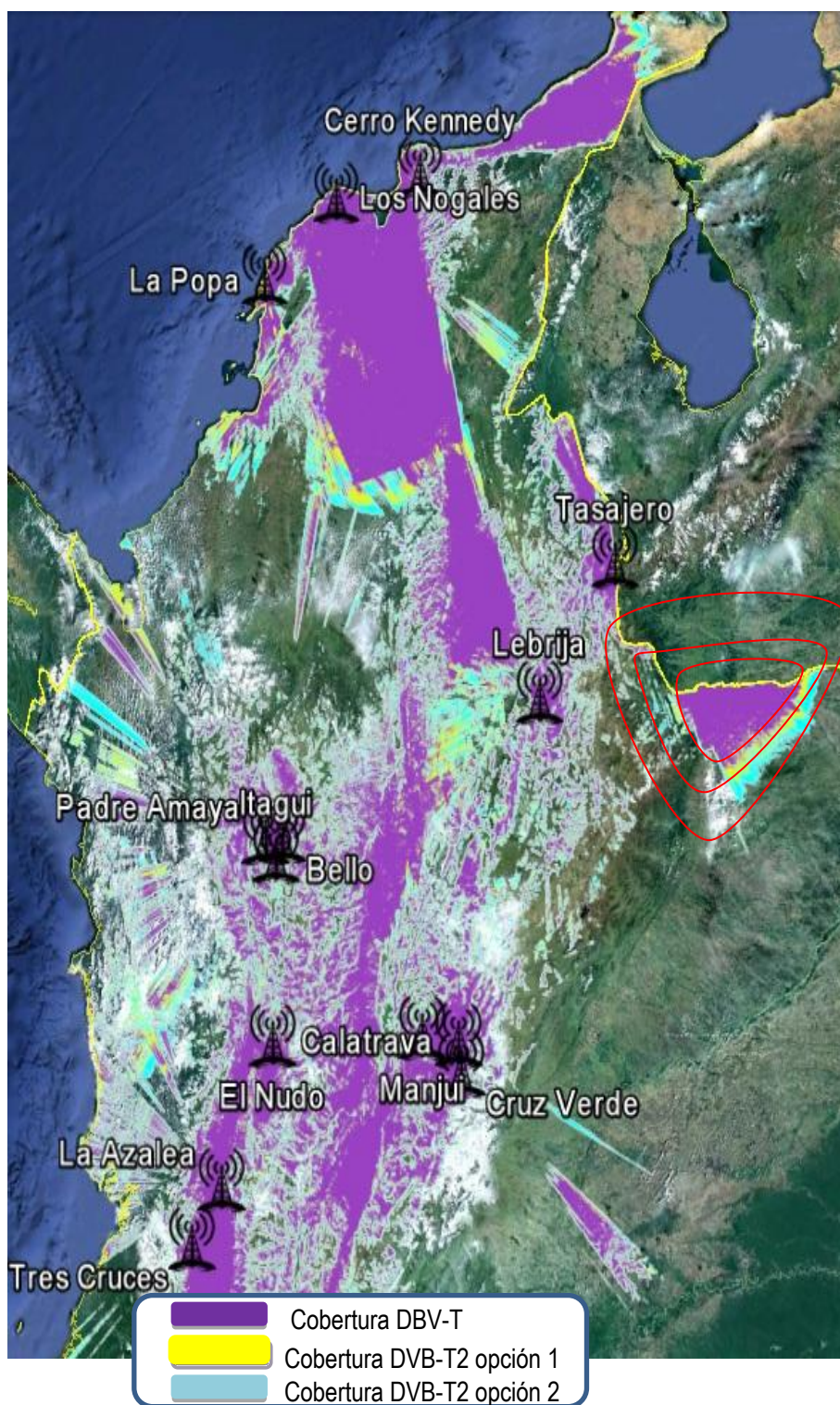


Figura 20. Superposición huellas de cobertura DVB-T Vs DVB-T2

5.2.2.2 Resultados cobertura modo DVB-T2 1 (FFT 8KE, GI 1/4)

La Figura 21 muestra las huellas de cobertura en todo el territorio nacional obtenida por el diseño de red TDT del operador público RTVC en topología SFN y utilizando el modo de transmisión DVB-T2 opción 1 (FFT 8KE y un GI de 1/4) con lo cual se consigue una separación máxima entre transmisores de 90 km (tiempo de guarda 298 μ s @ 6 MHz).

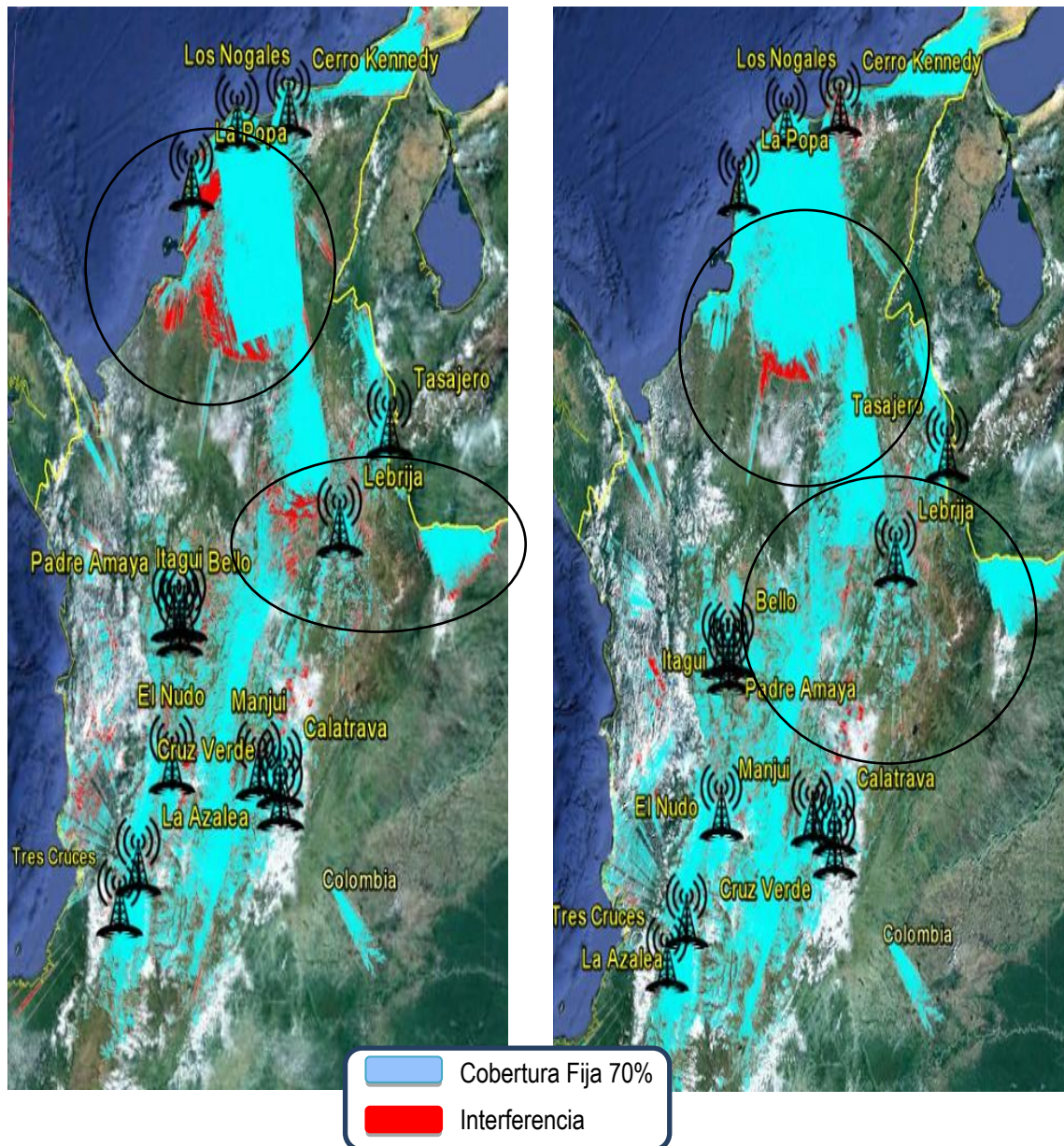


Figura 21. Cobertura del modo DVB-T2 (8KE, GI 1/4) en SFN para recepción fija 70%. (Izquierda) sin retardos artificiales, (Derecha) con retardos artificiales en los transmisores.

Para reducir las amplias zonas de interferencia generada por la propia red SFN, se calcularon retardos artificiales para insertar en los transmisores, los retardos calculados son descritos en la Tabla 23. Se observa en la Figura 21 las interferencias presentadas en la zona norte de Colombia, estas zonas son generadas por los solapamientos entre los transmisores la Popa, Padre Amaya. Así mismo también hay interferencias en la zona central del país generada principalmente por los transmisores Lebrija, Padre Amaya y Manjui. Después de haber evaluado el diseño inicial de red de RTVC, se puede concluir que particularmente hay dos zonas críticas en cuanto a interferencias la zona central y norte de Colombia.

