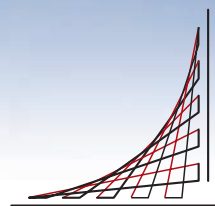


# Modelo metodológico para la coexistencia de las señales de TDT y LTE

Guillermo Teuta Gómez  
Germán Darío Castellanos Tache



ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO





Teuta Gómez, Guillermo

Modelo metodológico para la coexistencia de las señales de TDT y LTE / Guillermo Teuta Gómez y Germán Darío Castellanos Tache.

Medellín: Corporación Universitaria Remington, 2018

232 p. ; 21,5 x 28 cm

**ISBN:** 978-958-56490-0-2 (Internet-PDF)

**ISBN:** 978-958-56132-9-4 (Rústico)

1. Radiodifusión. 2. Sistemas móviles de comunicación. 3. Telecomunicaciones. 4. Comunicaciones I. Título. II. Autores. III Corporación Universitaria Remington

**CCD:** 621.382 / T352

© **Corporación Universitaria Remington**

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**

**Agencia Nacional del Espectro (ANE)**

**Convenio especial de cooperación Escuela-ANE No 0057-2016**

Primera edición, marzo de 2018

**Fondo Editorial Remington**

Lina María Yassin Noreña, editora jefe

fondo.editorial@uniremington.edu.co

Calle 51 # 51-27, Edificio Uniremington

Telefax: (57) (4) 3221000, extensión 3001 - 3008

Medellín, Colombia

**Diseño, diagramación y carátula**

Cristina Yepes Pérez, diagramadora editorial

Fondo Editorial Remington

**Corrección de estilo**

Juan David Villa Rodríguez

juanda0812@gmail.com

**Nota legal**

Las opiniones expresadas por el autor no constituyen ni comprometen la posición oficial o institucional de la Corporación Universitaria Remington.

Todos los derechos reservados. Ninguna porción de este libro podrá ser reproducida, almacenada en algún sistema de recuperación o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio –mecánicos, fotocopias, grabación y otro–, excepto por citas breves en revistas impresas, sin la autorización previa y por escrito del Comité Editorial Institucional de la Corporación Universitaria Remington.



## Agradecimientos



Los autores desean agradecer a los estudiantes de la maestría en Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ingenieros Natalia Duarte, Alexander Gordillo, Carlos Maldonado y Dayana Matiz) y a los funcionarios de la Agencia Nacional del Espectro (ingenieros Camilo Zamora, Vivian González, Antonio Álvarez y Martha Suárez) por su valiosa ayuda en el logro de los objetivos del proyecto de investigación. De igual forma, el gerente del proyecto, ingeniero Guillermo Teuta, agradece a las directivas y al personal de apoyo de la Escuela y de la ANE por su soporte administrativo, legal y financiero para el desarrollo exitoso del Convenio Especial de Cooperación ANE-Escuela 057 de 2016.



## Autores



### Guillermo Teuta Gómez

Ingeniero Electrónico de la Universidad de Antioquia, especialista en Telecomunicaciones y magíster en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Amplia experiencia en el sector de las telecomunicaciones a escala nacional e internacional en estrategia, negocios, tecnología y regulación. Trabajó en el Centro de Investigación de las Telecomunicaciones (Cintel) y en Interconexión Eléctrica S.A. (ISA ESP). Actualmente es profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería, donde se ha desempeñado como coordinador de Investigación e Innovación y director de la Especialización en Telemática Aplicada a Negocios por Internet. Desde el año 2007 hace parte de la base de datos de peritos de la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC), es experto evaluador para el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) en las áreas de TIC y Ciencia & Sociedad y miembro de la Red Nacional de Expertos en NGN de Cintel. En el 2017 fue nombrado como miembro del Comité Nacional de Espectro, el cual convoca y preside el señor Ministro de las TIC. Durante los últimos 25 años ha sido director y coinvestigador de múltiples proyectos de investigación para el sector telecomunicaciones, empresas soportadas en TIC y trabajos de grado de posgrado, cuyos resultados han sido publicados en cuatro libros, múltiples artículos en revistas indexadas y en memorias de conferencias nacionales e internacionales, entre los cuales se destacan: Caracterización ocupacional para el sector Telecomunicaciones (2002), Servicio de correo electrónico a través de la voz (2006), Implementación de tecnologías para el acceso inalámbrico a internet de banda ancha en zonas rurales de Colombia (2015), Estudio de compatibilidad electromagnética entre los servicios TDT y LTE en la banda de 614 a 698 MHz (2016), Coexistence study between DTT and LTE services in the 614-698 MHz band (2017) y Path loss model in amazonian border region for VHF and UHF television bands (2017).

Intereses en Investigación: Planeación, gestión y control del espectro radioeléctrico, Sistemas de comunicaciones móviles de 4G (UMTS, LTE y LTE-Advance) y 5G (URC, Multi-RAT, MMC y D2D), Sistemas de radiodifusión digital (DVB-T1, DVB-T2, ISDB-T y ATSC), y Desarrollo de software y networking. Contacto: guillermo.teuta@escuelaing.edu.co

### Germán Darío Castellanos Tache

Ingeniero Electrónico (2004) y especialista en Telemática y Negocios por Internet (2006) de la Escuela Colombiana de Ingeniería; con maestría en Ingeniería de la computación (2012) de la Universidad de Newcastle Australia. Cuenta con más de 13 años de experiencia en el campo de la investigación y la docencia; y un amplio conocimiento en redes móviles, con calidad de servicio, de nueva generación y banda ancha móvil.





Ha sido director de varios proyectos de investigación como "Estudio de barreras y oportunidades para la viabilidad de la TDT en Colombia" (2012-2013) y "Medición de consumo energético en equipos TIC en espacios institucionales" (2014-2015) y diversos proyectos de grado así como innovador en proyectos en servicios de telecomunicaciones móviles como "Servicio de correo electrónico a través de la voz" (2006). Ha sido autor y coautor de diversos artículos en conferencias y revistas indexadas internacionales. Adicionalmente, cuenta con una amplia experiencia en capacitación y organización temática de seminarios, charlas y foros en diferentes áreas de la ingeniería electrónica, telecomunicaciones y temas afines. Contacto: [german.castellanos@escuelaing.edu.co](mailto:german.castellanos@escuelaing.edu.co)



# Tabla de Contenido



<b>Introducción</b> .....	15
<b>Capítulo 1.</b> Especificaciones técnicas del proyecto de investigación .....	17
<b>Capítulo 2.</b> Comunicaciones móviles y televisión digital terrestre .....	23
<b>Capítulo 3.</b> Gestión del espectro radioeléctrico y modelos de propagación .....	42
<b>Capítulo 4.</b> Estudios de coexistencia y buenas prácticas para bandas inferiores a 1 GHz .....	63
<b>Capítulo 5.</b> Escenarios de interferencia y pruebas preliminares para la banda de 614-698 MHz. ....	85
<b>Capítulo 6.</b> Simulaciones y mediciones de campo en la frontera colombo-brasilera .....	99
<b>Capítulo 7.</b> Modelo de propagación para zonas fronterizas colombianas .....	117
<b>Capítulo 8.</b> Modelo metodológico para la coexistencia de señales TDT/LTE en ambientes transfronterizos .....	129
<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	150
<b>Bibliografía</b> .....	152
<b>Glosario</b> .....	156
<b>Anexo 1.</b> Análisis de interferencia .....	159
<b>Anexo 2.</b> Análisis de propagación primera comisión. ....	187
<b>Anexo 3.</b> Análisis de propagación segunda comisión .....	202
<b>Anexo 4.</b> Herramientas de simulación y equipos de medición .....	210
<b>Anexo 5.</b> Acuerdo de cooperación para comprobación técnica del espectro .....	215
<b>Anexo 6.</b> Definiciones de parámetros técnicos .....	217
<b>Anexo 7.</b> Estándar IEEE 1900.2 y 1900.5 .....	225



## Lista de Figuras



<b>Figura 1.</b>	Metodología del proyecto de investigación . . . . .	21
<b>Figura 2.</b>	Pila de protocolos de la interfaz de radio en LTE . . . . .	24
<b>Figura 3.</b>	Sistemas TDT por país . . . . .	27
<b>Figura 4.</b>	Diagrama de bloques de un transmisor DVB-T . . . . .	29
<b>Figura 5.</b>	Diagrama simplificado de un receptor DVB-T . . . . .	32
<b>Figura 6.</b>	Diagrama simplificado de un receptor DVB-T2 . . . . .	32
<b>Figura 7.</b>	Comparación de sistemas MFN versus SFN . . . . .	33
<b>Figura 8.</b>	Arquitectura general del estándar japonés ISDB-T . . . . .	34
<b>Figura 9.</b>	Densidad espectral potencia para diversos modos en DVB-T en canales de 8 MHz . . . . .	35
<b>Figura 10.</b>	Máscaras espectrales para sistemas TDT operando en mismo sitio de señales analógicas para canales de 8 MHz . . . . .	37
<b>Figura 11.</b>	Densidad de potencia espectral para diversos modos en DVB-T2 en canales de 8 MHz . . . . .	37
<b>Figura 12.</b>	Organización de segmentos OFDM en el espectro de transmisión de ISDB-T. . . . .	38
<b>Figura 13.</b>	Límites de máscaras espectrales de ISDB-T . . . . .	40
<b>Figura 14.</b>	Procesos para la armonización del espectro radioeléctrico. . . . .	43
<b>Figura 15.</b>	Desarrollo del PTTV . . . . .	46
<b>Figura 16.</b>	Reflexión de una onda en un dieléctrico . . . . .	49
<b>Figura 17.</b>	Reflexión de una onda en un conductor perfecto. . . . .	50
<b>Figura 18.</b>	Fenómeno de difracción . . . . .	51
<b>Figura 19.</b>	Geometría de la difracción para antenas . . . . .	52
<b>Figura 20.</b>	Zonas de Fresnel . . . . .	52
<b>Figura 21.</b>	Efecto de la dispersión . . . . .	53
<b>Figura 22.</b>	Factor de corrección dependiente del entorno para el modelo Okumura . . . . .	58
<b>Figura 23.</b>	Esquema para realizar un test de prueba . . . . .	65
<b>Figura 24.</b>	Caso de prueba para medición de interferencia de LTE sobre el sistema SBTVD (UE dentro de la Van) . . . . .	67
<b>Figura 25.</b>	Caso de prueba para medición de interferencia de LTE sobre el sistema SBTVD (UE fuera de la Van) . . . . .	67
<b>Figura 26.</b>	Caso de prueba para medición de interferencia de SBTVD sobre LTE (UE dentro de edificio) . . . . .	68
<b>Figura 27.</b>	Plan de liberación de frecuencias en 600 MHz para Canadá . . . . .	71