Transmisor Frecuencia 16 (485 MHz).							
	Calatrava	Manjui	Tres Cruces	Bello	Lebrija	La Popa	Cerro Kennedy
Retardo (µs)	000	000	540	370	540	990	640
	Cruz Verde	Itagiüi	Los Nogales	Padre Amaya	La Azalea	Tasajero	El nudo
Retardo (µs)	130	350	790	190	440	980	510

Tabla 23. Retardos artificiales para el modo DVB-T2 opción 1 (8KE, GI 1/4)

La Tabla 24 resume los porcentajes de población con cobertura e interferencia de dicha topología de red en condiciones de recepción fija 70% estimada a partir de la capa de municipios de Colombia.

Tipo de Recepción		Recepción Fija 70%		Recepción Fija 70% Con Retardos		Reducción Interferencia
Modo de Transmisión	Población Colombia	Cobertura	Interferencia	Cobertura	Interferencia	Reducción Interferencia (%)
DVB-T 16QAM CR 3/4 FFT 8K GI 1/4	46'507.282	58,9	2,8	60,3	1,4	50
DVB-T2 16QAM CR 3/4 FFT 8KE GI 1/4	46'507.282	61,1	2,4	62,2	1,2	50

Tabla 24. Estimaciones de cobertura para el modo DVB- T2 opción 1

De la tabla anterior se puede identificar que *solo el 1.2% (558.080 de habitantes) de la población tendría interferencias* para recepción fija 70%, este valor se obtiene después de haber optimizado los retardos artificiales en los transmisores logrando reducir las interferencias hasta un 50%. *Se puede afirmar que con este modo DVB-T2 8KE, GI1/4 se consigue un 3.8% más de cobertura nacional frente al modo de referencia DVB-T.* En general con este modo de transmisión y la utilización de retardos artificiales se obtiene un **porcentaje de población cubierta del 62.2%**.

5.2.2.3 Resultados cobertura modo DVB-T2 2 (FFT 16KE GI 1/8)

La Figura 22 muestra las huellas de cobertura obtenida por el diseño de red TDT de RTVC fase I en topología SFN y utilizando el modo de transmisión DVB-T2 opción 2 (FFT 16KE y un GI de 1/8) los cuales son equivalentes en distancia máxima entre transmisores de 90 km (tiempo de guarda 298 μ s @ 6 MHz).

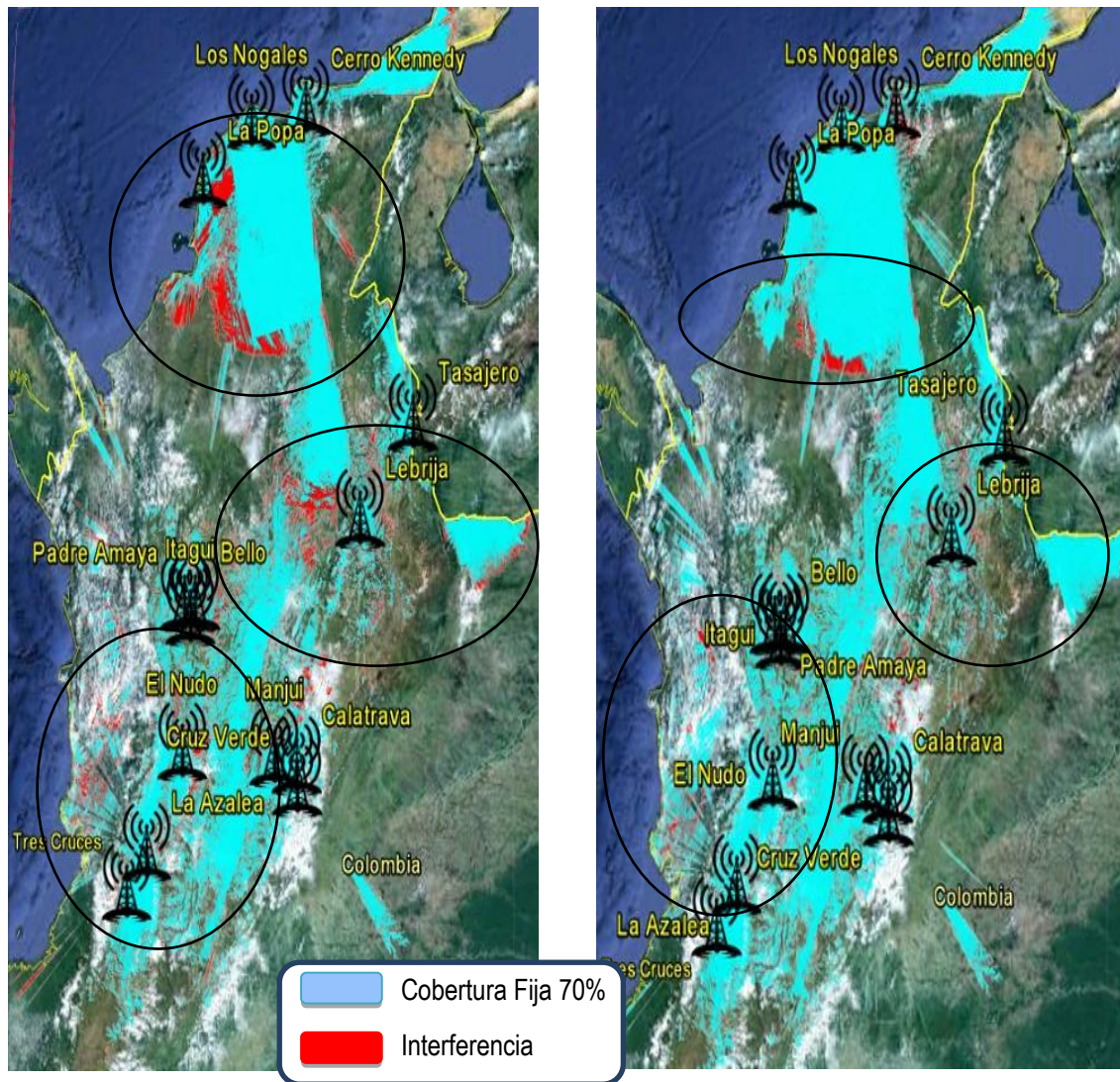


Figura 22. Cobertura del modo DVB-T2 2(16KE, GI 1/8) en SFN para recepción fija 70%. (Izquierda) sin retardos artificiales, (Derecha) con retardos artificiales en los transmisores.

Estos resultados han sido obtenidos con y sin retardos en los transmisores, los cuales son listados en la Tabla 25. En la Figura 22 las elipses resaltan las principales zonas de interferencias que se generan en el territorio Colombiano, se observa la importancia de optimizar los retardos artificiales en los transmisores ya que reducen las interferencias hasta 55% con este modo propuesto.

Transmisor Frecuencia 16 (485 MHz).							
	Calatrava	Manjui	Tres Cruces	Bello	Lebrija	La Popa	Cerro Kennedy
Retardo (µs)	000	000	520	250	490	700	420
	Cruz Verde	Itagüí	Los Nogales	Padre Amaya	La Azalea	Tasajero	El nudo
Retardo (µs)	120	530	550	270	420	450	480

Tabla 25. Retardos artificiales para el modo DVB-T2 opción 2 (FFT 16KE, GI 1/8)

La Tabla 26 resume los porcentajes de población con cobertura e interferencia de dicha topología de red en condiciones de recepción fija 70% estimada a partir de la capa de municipios de Colombia.

Tipo de Recepción		Recepción Fija 70%		Recepción Fija 70% Con Retardos		Reducción Interferencia
Modo de Transmisión	Población Colombia	Cobertura	Interferencia	Cobertura	Interferencia	Reducción Interferencia (%)
DVB-T 16QAM CR 3/4 FFT 8KE GI 1/4	46'507.282	58,9	2,8	60,3	1,4	50
DVB-T2 16QAM CR 3/4 FFT 8KE GI 1/4	46'507.282	61,1	2,4	62,2	1,2	50
DVB-T2 16QAM CR 3/5 FFT 16KE GI 1/8	46'507.282	63,2	2,0	64,2	0,9	55

Tabla 26. Estimaciones de ganancia en cobertura para DVB-T/T2 en redes SFN

En base a los resultados de la Tabla 26 se *puede afirmar que para el mismo de transmisión (16QAM CR 3/4 FFT8KE, GI1/4).solo actualizando la tecnología de DVB-T a DVB-T2 se consigue un 3.8%(1.764.276 de habitantes) más de cobertura nacional en toda Colombia.* Esta ganancia de cobertura se debe a la reducción de 2.7 dB del valor mínimo de CNR que se

requiere para una correcta decodificación. Por otro lado la reducción de 2.7 dB en la CNR es gracias a los factores de corrección que implementa DVB-T2, uno de ellos la codificación FEC.