<b>Figura 28.</b>	Asignación de frecuencia en el estudio de Eslovaquia .....	74
<b>Figura 29.</b>	Ambiente de pruebas para el estudio de Eslovaquia .....	75
<b>Figura 30.</b>	Escenario de simulación en el estudio de Lituania .....	76
<b>Figura 31.</b>	Esquema de pruebas para el estudio de Italia .....	76
<b>Figura 32.</b>	Localización en bandas de frecuencia 700 MHz TDT y LTE .....	77
<b>Figura 33.</b>	Configuración del sistema de interferencias LTE-UE sobre TDT <i>outdoor</i> .....	78
<b>Figura 34.</b>	Configuración del sistema de interferencia LTE-UE sobre TDT <i>indoor</i> .....	78
<b>Figura 35.</b>	Escenario de convivencia de servicios en bandas adyacentes en el estudio de Perú. ....	81
<b>Figura 36.</b>	Escenario propuesto para el estudio de Australia .....	81
<b>Figura 37.</b>	Asignación de frecuencia en el estudio de Australia .....	82
<b>Figura 38.</b>	Configuración del sistema para medidas en el estudio de Corea del Sur .....	82
<b>Figura 39.</b>	Máscara de emisión espectral .....	84
<b>Figura 40.</b>	Diferentes tipos de interferencia .....	85
<b>Figura 41.</b>	Modelo de interferencia usado para análisis .....	87
<b>Figura 42.</b>	Caso 1 de pruebas para el análisis de interferencia .....	89
<b>Figura 43.</b>	Caso 2 de pruebas para el análisis de interferencia .....	90
<b>Figura 44.</b>	Porcentaje de interferencia para los escenarios A y B .....	92
<b>Figura 45.</b>	Área interferida para los escenarios A y B .....	92
<b>Figura 46.</b>	Relación C/I requerida para los escenarios A y B .....	93
<b>Figura 47.</b>	Conexión de equipos para medir la interferencia entre los sistemas LTE .....	94
<b>Figura 48.</b>	Mediciones de pruebas de laboratorio en el USRP .....	96
<b>Figura 49.</b>	Impacto en la constelación del PDCCH debido a diversas interferencias .....	97
<b>Figura 50.</b>	Ejemplo espectral de interferencia AEB .....	97
<b>Figura 51.</b>	Atenuación de hombro en medidas del ETL .....	98
<b>Figura 52.</b>	Comparación entre datos simulados y modelos de propagación para el canal 8 ...	100
<b>Figura 53.</b>	Mapas de la cobertura para la simulación del canal 8 usando varios modelos. ...	100
<b>Figura 54.</b>	Comparación de simulaciones con Okumura-Hata para canales públicos .....	101
<b>Figura 55.</b>	Resultado de las simulaciones de los canales públicos usando Okumura-Hata rural. ....	102
<b>Figura 56.</b>	Comparación entre datos simulados y modelos de propagación para el canal 27 ...	103
<b>Figura 57.</b>	Cobertura para cada modelo de simulación .....	103
<b>Figura 58.</b>	Montaje para la toma de medidas para cada una de las comisiones de trabajo. ...	104
<b>Figura 59.</b>	Ubicación de las antenas transmisoras de Leticia y Tabatinga .....	106
<b>Figura 60.</b>	Rutas recorridas para las mediciones de campo .....	106
<b>Figura 61.</b>	Mediciones para los canales públicos .....	107





<b>Figura 62.</b>	Comparación de mediciones con los modelos COST 231, UIT 525 y Okumura-Hata Rural para canales públicos . . . . .	108
<b>Figura 63.</b>	Comparación de mediciones con los modelos COST 231, UIT 525 y Okumura-Hata Rural para canales privados . . . . .	109
<b>Figura 64.</b>	Comparación de mediciones con los modelos COST 231, UIT 525 y Okumura-Hata Rural para canales brasileños . . . . .	109
<b>Figura 65.</b>	Resultados observados en el analizador <i>Anritsu</i> . . . . .	110
<b>Figura 66.</b>	Resultados de las mediciones de la segunda comisión . . . . .	111
<b>Figura 67.</b>	Comparación entre simulaciones y mediciones para los canales públicos. . . . .	112
<b>Figura 68.</b>	Comparación entre datos medidos y simulados para el canal 8 con Okumura. . . . .	113
<b>Figura 69.</b>	Diferencias entre datos simulados y medidos para los canales públicos . . . . .	113
<b>Figura 70.</b>	Puntos definidos para la toma de mediciones de telefonía móvil . . . . .	114
<b>Figura 71.</b>	Resultados de telefonía móvil observados en el analizador <i>Anritsu</i> . . . . .	116
<b>Figura 72.</b>	Mecanismos de propagación a través de la vegetación . . . . .	118
<b>Figura 73.</b>	Comparación de datos medidos y modelos de propagación para el canal 13. . . . .	120
<b>Figura 74.</b>	Resultado del ajuste de curva para modelos empíricos . . . . .	122
<b>Figura 75.</b>	Resultado de ajuste de curva para modelo de vegetación . . . . .	123
<b>Figura 76.</b>	Resultado de ajuste de curva para modelo combinado . . . . .	124
<b>Figura 77.</b>	Implicaciones de la selva en un modelo ajustado combinado. . . . .	126
<b>Figura 78.</b>	Comparación de modelos propuestos con los datos medidos . . . . .	127
<b>Figura 79.</b>	Evaluación del Índice Urban-Vegetation ( $I_{uv}$ ) . . . . .	127
<b>Figura 80.</b>	Proceso de coordinación y comprobación binacional de frecuencias . . . . .	129
<b>Figura 81.</b>	Metodología para el estudio/coordinación de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos . . . . .	132
<b>Figura 82.</b>	Medición de la banda de 614 a 698 MHz . . . . .	137
<b>Figura 83.</b>	Diagrama de coordinación de frecuencias basado en CITELE 3807 . . . . .	143
<b>Figura 84.</b>	Diagrama de evaluación de las solicitudes de coordinación basado en CITELE 3807. . . . .	144
<b>Figura 85.</b>	Sistema simplificado de gestión nacional del espectro . . . . .	145
<b>Figura 86.</b>	Resumen del proceso analítico de interferencia y coexistencia basado en el IEEE 1900 . . . . .	148
<b>Figura 87.</b>	Arquitectura del estándar IEEE 1900.5 . . . . .	149
<b>Figura 88.</b>	Área de cobertura de simulación en el <i>software</i> ICS Telecom . . . . .	159
<b>Figura 89.</b>	Ubicación de las antenas transmisoras . . . . .	160
<b>Figura 90.</b>	Ubicación de los receptores . . . . .	161
<b>Figura 91.</b>	Simulaciones para el caso 1. . . . .	162
<b>Figura 92.</b>	Simulaciones para el caso 2. . . . .	163



<b>Figura 93.</b>	Porcentaje de interferencia para el escenario A.1 .....	164
<b>Figura 94.</b>	Área de interferencia para el escenario A.1 .....	165
<b>Figura 95.</b>	Relación C/I requerida para el escenario A.1 .....	165
<b>Figura 96.</b>	Porcentaje de interferencia para el escenario B.1 .....	166
<b>Figura 97.</b>	Área de interferencia para el escenario B.1 .....	166
<b>Figura 98.</b>	Relación C/I requerida para el escenario B.1 .....	167
<b>Figura 99.</b>	Porcentaje de interferencia para el escenario A.2 .....	167
<b>Figura 100.</b>	Área de interferencia para el escenario A.2 .....	168
<b>Figura 101.</b>	Relación C/I requerida para el escenario A.2 .....	168
<b>Figura 102.</b>	Porcentaje de interferencia para el escenario B.2 .....	169
<b>Figura 103.</b>	Área de interferencia para el escenario B.2 .....	169
<b>Figura 104.</b>	Relación C/I requerida para el escenario B.2 .....	170
<b>Figura 105.</b>	Caso 1 de interferencia .....	173
<b>Figura 106.</b>	Caso 2 de interferencia .....	174
<b>Figura 107.</b>	Tipos de interferencia buscados por prueba de laboratorio .....	178
<b>Figura 108.</b>	Caso 1 de interferencia .....	179
<b>Figura 109.</b>	Caso 2 de interferencia .....	179
<b>Figura 110.</b>	Resultados generales de recepción en el <i>User Equipment</i> .....	180
<b>Figura 111.</b>	Variaciones del espectro en los canales PDCCH y PDSCH .....	182
<b>Figura 112.</b>	Potencias de canal y anchos de banda de las señales de LTE y TDT .....	183
<b>Figura 113.</b>	Espectro en cada tipo de interferencia .....	184
<b>Figura 114.</b>	Atenuación de hombros y C/N en la señal de TDT .....	185
<b>Figura 115.</b>	MER pico y RMS para los escenarios de prueba .....	185
<b>Figura 116.</b>	Constelaciones de la señal de televisión .....	186
<b>Figura 117.</b>	Área de cobertura de simulación en el <i>software</i> ICS Telecom .....	187
<b>Figura 118.</b>	Ubicación de las antenas transmisoras .....	188
<b>Figura 119.</b>	Ubicación de los receptores .....	189
<b>Figura 120.</b>	Patrón de radiación de la antena de transmisoras con azimut 0° .....	192
<b>Figura 121.</b>	Arreglo de antena Yagi-Uda usado en mediciones de campo .....	193
<b>Figura 122.</b>	Sistema de mediciones del patrón de radiación y ganancia de antena .....	194
<b>Figura 123.</b>	Patrón simulado de antena Yagi-Uda .....	194
<b>Figura 124.</b>	Ganancia horizontal de antena Yagi-Uda .....	194
<b>Figura 125.</b>	Antenas de TV análoga de los canales .....	201
<b>Figura 126.</b>	Vista superior de la antena .....	202
<b>Figura 127.</b>	Vista lateral de la antena .....	202



<b>Figura 128.</b> Organización del sistema de mediciones del patrón de radiación y ganancia de antena .....	203
<b>Figura 129.</b> Ganancia horizontal de antena Yagi-Uda .....	204
<b>Figura 130.</b> Resultados observados en el analizador <i>Anritsu</i> para la banda 850 MHz .....	208
<b>Figura 131.</b> Resultados observados en el analizador <i>Anritsu</i> para la banda 900 MHz .....	208
<b>Figura 132.</b> Resultados observados en el analizador <i>Anritsu</i> para la banda 900 MHz .....	209
<b>Figura 133.</b> Analizador HD <i>Ranger 2</i> .....	211
<b>Figura 134.</b> Medida de espectro del HD <i>Ranger 2</i> .....	212
<b>Figura 135.</b> Analizador de espectro <i>Tektronix MDO-3000</i> . .....	213
<b>Figura 136.</b> Captura pantalla del analizador de espectro .....	213
<b>Figura 137.</b> Nivel de señal que se usa para determinar probabilidad de interferencia .....	224
<b>Figura 138.</b> Tipos de interferencia para el estándar IEEE 1900.2 .....	227
<b>Figura 139.</b> Tipos de adaptación en sistemas cognitivos basados en IEEE 1900.2. ....	227
<b>Figura 140.</b> Arquitectura del estándar IEEE 1900.5 (IEEE, 2011). ....	230
<b>Figura 141.</b> Construcción de un modelo de consumo de espectro .....	231