Además se observa en la Tabla 26 que utilizando el modo DVB-T2 opción 2 (16QAM FFT 16KE) con un GI 1/8 sin retardos artificiales se consigue 63,2% de población cubierta para recepción fija *Comparando este modo opción 2 con el modo de referencia DVB-T sin retardos, deducimos que ofrece 7,3% (3.395.031 de habitantes) más de cobertura nacional en el territorio Colombiano.*

En relación con las zonas de interferencias, se logra reducir un 50% al aplicar retardos artificiales en los transmisores para todos los modos propuestos. Para el modo DVB-T2 opción 2 se consigue que *tan solo el 0.9% de la población Colombiana tendría interferencias (418.565 habitantes)*. Finalmente si comparamos la población inicial con interferencia utilizando el modo de referencia DVB-T con retardos y los modos T2 opción 2 con retardos podemos observar que *se reduce la población que experimenta interferencia en un 35.7%*. En general con este modo de transmisión y la utilización de retardos artificiales se obtiene un porcentaje de población cubierta del 64.2%.

5.2.3 Ganancia SFN DVB-T2

5.2.3.1 Modos de transmisión propuestos DVB-T2

	MODO DE TRANSMISIÓN		
	DVB-T (Referencia)	DVB-T2 opción 1	DVB-T2 opción 2
Tamaño FFT	8K	32K	32K
Modo Normal/ Extendido	Extendido	Extendido	Extendido
GI	1/4	19/128	1/8
Modulación	16QAM	64QAM	64QAM
CR	3/4	3/5	3/5
PP	PP1	PP2	PP2
CNR Rice ¹¹ (dB)	15.7	15.2	15.2
Intensidad de Campo Mínimo E _{min} (dBμV/m ²) Recepción Fija 70%	41,5	39,5	39,5
Distancia entre TxS SFN	90 km	212 km	180 km
Capacidad de transmisión	11.2 Mbps	15.8 Mbps	16.2 Mbps
Ganancia en Distancia	0%	+135%	100%
Ganancia Capacidad	0%	+41%	+44,6%

Tabla 27. Modos de transmisión a evaluar para Ganancia SFN en el diseño de las redes DVB-T2 para Colombia

¹¹ Umbral calculado siguiendo el procedimiento descrito para DVB-T2 en las recomendaciones [EBU3348]

En la Tabla 27 se presentan 2 (dos) modos de transmisión DVB-T2 que ofrecen similares porcentajes de nivel de cobertura poblacional en el territorio Colombiano frente al modo de referencia DVB-T de RTVC. Los modos DVB-T2 se caracterizan porque ofrecen una ganancia en tamaño en SFN. *Se puede identificar que la separación entre transmisores puede duplicarse e incluso llegar a un 135% más de la permitida por el modo DVB-T de referencia.* Los umbrales mínimos de CNR para una correcta decodificación sufren una leve reducción de 0.5 dB principalmente por el cambio de *Code Rate* y factores de corrección implementados en DVB-T2, para más detalle ver la sección 2.6 *También podemos observar que estos modos de transmisión ofrecen un aumento en capacidad del sistema entre el 41% y el 44.6% dependiendo de la combinación FFT y GI seleccionada respecto a su antecesor DVB-T.* Adicionalmente, podemos observar que los modos que cambian el tamaño FFT de 8K a 32K sufren una penalización en movilidad debido a que la separación entre portadoras se reduce (mayor número de portadoras en el mismo ancho de banda) y por tanto aumenta la probabilidad de la interferencia interportadora (*ICI por sus siglas en Ingles*) en condiciones de recepción móvil (interferencia generada principalmente por el efecto Doppler propio de estos canales de recepción).

En la Figura 23 se observa la superposición de las huellas de interferencias para el modo DVB-T frente a los modos DVB-T2 propuestos para evaluar la ganancia SFN que ofrece el estándar de segunda generación, se puede ver claramente como disminuyen las zonas de interferencias haciendo un cambio en la combinación FFT e intervalo de guarda.

Las zonas de interferencia para el modo DVB-T (16 QAM CR 3/4 FFT 8KE GI 1/4) son visualizadas en color azul marino, para el modo DVB-T2 opción 1 (64 QAM CR 3/5 FFT 32KE GI 19/128) en color morado y finalmente para el modo DVB-T2 opción 2 (64 QAM CR 3/5 FFT 32KE GI 1/8) en color amarillo.

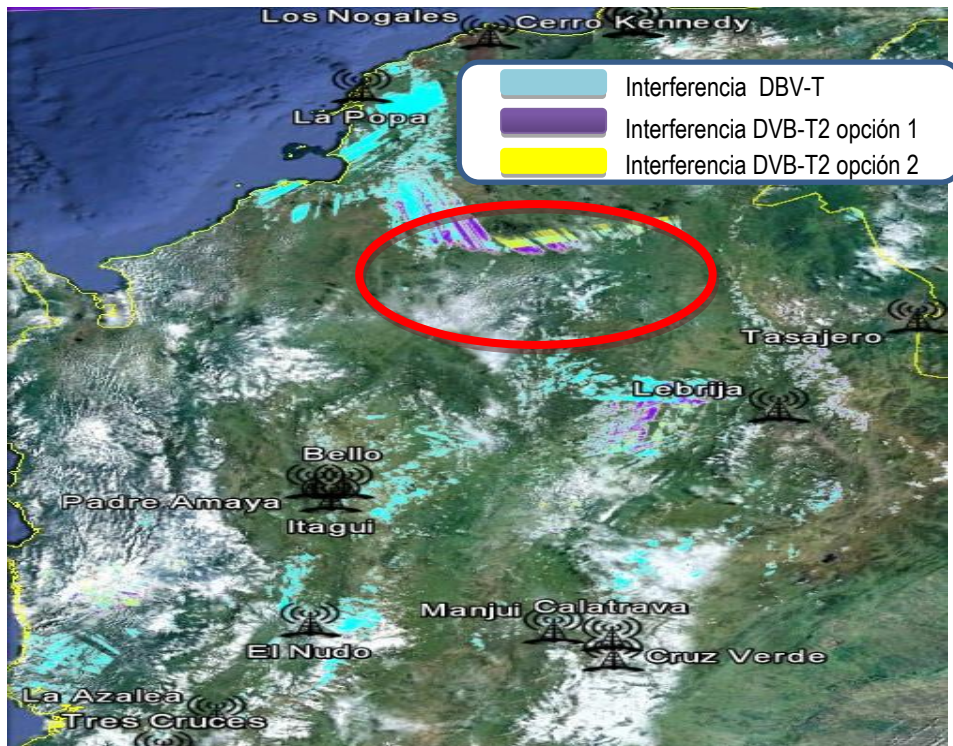


Figura 23. Superposición huellas de interferencia DVB-T Vs DVB-T2

5.2.3.2 Resultados Cobertura Modo DVB-T2 1 (FFT 32KE, GI 19/128)

La Figura 24 muestra las huellas de cobertura en todo el territorio nacional obtenida por el diseño de red TDT del operador público RTVC en topología SFN y utilizando el modo de transmisión DVB-T2 opción 1 (FFT 32KE y un GI de 19/128) con lo cual se consigue una separación máxima entre transmisores de 212 km (tiempo de guarda 709 μ s @ 6 MHz).