## Lista de Tablas



<b>Tabla 1.</b>	Cuadro de atribución de frecuencias en Colombia para la banda de 614-698 MHz y bandas adyacentes . . . . .	18
<b>Tabla 2.</b>	Características de LTE <i>Release 8</i> . . . . .	26
<b>Tabla 3.</b>	Descripción de canales físicos en LTE. . . . .	27
<b>Tabla 4.</b>	Comparación de los sistemas TDT DVB-T y DVB-T2 . . . . .	30
<b>Tabla 5.</b>	Parámetros de OFDM para canales de 6 MHz . . . . .	31
<b>Tabla 6.</b>	Duración de la parte de símbolo para los intervalos de guarda permitidos en canales de 6 MHz . . . . .	31
<b>Tabla 7.</b>	Parámetros de protección y máscaras dentro y fuera de banda para sistemas TDT operando en el mismo sitio de señales analógicas para canales de 8 MHz. . . . .	36
<b>Tabla 8.</b>	Parámetros OFDM para los segmentos de ISDB-T . . . . .	38
<b>Tabla 9.</b>	Puntos de quiebre para las máscaras espectrales de ISDB-T . . . . .	39
<b>Tabla 10.</b>	Relaciones de protección entre señales DVB-T2 con diferentes <i>offsets</i> . . . . .	40
<b>Tabla 11.</b>	Relaciones de protección entre señales DVB-T2 y LTE para diferentes <i>offsets</i> . . . . .	41
<b>Tabla 12.</b>	Relaciones de protección entre señales DVB-T2 y LTE para diferentes <i>offsets</i> . . . . .	41
<b>Tabla 13.</b>	Normas y documentos sobre convivencia de los servicios TDT y LTE . . . . .	44
<b>Tabla 14.</b>	Cargas de tráfico para equipos en LTE . . . . .	44
<b>Tabla 15.</b>	Distribución de canales para el servicio de televisión en banda UHF . . . . .	45
<b>Tabla 16.</b>	Relaciones de protección entre servicios . . . . .	45
<b>Tabla 17.</b>	Radios de protección para interferencia cocanal para una señal ISDB-T que interfiere con una señal DVB-T2 con un canal Rice de 6 MHz de ancho de banda . . . . .	47
<b>Tabla 18.</b>	PR y umbrales de sobrecarga $U_s$ para una señal ISDB-T de 6 MHz de ancho de banda que interfiere con una señal LTE EB o EU con un canal Gaussiano . . . . .	48
<b>Tabla 19.</b>	Descripción parámetros ecuación <i>Link Budget</i> . . . . .	54
<b>Tabla 20.</b>	Descripción de parámetros del modelo de espacio libre. . . . .	55
<b>Tabla 21.</b>	Parámetros modelo pérdida de trayecto en el plano tierra. . . . .	56
<b>Tabla 22.</b>	Descripción de parámetros ecuación <i>Log-Distance</i> . . . . .	56
<b>Tabla 23.</b>	Descripción del parámetro $n$ en la ecuación <i>Log-Distance</i> . . . . .	56
<b>Tabla 24.</b>	Descripción de parámetros enlace punto a punto . . . . .	57
<b>Tabla 25.</b>	Descripción de parámetros del modelo de Okumura. . . . .	58
<b>Tabla 26.</b>	Intensidad de campo mínima para una señal de TDT de 6 MHz y un canal inalámbrico EB . . . . .	73
<b>Tabla 27.</b>	Intensidad de campo mínima para una señal de TDT de 6 MHz y un canal inalámbrico EU . . . . .	73





<b>Tabla 28.</b>	Casos de interferencia estudio de coexistencia en Perú. ....	80
<b>Tabla 29.</b>	Escenarios de interferencia transfronterizos Colombia-Brasil. ....	86
<b>Tabla 30.</b>	Escenarios de interferencia transfronteriza usados en casos de pruebas de laboratorio. ....	87
<b>Tabla 31.</b>	Relaciones de distancias y potencias de los modelos de interferencia. ....	88
<b>Tabla 32.</b>	Parámetros de medición para las pruebas de laboratorio. ....	95
<b>Tabla 33.</b>	Parámetros de medición del ETL. ....	95
<b>Tabla 34.</b>	Variables del protocolo de medición. ....	105
<b>Tabla 35.</b>	Frecuencia de operadores en Colombia. ....	115
<b>Tabla 36.</b>	Operadores de telefonía móvil en Tabatinga. ....	115
<b>Tabla 37.</b>	Características de la antena transmisora de telefonía móvil en Leticia y Tabatinga. .	115
<b>Tabla 38.</b>	Valores de compensación de Okumura-Hata y COST 231. ....	118
<b>Tabla 39.</b>	Validación de parámetros de ajuste de los modelos de propagación. ....	121
<b>Tabla 40.</b>	Resultados de coeficientes de ajuste basado en modelos empíricos. ....	122
<b>Tabla 41.</b>	Resultados de coeficientes de ajuste basado en modelos de vegetación. ....	123
<b>Tabla 42.</b>	Resultados de coeficientes de ajuste basado en el modelo combinado. ....	124
<b>Tabla 43.</b>	Comparación de parámetros de evaluación de los modelos ajustados. ....	125
<b>Tabla 44.</b>	Asignación de canales en municipios fronterizos brasileros en la banda 614-698 MHz. ....	137
<b>Tabla 45.</b>	Extracto de las bandas UTRA en la banda de 700 MHz. ....	139
<b>Tabla 46.</b>	Estructura del Acuerdo de Viena 1993. ....	141
<b>Tabla 47.</b>	Parámetros técnicos relacionados con la interferencia. ....	142
<b>Tabla 48.</b>	Variables de las definiciones técnicas basadas en el IEEE 1900.2. ....	147
<b>Tabla 49.</b>	Ubicación de las antenas transmisoras. ....	160
<b>Tabla 50.</b>	Parámetros de las antenas transmisoras. ....	160
<b>Tabla 51.</b>	Características de las antenas receptoras. ....	161
<b>Tabla 52.</b>	Relación de colores para relaciones C/I. ....	164
<b>Tabla 53.</b>	Características de transmisión LTE para el modelo Okumura-Hata. ....	171
<b>Tabla 54.</b>	Cambios de frecuencia para el caso 1. ....	173
<b>Tabla 55.</b>	Cambios de frecuencia para el caso 2. ....	174
<b>Tabla 56.</b>	Toma de datos para potencias determinadas en el eNB y la BS. ....	175
<b>Tabla 57.</b>	Parámetros de medición para el analizador de espectro. ....	176
<b>Tabla 58.</b>	Parámetros de medición básica y avanzada para las pruebas de laboratorio. ....	176
<b>Tabla 59.</b>	Parámetros de medición del ETL. ....	176
<b>Tabla 60.</b>	Protocolo de medición de las pruebas de laboratorio. ....	177
<b>Tabla 61.</b>	Ubicación de las antenas transmisoras. ....	189
<b>Tabla 62.</b>	Relación de colores para niveles de potencia recibidos. ....	190



<b>Tabla 63.</b>	Parámetros .....	191
<b>Tabla 64.</b>	Parámetros técnicos de los receptores.....	192
<b>Tabla 65.</b>	Dimensiones de los elementos del arreglo de la antena Yagi-Uda .....	193
<b>Tabla 66.</b>	Normatividad asociada al protocolo de medición .....	195
<b>Tabla 67.</b>	Descripción de las normas relacionadas para el protocolo de medición .....	195
<b>Tabla 68.</b>	Protocolo de medición aplicado.....	196
<b>Tabla 69.</b>	Ubicación de los puntos receptores.....	198
<b>Tabla 70.</b>	Dimensiones de los elementos del arreglo de la antena.....	203
<b>Tabla 71.</b>	Protocolo de medición.....	204
<b>Tabla 72.</b>	Protocolo de medición para telefonía móvil en Leticia .....	206
<b>Tabla 73.</b>	Estructura del reporte de análisis de interferencia y coexistencia.....	228



## Introducción



La Agencia Nacional del Espectro (ANE), en su misión de planear, gestionar, supervisar y controlar el espectro electromagnético con criterios de eficiencia y oportunidad y en la urgente búsqueda de nuevas bandas para desplegar los servicios móviles en Colombia, solicitó en la CMR-15 (Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del 2015) la identificación de la banda de 614-698 MHz para su uso en los sistemas de comunicaciones móviles IMT, lo cual permitirá la prestación de servicios de banda ancha móvil de alta calidad y amplia cobertura. Con la aprobación de esta propuesta, Colombia logró dar el primer paso para garantizar el soporte del crecimiento esperado de las conexiones de internet de banda ancha inalámbrica para los próximos 10 años.

La identificación de esta banda específica planteó el reto de realizar una serie de estudios técnicos, administrativos y regulatorios; en dicha identificación, los escenarios más críticos y la realización de estudios exhaustivos, que deberá abordar el Estado colombiano, se relacionan con la compatibilidad y convivencia de los sistemas y servicios de TDT (Televisión Digital Terrestre) y LTE (*Long Term Evolution*) en las zonas de frontera con Brasil y Ecuador, de forma tal que aporten a la planeación, negociación y firma de acuerdos binacionales. En este sentido, la ANE ya había estado impulsando, localmente, la sinergia de conocimientos y recursos entre la universidad y el Estado con el programa "Generación de Conocimiento", incluido en su Plan de Acción 2016, con lo que crea el escenario ideal para que instituciones como la Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito (Escuela) pudieran poner sus expertos, investigadores y el conocimiento generado al servicio de la sociedad.

Este libro, producto de investigación, presenta los resultados finales del proyecto titulado "Definición de una metodología para el estudio de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos para la banda de 614-698 MHz"; con ello se cumple el objetivo general del Convenio Especial de Cooperación n.º 057, suscrito entre la ANE y la Escuela el 2 de agosto de 2016. En el **Capítulo 1** se presentan las especificaciones técnicas del proyecto y se resalta su alcance, el cual cubrió solo la primera fase de la metodología propuesta (proyecto realizado durante las 22 semanas de ejecución).

Los **Capítulos 2, 3 y 4** presentan los estudios teóricos relacionados con las tecnologías y servicios TDT y LTE, la gestión del espectro en los ámbitos local e internacional, las recomendaciones, regulaciones y metodologías de organismos internacionales (UIT, ETSI, CITEL e IEEE, entre otros), así como las buenas prácticas y estudios realizados recientemente sobre interferencia y convivencia de los servicios TDT y LTE. En los **Capítulos 5 y 6** se presentan los resultados de los estudios técnicos llevados a cabo por los investigadores a través de la definición de los escenarios de interferencia, las visitas de campo realizadas a las ciudades de Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil) y las simulaciones y pruebas pre-



liminares de laboratorio. En el **Capítulo 7**, por su parte, se describe en detalle el análisis y el ajuste realizados para el modelo de propagación propuesto para las zonas fronterizas de Colombia en la región amazónica, el cual contempla las implicaciones de los bosques y los grandes cuerpos de agua frente a la cobertura y amplitud de señal recibida.