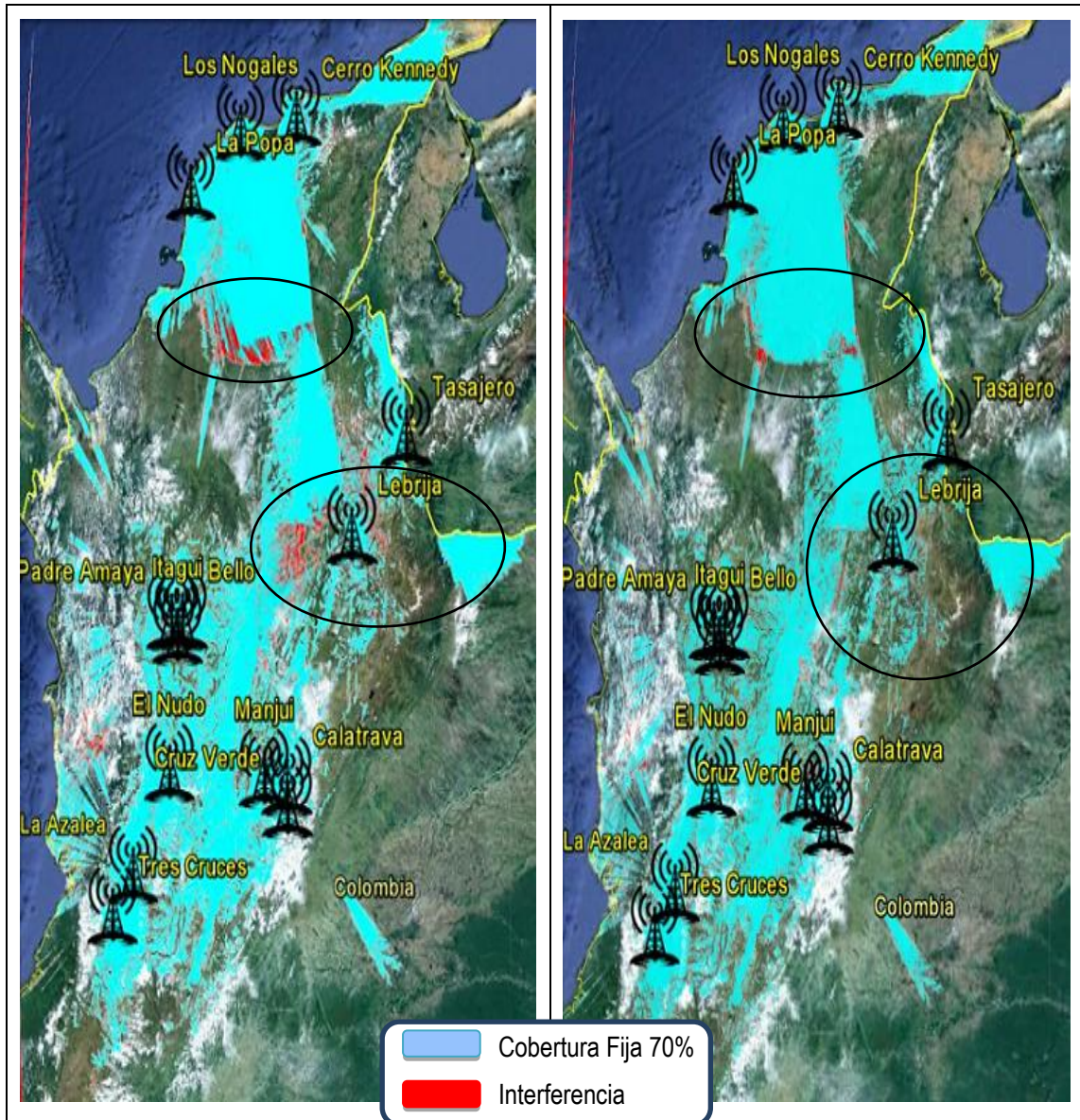


Figura 24. Cobertura del modo DVB-T2 opción 1 (32KE, GI 19/128) en SFN para recepción fija 70%.
(Izquierda) sin retardos artificiales, (Derecha) con retardos artificiales en los transmisores

Estos resultados han sido obtenidos con y sin retardos en los transmisores, los cuales son listados en la Tabla 28. Se puede observar que el modo que ofrece la máxima distancia entre transmisores, ofrece también el menor porcentaje de interferencia en la red de DVB-T2, principalmente por el cambio del tamaño de FFT e intervalo de guarda.

Transmisor Frecuencia 16 (485 MHz).							
	Calatrava	Manjui	Tres Cruces	Bello	Lebrija	La Popa	Cerro Kennedy
Retardo (µs)	000	000	710	250	500	500	200
	Cruz Verde	Itagüí	Los Nogales	Padre Amaya	La Azalea	Tasajero	El nudo
Retardo (µs)	000	360	400	150	370	600	500

Tabla 28. Retardos artificiales para el modo DVB-T2 opción 1 (32KE, GI 19/128)

La Tabla 29 resume los porcentajes de población con cobertura e interferencia de dicha topología de red en condiciones de recepción fija 70% estimada a partir de la capa de municipios de Colombia.

Tipo de Recepción		Recepción Fija 70%		Recepción Fija 70% Con Retardos		Reducción Interferencia
Modo de Transmisión	Población Colombia	Cobertura	Interferencia	Cobertura	Interferencia	Reducción Interferencia (%)
DVB-T 16QAM CR 3/4 FFT 8K GI 1/4	46'507.282	58,9	2,8	60,3	1,4	50
DVB-T2 64QAM CR 3/5 FFT 32KE GI 19/128	46'507.282	61,6	0,7	61,8	0,5	28.5

Tabla 29. Estimaciones de cobertura para el modo DVB- T2 opción 1

De la tabla anterior se puede identificar que **tan solo el 0.5% (232.536 de habitantes) de la población tendría interferencias** para recepción fija 70%. **Se puede afirmar que con este modo DVB-T2 32KE, GI 19/128 se alcanza una separación entre transmisores del 135% más de la permitida por modo DVB-T de referencia y un 4.6% más de cobertura nacional.** En general con este modo de transmisión y la utilización de retardos artificiales se obtiene un **porcentaje de población cubierta del 61.6%**, lo que representa técnicamente la misma cobertura que la conseguida con dos frecuencias.

Los municipios que sufrirían interferencia generada por la propia red SFN utilizando este modo de transmisión pueden ser cubiertos con transmisores de baja potencia o gap fillers.

5.2.3.3 Resultados Cobertura Modo DVB-T2 2 (FFT 32KE GI 1/8)

La Figura 25 muestra las huellas de cobertura obtenida por el diseño de red TDT de RTVC fase I en topología SFN y utilizando el modo de transmisión DVB-T2 opción 2 (FFT 32KE y un GI de 1/8) el cual es equivalente en distancia máxima entre transmisores de 180 km (tiempo de guarda 597 μ s @ 6 MHz).

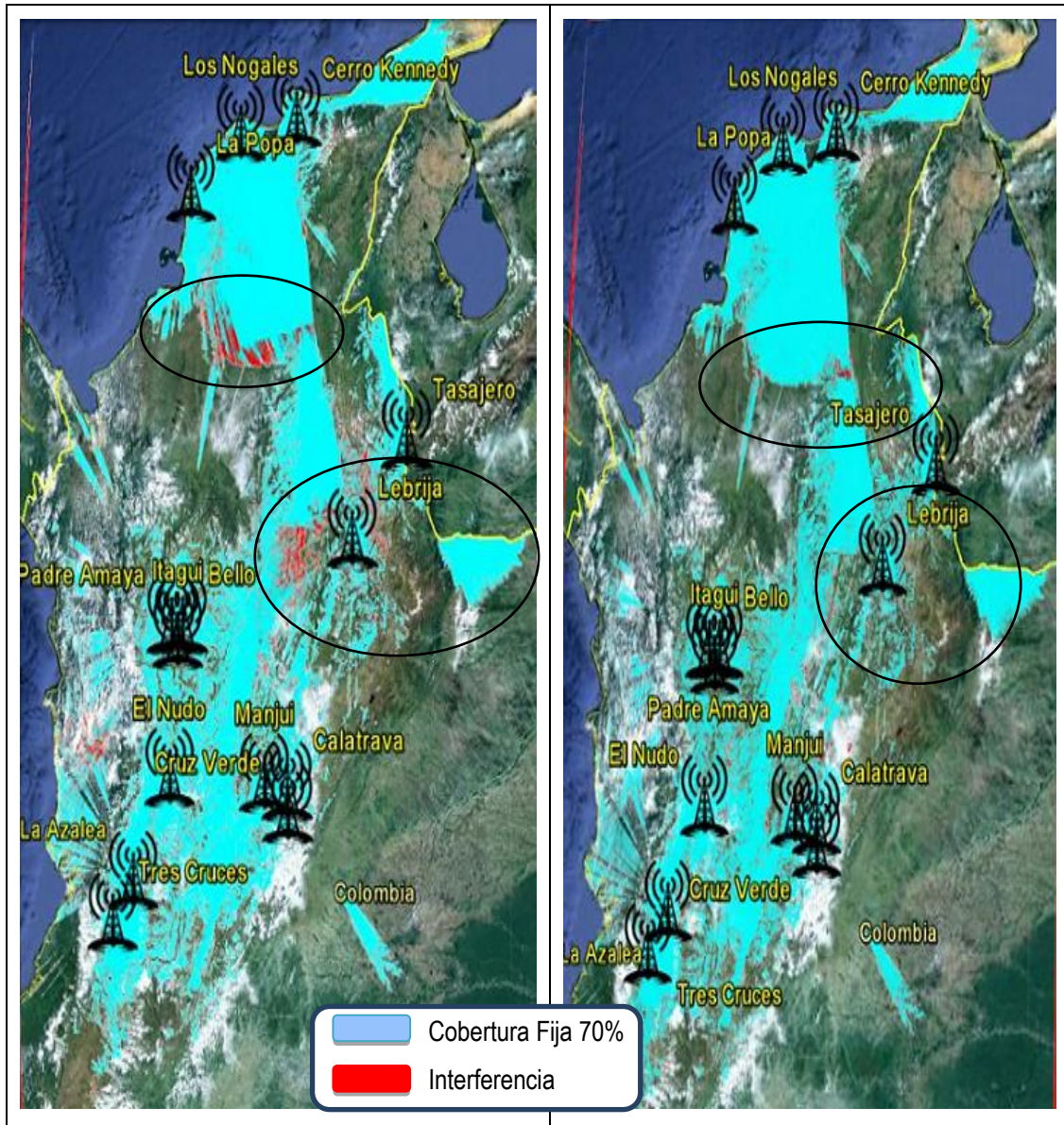


Figura 25. Cobertura del modo DVB-T2 opción 2 (32KE, GI 1/8) en SFN para recepción fija 70%. (Izquierda) sin retardos artificiales, (Derecha) con retardos artificiales en los transmisores.