Finalmente, en el **Capítulo 8** se expone y sustenta el modelo propuesto, denominado “Metodología para el estudio y coordinación de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos para la banda de 614-698 MHz”; este modelo comprende tres fases. La fase preliminar, que responde exactamente al cumplimiento del objetivo general y a las actividades realizadas en el marco del proyecto de investigación del Convenio ANE-Escuela n.º 057, y que representa un insumo fundamental para abordar la fase de estudio y planeación a través de proyectos técnicos y administrativos con un horizonte temporal de aproximadamente 18 meses. En tanto que la fase de desarrollo y coordinación deberá ser asumida por el Ministerio de las TIC, la Cancillería colombiana y los organismos técnicos consultivos y de soporte, como la ANE, la ANTV (Autoridad Nacional de Televisión) y la CRC (Comisión de Regulación de Comunicaciones).





## Capítulo 1. Especificaciones técnicas del proyecto de investigación



Uno de los temas que capturó la atención del sector durante la preparación y el desarrollo de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del 2015 (CMR-15) fue la identificación de nuevas bandas para las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT); la ANE, en representación de Colombia, propuso específicamente la identificación de los rangos de frecuencia en las bandas de 614-698 MHz y 3300-3400 MHz, y apoyó las propuestas interamericanas realizadas por los países de la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL) para la identificación de los rangos 1427-1518 MHz y 3400-3600 MHz. Como resultado de las complejas negociaciones realizadas, todos los rangos mencionados fueron identificados para dicho uso en algunos países de la Región 2 de la UIT.

Dado que Colombia, en virtud de la nota 9.21 del Reglamento de Radiocomunicaciones (RR), está comprometida a desarrollar y proponer un modelo de acuerdo binacional (en las fronteras con Brasil y Ecuador) para el uso coordinado de la banda de 614-698 MHz, se hace necesario estudiar la compatibilidad y la convivencia de los sistemas y servicios de TDT e IMT en esta banda, especialmente para las zonas fronterizas mencionadas.

### Problemática actual

La banda de 614-698 MHz está atribuida a servicios de radiodifusión televisiva de forma primaria y a servicios fijos de forma secundaria, tal como se muestra en la **Tabla 1**. No obstante, el RR en su edición de 2016, en el cuadro de atribución de las frecuencias de 460-890 MHz, incorporó dos nuevas notas para la *atribución adicional* y la *identificación de la banda de 600 MHz*, así:

**"5.308** Atribución adicional: En Belice y Colombia, la banda de frecuencias 614-698 MHz está también atribuida a título primario al servicio móvil. Las estaciones del servicio móvil que funcionan en esta banda de frecuencias están sujetas a la obtención del acuerdo indicado en el número 9.21. (NUEVA CMR-15)" (UIT, 2016).

**"5.308A** En Bahamas, Barbados, Belice, Canadá, Colombia, Estados Unidos y México, la banda de frecuencias 614-698 MHz, o partes de esta, está identificada para las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT) – véase la Resolución 224 (Rev.CMR- 15). Esta identificación no impide la utilización de estas bandas de frecuencias por cualquier otra aplicación de los servicios a los que está atribuida, ni establece prioridad alguna en el Reglamento de Radiocomunicaciones. Las estaciones del servicio móvil de los sistemas IMT que funcionan en esta banda de frecuencias están sujetas a la obtención del acuerdo indicado en el número 9.21 y no causarán interferencia perjudicial a los servicios de radiodifusión de los países vecinos, ni reclamarán protección contra los mismos. Se aplican



los números 5.43 y 5.43A. En Belice y México, la utilización de las IMT en esta banda de frecuencias no comenzará antes del 31 de diciembre de 2018 y podrá prorrogarse si así lo acuerdan los países vecinos. (NUEVA CMR-15)" (UIT, 2016).

**Tabla 1.** Cuadro de atribución de frecuencias en Colombia para la banda de 614-698 MHz y bandas adyacentes.

Unidad	Región 2	Colombia	Notas nacionales
MHz	<b>608-614</b> Radioastronomía Móvil por satélite, salvo móvil.aeronáutico por satélite (tierra-espacio).	<b>608-614</b> Radioastronomía Móvil por satélite, salvo móvil aeronáutico por satélite (tierra-espacio).	CLM 5
MHz	<b>614-698</b> Radiodifusión Fijo Móvil 5.293 <b>5.308 5.308A</b> 5.309 5.311A	<b>614-698</b> Radiodifusión (televisión)  5.293 5.309 5.311A	CLM 5 CLM 21
MHz	<b>698-806</b> Móvil 5.317A Radiodifusión Fijo 5.293 5.309 5.311A	<b>698-806</b> Móvil 5.317A  5.293 5.309 5.311A	CLM 5 CLM 46 CLM 48

La banda adyacente superior de la banda de 614-698 MHz está destinada para servicios móviles (698-806 MHz), mientras que la adyacente inferior, canal 37 (608-614 MHz), está atribuida a los Servicios de Radioastronomía (RAS), los cuales, dadas sus características excepcionales (sensibilidad, periodos de observación y pequeño número de estaciones), están altamente protegidos por los entes reguladores y administradores del espectro en el ámbito internacional, en cumplimiento de lo dispuesto por el artículo 29 del RR de la UIT. Por lo que, en el marco de la planeación responsable de largo plazo que les compete a la ANE y al MinTIC, se hace necesario llevar a cabo una serie de estudios técnicos, administrativos y regulatorios para determinar los parámetros técnicos críticos que permitan realizar las propuestas de canalización en el país y, al mismo tiempo, elaborar, negociar y suscribir acuerdos bilaterales con los países vecinos.