Estos resultados han sido obtenidos con y sin retardos en los transmisores, los cuales son listados en la Tabla 30. Se puede observar que las interferencias generadas con el modo DVB-T2 opción 2 son menores que las del diseño original de RTVC, y muy parecidas al modo DVB-T2 opción 1.

Transmisor Frecuencia 16 (485 MHz).							
	Calatrava	Manjui	Tres Cruces	Bello	Lebrija	La Popa	Cerro Kennedy
Retardo (µs)	000	000	710	250	500	500	150
	Cruz Verde	Itagüí	Los Nogales	Padre Amaya	La Azalea	Tasajero	El nudo
Retardo (µs)	000	360	400	200	370	600	500

Tabla 30. Retardos artificiales para el modo DVB-T2 opción 2 (FFT 32KE, GI 1/8)

La Tabla 31 resume los porcentajes de población con cobertura e interferencia de dicha topología de red en condiciones de recepción fija 70%:

Tipo de Recepción		Recepción Fija 70%		Recepción Fija 70% Con Retardos		Reducción Interferencia
Modo de Transmisión	Población Colombia	Cobertura	Interferencia	Cobertura	Interferencia	Reducción Interferencia (%)
DVB-T 16QAM CR 3/4 FFT 8K GI 1/4	46'507.282	58,9	2,8	60,3	1,4	50
DVB-T2 64QAM CR 3/5 FFT 32KE GI 19/128	46'507.282	61,6	0,7	61,8	0,5	28,5
DVB-T2 64QAM CR 3/5 FFT 32KE GI 1/8	46'507.282	61,4	0,9	61,6	0,7	22,3

Tabla 31. Estimaciones de cobertura para evaluar ganancia SFN para DVB-T/T2 en redes SFN

En la tabla 31 se puede identificar que utilizando el modo DVB-T2 opción 2 (FFT 32KE GI 1/8) se consigue un porcentaje de cobertura muy similar al obtenido con el modo DVB-T2 opción 1 (FFT 32KE GI 19/128) y al modo DVB-T de referencia a dos frecuencias.

Se puede concluir que con el modo opción 2 (FFT 32KE, GI 1/8) se consigue alcanzar una ganancia en tamaño SFN del 100%, al mismo tiempo se consigue la misma cobertura nacional y la misma interferencia frente al modo DVB-T de referencia, pero se estaría utilizando una única frecuencia nacional en lugar de dos, por lo tanto se estaría haciendo un mejor uso del espectro radioeléctrico.

6 Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro para la Red TDT en Colombia con DVB-T2

6.1 Conclusiones

- ❖ Para el diseño inicial de red DVB-T seleccionado por RTVC (16QAM FFT 8KE GI 1/4) se pudo identificar que para recepción *portable outdoor* y *portable indoor* 95% no sufre interferencias la red al desplegar una topología SFN. Este efecto se debe a que los transmisores están ubicados cerca de las ciudades principales objetivo y por tanto los niveles de potencia útil son suficientemente altos comparados con los niveles de potencia interferente recibida de los transmisores lejanos. Es por esto que en el marco de este proyecto para evaluar las prestaciones de DVB-T2 en redes SFN de gran tamaño se limitó a estimaciones de cobertura fija 70% donde se presentan zonas de no cobertura por interferencias generadas por la propia red DVB-T2.
- ❖ Modelando el diseño inicial de red TDT basado en dos frecuencias de RTVC en topología SFN manteniendo su configuración de red, es decir, heredando la ubicación de los emplazamientos, patrón de radiación de las antenas, potencia de emisión en los transmisores, modelo de propagación, se puede concluir que para el mismo modo de transmisión (16QAM CR 3/4 FFT8KE, GI1/4) actualizando la tecnología de DVB-T a DVB-T2 y topología de red MFN a SFN se consigue 2.2%(1.023.160 de habitantes) más de cobertura nacional en toda Colombia, pero aumentarían 50% las interferencias de la red tal como se observa en la Tabla 32.

Topología Red	Modo de transmisión	Distancia Máx. SFN	Población Cubierta	Población Interferida	Capacidad
MFN Nacional 2 frecuencias	DVB-T 16QAM CR 3/4 FFT 8K GI 1/4	90 km	60,7%	0.6%	11,2 Mbps
SFN Nacional	DVB-T2 16QAM CR 3/4 FFT 8K GI 1/4	90 km	62,2%	1,2%	11,3 Mbps

Tabla 32. Cobertura recepción fija 70% de la red RTVC para DVB-T/T2 en topología MFN y SFN

- ❖ La Tabla 33 resume las configuraciones DVB-T2 que mantienen el nivel de cobertura y maximizan la capacidad, y las que mantienen la capacidad y maximizan la cobertura. A nivel de tamaños de FFT, las principales diferencias entre estas configuraciones son la menor interferencia en canal adyacente y el peor rendimiento en movilidad de los modos 16K con respecto a los modos 8K. La combinación entre el tamaño de la FFT y el intervalo de guarda ha sido seleccionado de tal forma que la distancia máxima SFN es constante, e igual a la soportada por el modo DVB-T, 90 km.

Parámetro	DVB-T Referencia	Igual Cobertura que DVB-T		Igual Capacidad que DVB-T	
		DVB-T2 Opción 1	DVB-T2 Opción 2	DVB-T2 Opción 3	DVB-T2 Opción 4
FFT	8K	16KE	16KE	8KE	16KE
GI	1/4	1/8	1/8	1/4	1/8
Modulación	16QAM	64QAM	64QAM	16QAM	16QAM
Codificación	3/4	3/5	2/3	3/4	3/5
Patrón Pilotos	PP1	PP3	PP3	PP1	PP3
Capacidad	11,25 Mbps	17,25 Mbps	19,2 Mbps	11,3 Mbps	11,5 Mbps
CNR	15,7 dB	14,8 dB	16,1 dB	12,9 dB	9,9 dB
Población Cubierta Con Retardos (%)	60,3	60,6	60,2	62,2	64,2

Tabla 33 .DVB-T vs. DVB-T2

El modo DVB-T (FFT 8KE GI 1/4 16QAM 3/4) seleccionado inicialmente por RTVC que ofrece 11,25 Mbps puede ser actualizado a un modo DVB-T2 con MODCOD (64 QAM 3/5) logrando ganancias en capacidad de transmisión de hasta 53,5% (dependiendo del tamaño de FFT, intervalo de guarda y patrón de portadoras).

En concreto se puede actualizar a los modos (FFT 16KE GI 1/8 64 QAM CR 3/5 PP3) que ofrece 17,25 Mbps o el modo (FFT 16KE GI 1/8 64 QAM CR 2/3 PP3) que ofrece

19,2 Mbps a cambio de proteger con menor cantidad de bits de paridad la información y un ligero aumento del nivel mínimo de CNR de 0.4 dB.

Igualmente se puede seleccionar el modo DVB-T2 (FFT 16KE GI 1/8 16 QAM CR 3/5 PP3) que mantiene aproximadamente la misma capacidad ofrecida por el modo DVB-T logrando una reducción en el mínimo nivel de CNR requerido de hasta 5.7 dB, esto se traduce en una ganancia de cobertura poblacional del 7.3% (3.395.031 de Habitantes).

- ❖ La Tabla 34 resume los porcentajes de población cubierta e interferida para recepción fija 70% de la red RTVC para los diferentes modos de transmisión DVB-T2 identificados en este proyecto para el despliegue de redes SFN de gran tamaño en Colombia. Se puede observar que el modo DVB-T seleccionado a día de hoy por RTVC obtiene una cobertura para recepción fija del 60,7% utilizando una topología de red MFN con 2 frecuencias, Al cambiar a un modo de transmisión DVB-T2 que permite la máxima distancia SFN (FFT 32KE GI 19/128), se logra reducir el porcentaje de población interferida al 0,5%, menor al obtenido en la red MFN. Sin embargo, un mejor modo DVB-T2 puede ser la combinación (FFT 32KE GI 1/8), que presenta una cobertura muy cercana al modo que permite la máxima distancia SFN, obtiene un porcentaje de interferencias parecido al modo DVB-T y un mayor aumento de capacidad del 44,60%. El principal inconveniente sería la reducción del rendimiento en movilidad. Las interferencias que se presentan podrían ser cubiertas a través del despliegue de transmisores de baja potencia o de *gap-fillers*.

Topología Red	Tamaño FFT Intervalo Guarda GI	Distancia Máx. SFN	Población Cubierta	Población Interferida	Ganancia Capacidad respecto a DVB-T
MFN Nacional 2 frecuencias	FFT 8K GI 1/4 (Referencia RTVC)	90 km	60,7%	0.6%	0,00
SFN Nacional	FFT 32KE GI 19/128	212 km	61,80%	0,5%	41,07%
	FFT 32KE GI 1/8	180 km	61,60%	0,7%	44,60%

Tabla 34. Cobertura para recepción fija 70% de la red de RTVC para diferentes modos DVB-T/T2

MODCOD 64 QAM CR 3/5

6.2 Recomendaciones

- ❖ Para la provisión de servicios de TDT de recepción fija en Colombia, se recomienda el despliegue de redes SFN nacionales para el operador público RTVC. Estos diseños de red hacen un uso muy eficiente del espectro radioeléctrico y de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio se consiguen coberturas y tasas de transmisión muy superiores a las obtenidas por los diseños originales para DVB-T utilizando topología MFN de dos frecuencias.

Al desplegar la red DVB-T2 en topología SFN será la red más grande del mundo con canalización 6 MHz.

- ❖ Se recomienda actualizar a una MODCOD (64QAM CR 3/5) que se traduce en un aumento de la capacidad del 44,6% frente al modo inicial DVB-T elegido por RTVC y un tamaño de FFT de 32K y un intervalo de guarda GI de 1/8. Con este modo se generan muy pocas interferencias (0.7% en la red de RTVC) para recepción fija 70% sobre tejado, que podrían ser fácilmente eliminadas con transmisores de baja potencia o repetidores (gap-fillers).
- ❖ Teniendo en cuenta que la banda de canales 14 al 20 no puede ser utilizada en algunas zonas de frontera con Venezuela y Ecuador, se recomienda un cambio de banda para el uso de la red primaria de TDT en Colombia, por ejemplo la banda del canal 21 al 27.

6.3 Trabajo Futuro

❖ **Campañas de medida de campo que permitan calibrar los modelos de propagación y validar la sincronización entre transmisores.**

En planificación y estimación de cobertura de redes de TDT, la fiabilidad de los resultados siempre está ligada a la disponibilidad de información actualizada de las características propias de las estaciones base, del perfil de los usuarios, del plan de frecuencias, etc. y de la alta calidad de los mapas digitales. Sin embargo, es aún más importante disponer de *medidas de campo realizadas en el escenario real, que permitan por un lado calibrar los modelos de propagación utilizados en simulación, evaluar el verdadero rendimiento de los estándares en las condiciones propias del escenario y contrastar las estimaciones de señal y cobertura obtenidas en simulación.* Para el caso de Colombia, la necesidad de modelos de propagación calibrados a través de medidas tiene una mayor relevancia debido a la presencia de entornos montañoso, valles y colinas para los cuales a día de hoy no existen modelos específicos en la literatura. Igualmente, el rendimiento de las redes SFN en condiciones colombianas requiere de una *amplia campaña de medidas de campo que permitan validar la sincronización entre transmisores, el cálculo de los retardos artificiales, la combinación coherente de señal OFDM en condiciones reales de operación.*

❖ **Estudio de optimización de los sistemas radiantes de las estaciones Base.**

También es importante resaltar que se requiere un *estudio de optimización de los sistemas radiantes de las estaciones que emitirán servicios nacionales y regionales simultáneamente,* teniendo en cuenta que tales sistemas radiantes a día de hoy están optimizados para maximizar la cobertura y trabajar en configuración SFN en la mayor área posible. El principal inconveniente es que para los servicios regionales la optimización puede ser diferente teniendo en cuenta que el objetivo es dar cobertura en la zona de interés únicamente minimizando los niveles de interferencia generados a otros transmisores.

❖ **Evaluar la técnica de transmisión MISO ofrecida por DVB-T2 en el entorno geográfico Colombiano**

El estándar DVB-T2 incluye un modo de transmisión conocido como MISO (*Multiple Input Single Output*) que garantiza una correcta combinación de señales OFDM comparada con una red SFN clásica y puede traducirse en un aumento de la cobertura. Sin embargo, la utilización de MISO implica doblar la cantidad de pilotos, que se traduce en una reducción de la capacidad. Para los estudios realizados en el marco de este proyecto sería importante *evaluar la ganancia de cobertura MISO.* Es necesario identificar las zonas colombianas donde podría ser interesante implementar MISO, y realizar una campaña de medidas de rendimiento en escenario reales.

❖ **Estudio de repetidores Gap-Fillers orientados a cubrir zonas de interferencias en redes SFN**

Estudio y planificación de transmisores de baja potencia o de repetidores (*gap-fillers*) para llevar a 0% el porcentaje de municipios que experimentan interferencias generadas por la propia red SFN en los diseños presentados en este estudio.

Referencias

- [Beu09] “*Digital Terrestrial Broadcasting Networks*”. Roland Beutler. Lecture Notes in Electrical Engineering, Volume 23, 2009. SpringerLink Ed.
- [EBU3348] European Broadcasting Union. EBU-TECH 3348. “*Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2*”. Ginebra. Mayo 2012.
- [ETSI302755] Estándar ETSI EN 302 755. "Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)". Abril 2012.
- [ETSIA14] DVB Documento A14-2. “Digital Video Broadcasting (DVB); Measurement guidelines for DVB systems; Amendment for DVB-T2 System”. Julio 2012.
- [RRC06] UIT RCC06. "Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06)".
- [TS102831] Especificación ETSI TS 102 831. “*Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*”. Agosto 2012.
- [UIT1368] Recomendación UIT-R BT.1368-9. “Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas”. Diciembre 2011.
- [UIT1546] Recomendación UIT-R 1546-4. “Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz”. Octubre 2009.
- [UIT526] Recomendación UIT-R 526-12. "Propagación por difracción". Febrero 2012.
- [SCH82] S. Schwartz y Y. Yeh, “On the distribution function and moments of power sums with log-normal components”, The Bell System Technical Journal, 61, pp. 1441–1462, 1982
- [SAF93] A. Safak, “Statistical Analysis of the Power Sum of Multiple Correlated Log-Normal Components”, IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 42, no.1, pp. 58-61, 1993.
- [PIRI03] P. Pirinen, "Statistical power sum analysis for nonidentically distributed correlated lognormal signals", Proc. 2003 Finnish Signal Processing Symp., pp.254 - 258 , 2003.

Abreviaturas

3DTV Three-Dimensional Television
ATSC Advanced Television System Committee
ATSC-M/H Advanced Television System Committee Mobile/handheld
CNR Carrier to Noise Ratio
DMB-T Digital Multimedia Broadcasting
DVB Digital Video Broadcasting
DVB-H Digital Video Broadcasting- Handheld
DVB-NGH Digital Video Broadcasting- Next Generation Handheld
DVB-T Digital Video Broadcasting- Terrestrial
DVB-T2 Digital Video Broadcasting- Terrestrial 2nd Generation
FEC Forward Error Correction
HDTV High Definition Television
ICI Interferencia entre portadoras
ISDB-T Integrated Services Digital Broadcasting
LSA Local Services Area
MFN Multi Frequency Network
MIMO Multiple-Input Multiple-Output
MISO Multiple-Input SingleOutput
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PLP Physical Layer Pipes
RS Reed Salomon
SFN Single Frequency Network
TDT Television Digital Terrestre

ANEXO A. Escenario de Planificación de Red DVB-T

A.1 Escenario original DVB-T

El escenario de partida para la planificación es el diseño inicial de red DVB-T de RTVC fase I que consta de 14 transmisores, los parámetros de configuración de la red se mantienen fijos, parámetros como ubicación de los emplazamientos, patrón de radiación de las antenas, potencia de emisión de las estaciones base y modelo de propagación, este diseño inicial está proyectado para dar cubrimiento al 54% de la población Colombiana. La formación presentada en esta sección está basada en los datos del anexo 2 de las especificaciones técnicas mínimas 04102012 de RTVC y en el documento 20122030030631 de RTVC donde informa a la ANE las especificaciones técnicas de las estaciones de TDT.

La Tabla 35 resume las principales características del modo de transmisión DVB-T seleccionado a día de hoy por RTVC en dicho diseño de red.

	Modo de transmisión (DVB-T inicial)
Tamaño FFT	8KE
GI	1/4
Modulación	16QAM
CR	3/4
PP	PP1
Mínima CNR (canal Rice)	15.7 dB ¹²
Capacidad de transmisión	11.2 Mbps
Distancia entre TxS SFN	90 km
Posibles Frecuencias	16, 18

Tabla 35. Modo de transmisión DVB-T proyectado por RTVC

Siguiendo este diseño, en el plan nacional de frecuencias se ha reservado los canales 16 y 18 al operador público RTVC. Por último se contempla la asignación de una tercera frecuencia al operador RTVC en algunas zonas del país con alta interferencia intra e inter redes y/o en zonas de frontera para evitar interferencias con países vecinos.

La Tabla 36 resumen los principales parámetros de las estaciones que se proyectan desplegar en la Fase I por parte de RTVC, respectivamente:

¹² Umbral calculado siguiendo el procedimiento para DVB-T del acuerdo de Ginebra de 2006 [GE06] y las actas de la conferencia regional de radiocomunicaciones de la UIT de 2006 [CRR-2006].

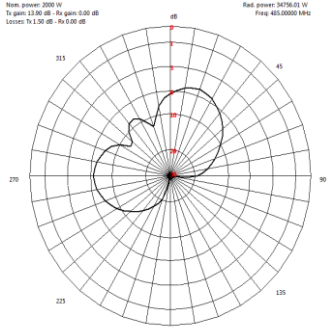
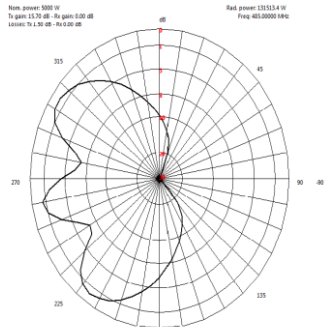
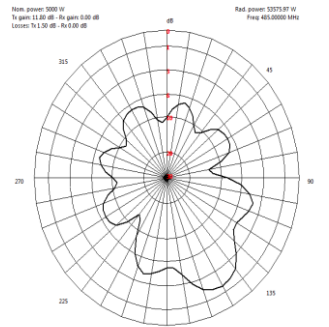
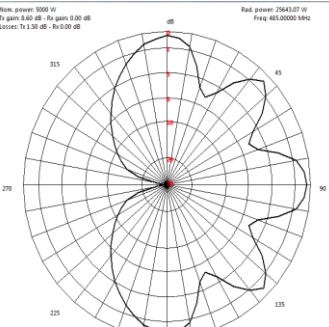
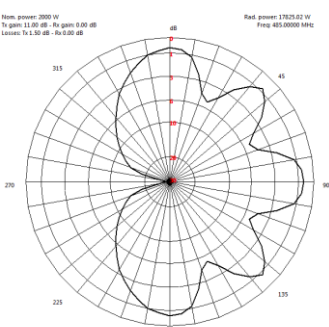
Estación	UBICACIÓN (WGS-84)		Características RF RTVC		
	LATITUD (gg mm ss)	LONGITUD (gg mm ss)	Canal Nacional	Canal Regional	Potencia Nominal Tx Nal. (W)
BELLO	06 16 56.80 N	75 32 01.8 O	16	18/40	2000
CALATRAVA	04 43 37.4 N	74 04 50.2 O	16	18/28	2000
CERRO KENNEDY	11 06 46.4 N	74 02 11.0 O	16	18/35	5000
CRUZ VERDE	04 31 16.0 N	74 04 27.2 O	16	18	2000
ITAGÜÍ	06 08 36.2 N	75 36 05.4 O	16	18/40	2000
LA AZALEA	03 52 04.2 N	76 14 39.7 O	16	18	5000
LA POPA	10 25 13.0 N	75 31 33.0 O	16	No asignado	5000
LEBRIJA	07 04 34.4 N	73 11 48.2 O	16	No asignado	5000
MANJUI	04 48 11.1 N	74 23 36.5 O	16	18/28	5000
NOGALES, LOS	10 59 39.6 N	74 49 48.0 O	16	18/35	2000
PADRE AMAYA	06 16 47.8 N	75 41 10.3 O	16	18/40	5000
TASAJERO	07 59 31.3 N	72 27 43.9 O	No asignado	No asignado	1000
TRES CRUCES	03 28 04.75 N	76 32 45.2 O	16	18	5000
EL NUDO	04 50 50.5 N	75 42 52.8 O	No asignado	No asignado	2000

Tabla 36. Principales parámetros de configuración de las estaciones de RTVC.

A.2 Características técnicas del sistema radiante

La Tabla 37 resume los parámetros de configuración del sistema radiante. La información presentada en esta sección está basada en los datos del anexo 2 de las especificaciones técnicas mínimas 04102012 de RTVC y en el documento 20122030030631 de RTVC donde informa a la ANE las especificaciones técnicas de las estaciones de TDT que pretende desplegar en 2012 (Fase I). El procedimiento para generar los patrones de radiación de las 14 estaciones fue detallado en la sección 4.2:

ESTACIÓN	SSRR				Patrón Radiación Horizontal
	Configuración	Azimet del Arreglo (°)	"Tilt" Eléctrico (°)	"Zero Fill" 1 (%)	
BELLO	(4:4:.)	(210:300)	(6:6)	(20:20)	
CALATRAVA	(4:4:4:4)	(0:90:180:270)	(1:3:1:3)	(15:15:15:15)	
CERRO KENNEDY	(4:8:4:.)	(49:229:319)	(6:2:6)	(20:10:20)	
CRUZ VERDE	(4:4:.)	(210:300)	(6:6)	(30:30)	

ITAGÜÍ	(4:2::)	(20:270)	(5:5)	(20:0)	 <p>Norm. power: 2000 W Tx gain: 2.00 dB - Rx gain: 0.00 dB Losses: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB</p> <p>Rad. power: 34796.01 W Freq: 405.00000 MHz</p>
LA AZALEA	(8:8::)	(214:304)	(1:1)	(20:20)	 <p>Norm. power: 5000 W Tx gain: 3.75 dB - Rx gain: 0.00 dB Losses: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB</p> <p>Rad. power: 13133.4 W Freq: 405.00000 MHz</p>
LA POPA	(2:4:2:2)	(60:150:240:330)	(5:3:5:5)	(0:20:0:0) ^(a)	 <p>Norm. power: 1000 W Tx gain: 1.00 dB - Rx gain: 0.00 dB Losses: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB</p> <p>Rad. power: 5025.97 W Freq: 405.00000 MHz</p>
LEBRIJA	(2:2:2:2)	(0:90:180)	(3:3:3)	(0:0:0)	 <p>Norm. power: 3000 W Tx gain: 2.00 dB - Rx gain: 0.00 dB Losses: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB</p> <p>Rad. power: 15643.07 W Freq: 405.00000 MHz</p>
LOS NOGALES	(4:4:4:4)	(0:90:180)	(2:2:2)	(20:20:20) ^(b)	 <p>Norm. power: 2000 W Tx gain: 1.00 dB - Rx gain: 0.00 dB Losses: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB</p> <p>Rad. power: 17825.02 W Freq: 405.00000 MHz</p>

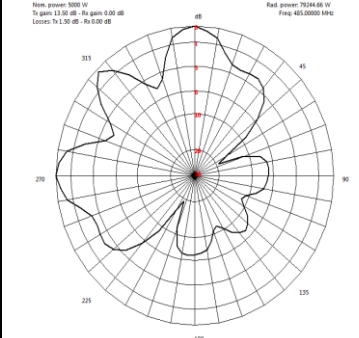
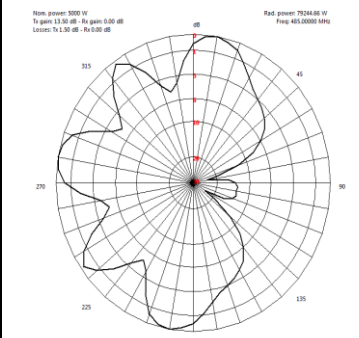
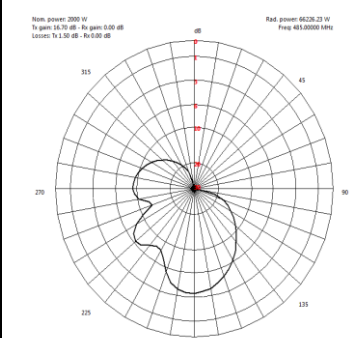
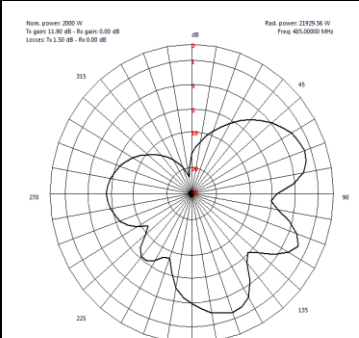
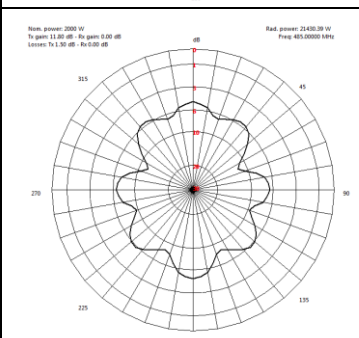
MANJUI	(8:8:8:8)	(0:90:180:270)	(1:3:3:1)	(0:20:20:0)	 <p> <small> Nom. power: 3000 W Tx gain: 13.50 dB - Rx gain: 0.00 dB Location: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB </small> </p> <p> <small> Rad. power: 79246.66 W Freq: 485.00000 MHz </small> </p>
PADRE AMAYA	(8:8:8:8)	(10:100:190:280)	(1:5:1:1)	(0:20:0:0)	 <p> <small> Nom. power: 3000 W Tx gain: 13.50 dB - Rx gain: 0.00 dB Location: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB </small> </p> <p> <small> Rad. power: 79246.66 W Freq: 485.00000 MHz </small> </p>
TASAJERO	(6:2)	(180:270)	(3:2)	(11:5)	 <p> <small> Nom. power: 2000 W Tx gain: 14.50 dB - Rx gain: 0.00 dB Location: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB </small> </p> <p> <small> Rad. power: 66226.23 W Freq: 485.00000 MHz </small> </p>
TRES CRUCES	(4:4:2)	(70:160:270)	(3:3:2)	(20:20:15)	 <p> <small> Nom. power: 2000 W Tx gain: 11.90 dB - Rx gain: 0.00 dB Location: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB </small> </p> <p> <small> Rad. power: 21829.56 W Freq: 485.00000 MHz </small> </p>
El Nudo	(2:2:4:2)	(0:90:180:270)	(0:5:5:5)	(0:0:20:0)	 <p> <small> Nom. power: 2000 W Tx gain: 13.00 dB - Rx gain: 0.00 dB Location: Tx 1.50 dB - Rx 0.00 dB </small> </p> <p> <small> Rad. power: 21430.39 W Freq: 485.00000 MHz </small> </p>

Tabla 37. Parámetros de configuración del sistema radiante de RTVC

A.3 Modelos de propagación

Para la planificación de cualquier sistema de telecomunicaciones es necesario conocer la cobertura radioeléctrica producida por los mismos. Debido a la complejidad del cálculo de la intensidad de campo de forma analítica en un punto dado, es necesario disponer de modelos de predicción de dicha intensidad de campo adecuados al entorno y escenario bajo análisis.

En la actualidad existen numerosos modelos de propagación para el cálculo de cobertura radioeléctrica que pueden dividirse en modelos para entornos rurales o modelos para entornos urbanos. Los modelos rurales consideran las particularidades de la propagación en espacios abiertos y en presencia de montañas, lagos, mares o zonas muy poco pobladas; mientras que los modelos urbanos tienen en cuenta las características especiales de la propagación debido a la presencia de calles, edificios, etc.

Cada modelo de propagación puede clasificarse como un modelo de propagación determinístico, estadístico o mixto, los cuales se detallan a continuación.

A.3.1 Modelos de propagación determinísticos

Los modelos de propagación Determinísticos hacen uso de las leyes electromagnéticas para predecir la potencia de señal recibida en una ubicación determinada. Para ello, usan directamente el perfil del terreno entre transmisor y receptor para lo cual se necesita del modelo digital del terreno (MDT) de la zona bajo estudio.

La mayoría de los modelos de propagación Determinísticos hacen uso de las propiedades de la geometría de Fresnel así como de los mecanismos de difracción para la predicción de la intensidad de campo de la señal recibida.

En la herramienta de planificación empleada, ICS Telecom, están disponibles, entre otros, los siguientes modelos de propagación Determinísticos: modelo de Fresnel, de Wojnar, o del modelo UIT-R 525/526.

Los dos primeros se usan junto con una geometría particular de difracción. El modelo UIT-R 525/526 ampliamente utilizado en cálculo de coberturas radioeléctricas, se detalla posteriormente.

A.3.2 Modelos de propagación estadísticos y mixtos

Los modelos de propagación estadísticos se basan en el uso de una serie de variables aleatorias así como de medidas. Algunos, usan información del escenario o entorno bajo análisis pero en un sentido más amplio, como puede ser la altura media del terreno o la altura media de los edificios. La ventaja en el uso de estos modelos es principalmente su velocidad de cómputo. En la herramienta ICS Telecom, un ejemplo de modelo de propagación estadísticos es el UIT-R 370 (obsoleto).

Los modelos mixtos, como su propio nombre indican, usan características tanto de los modelos Determinísticos como de los estadísticos. En ICS Telecom están disponibles los siguientes modelos mixtos: UIT-R 1546 para entornos rurales, o el modelo de okumura para entornos urbanos.

A.3.3 Modelos de propagación para sistemas de radiodifusión

Para la predicción de las pérdidas de propagación en entorno rural existen numerosos modelos de propagación. Sin embargo, los más utilizados en la actualidad son el UIT-R 526 y el UIT-R 1546, incluidos en la mayoría de herramientas de planificación radioeléctrica, incluida ICS Telecom. A continuación se detallan las particularidades de ambos modelos.

A.3.3.1 Modelo de propagación UITR-525/526

Este modelo de propagación incluye las pérdidas por espacio libre especificadas en la recomendación UIT-R 525 y de pérdidas por difracción contempladas en la recomendación [UIT-R 526].

Particularmente, el modelo UIT-R 526 contempla dos escenarios:

- Terreno liso
- Obstáculos aislados, donde los obstáculos circundantes no interactúan con el obstáculo en cuestión.

En el primer caso, el modelo UIT-R 526 considera principalmente las pérdidas por difracción en tierra esférica. En el segundo caso, cada obstáculo se considera como aristas independientes en los que se produce el efecto de la difracción. En ambos casos, cada obstáculo se puede modelar como aristas, cilindros, etc.

El modelo de la recomendación UIT-R 526 contempla un tercer tipo de terreno, el terreno ondulado con múltiples colinas, donde ninguna es dominante respecto de las otras. En este caso, la propia recomendación UIT-R 526 recomienda en su lugar, el empleo de la recomendación UIT-R 1546.

Una de las ventajas de este modelo, es su precisión, pues considera el perfil del terreno entre transmisor y receptor para el cálculo de la intensidad de campo en recepción. Sin embargo, este modelo no tiene en cuenta otros mecanismos de propagación como la reflexión en elementos circundantes.

A.3.3.2 Modelo de propagación UITR-1546

La recomendación UIT-R 1546 está indicada para la predicción de punto a zona de la intensidad de campo en los servicios de radiodifusión, móvil terrestre y móvil marítimo en la gama de frecuencias de 30 a 3.000 MHz y para distancias de 1 km a 1.000 km. Dicha recomendación se emplea principalmente para la planificación de sistemas de radiodifusión

La recomendación UIT-R 1546 se basa en unas curvas obtenidas de forma experimental. Dichas curvas se basan en datos obtenidos mediante mediciones y se refieren principalmente a las condiciones climáticas habituales en zonas templadas en las que existen mares fríos y mares cálidos, como por ejemplo, el Mar del Norte y el Mar Mediterráneo. Las curvas de los trayectos terrestres se prepararon con datos obtenidos sobre todo en zonas de clima templado, como es el caso en Europa y América del Norte. La propia recomendación advierte de que si existen zonas de diferente naturaleza a las indicadas, es necesario lograr una caracterización precisa de la propagación radioeléctrica en dicha zona.

En la aplicación del modelo, las curvas provistas por la recomendación son corregidas por frecuencia, terreno circundante, tipo de propagación (tierra, mar o mixto), altura de la antena transmisora y receptora, y variabilidad temporal. Además, el método incluye correcciones por obstrucciones del terreno derivadas del cálculo del perfil del mismo a través del modelo digital del terreno.

La gran ventaja de este modelo es su amplia utilización por todas las entidades implicadas en la planificación de sistemas DVB. De hecho, la Unión de Radiodifusores Europeos, EBU (European Broadcasting Union), emplea el modelo UIT-R 1546 para la planificación de las futuras redes DVB-T2.

Sin embargo, presenta la desventaja de que las curvas se propusieron tras realizar medidas en Europa y Norteamérica, presentando una falta de información para Sudamérica, Asia y África, por lo que los resultados pueden diferir bastante en entornos considerablemente diferentes a los planteados en la recomendación.

La aplicación de la recomendación UIT-R 1546 ha creado una base común para todos los agentes participantes en aspectos de planificación de frecuencias a nivel internacional. Sin embargo, es cierto que cuando se trata de acuerdos más específicos entre países, regiones o empresas se hace necesario disponer de modelos más refinados adecuados al entorno con un mayor nivel de detalle [Beu09].

La herramienta ICS Telecom, dispone de un modelo de propagación anexo basado en el [UIT-R 1546] pero que incluye curvas para Asia y África según las recomendaciones de la Conferencia Regional de Radio, RRC (Regional Radio Conference) 04/06 de la Unión Internacional de Radio ITU (International Telecommunications Union).