Teniendo en cuenta que los planes de asignación de nuevas bandas del espectro radioeléctrico se hacen de forma diferente en cada país, con horizontes de tiempo y cronogramas disímiles, es claro que los casos más críticos de compatibilidad electromagnética y coexistencia de sistemas y servicios de TDT y LTE se presentarán en las fronteras. Por ejemplo, si Colombia asigna primero la banda de 614-698 MHz para servicios IMT y Brasil o Ecuador siguen transmitiendo televisión en dicha banda, se presentarán diversos escenarios de interferencia. Esta problemática se hace más compleja al involucrar simultáneamente estándares como LTE, LTE-Advanced, DVB-T, DVB-T2, ISDB-T y SBTVD.

En este sentido, desde el año 2012 los investigadores de la Escuela habían venido realizando estudios prospectivos relacionados con el despliegue de la TDT en Colombia, la



planeación y determinación de los factores críticos para la banda de los 600 MHz (coexistencia de los servicios de LTE y DVB-T2) y el uso de la banda de 700 MHz alineado con las directrices dadas por la UIT en el sentido de “transformar el dividendo digital en beneficios sociales y crecimiento económico”. Particularmente, los proyectos “Estudio de barreras y oportunidades para la viabilidad de TDT en Colombia” y “Estudio de la compatibilidad electromagnética entre los servicios de TDT y LTE en la subbanda UHF de 614-698 MHz en Colombia” han abordado la problemática de la interferencia electromagnética como un factor determinante en la calidad de los futuros servicios.

Para resolver de forma integral la problemática descrita, el grupo de investigadores y expertos de la Escuela formuló un macroproyecto de mediano plazo, con el objeto de elaborar, desarrollar y consolidar una propuesta de acuerdo binacional para el uso coordinado de la banda de 614-698 MHz en la frontera de Colombia con Brasil (replicable a otros países vecinos); el macroproyecto consta de las siguientes fases:

- **Fase I.** Definición de una metodología para el estudio de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos para la banda de 614-698 MHz (objetivo central del Convenio Especial de Cooperación ANE-Escuela 057).
- **Fase II.** Diseño y realización de simulaciones y pruebas de laboratorio para determinar los parámetros críticos de coexistencia de los servicios de televisión digital terrestre (estándares DVB-T2 y SBTVD) y de las comunicaciones móviles LTE en la banda de 614-698 MHz para las zonas de frontera entre Colombia y Brasil. Las pruebas permitirán determinar las relaciones de protección y el umbral de saturación que deben caracterizar al umbral de interferencia entre LTE y el sistema TDT respectivo (el proyecto está en busca de financiación para ser ejecutado durante los años 2017 y 2018).
- **Fase III.** Planteamiento de soluciones técnico-administrativas y elaboración de una propuesta de acuerdo binacional para garantizar la compatibilidad y convivencia de los servicios de TDT e IMT en ambientes transfronterizos en la banda de 614-698 MHz.

### El Convenio de cooperación ANE-Escuela 057

La ANE y la Escuela suscribieron, el 2 de agosto de 2016, el Convenio Especial de Cooperación 057 para ejecutar el proyecto de investigación titulado *Definición de una metodología para el estudio de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos para la banda de 614-698 MHz, tomando como base el caso Colombia-Brasil*, el cual fue seleccionado en desarrollo de la convocatoria de la ANE para presentar “proyectos de CT+I en temáticas relacionadas con la planeación, atribución, vigilancia y control del espectro radioeléctrico (ERE) en Colombia, así como con la gestión eficiente del mismo y el fomento de su conocimiento-2016”.



La temática de la propuesta realizada por la Escuela se enmarcó en el Plan de Acción de la ANE para el 2016, el cual tiene dentro de sus objetivos garantizar la disponibilidad de espectro a través de la revisión de las necesidades, la actualización de la atribución y las canalizaciones, y los estudios de liberación de espectro, con el fin de responder a las metas de gobierno y a las necesidades del país. Por lo que se hacía necesario llevar a cabo estudios de análisis de los parámetros técnicos y de las metodologías que permitan la coexistencia entre las diferentes tecnologías que hacen uso del espectro radioeléctrico, particularmente en las zonas de frontera.

El macroproyecto formulado por los investigadores de la Escuela definió el marco general dentro del cual se debería abordar la solución de la problemática que presentará a futuro la frontera de Colombia con Brasil, de forma tal que se pudieran determinar los niveles de interferencia aceptables, los escenarios y las situaciones específicas que puedan ser objeto de la negociación binacional; hay que decir que en su fase I se limita a la definición de una metodología para el estudio de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos para la banda de 614-698 MHz. Este proyecto se ejecutó durante 22 semanas, conforme al cronograma aprobado por las partes.

### Objetivos del proyecto de investigación

**Objetivo general.** Definir una metodología para el estudio de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos para la banda de 614-698 MHz, tomando como base el caso Colombia-Brasil.

### Objetivos específicos

- Realizar una revisión de las metodologías usadas en el análisis de la coexistencia de los servicios TDT y LTE en los países latinoamericanos o propuestas por organismos técnicos internacionales, y un estudio de la normatividad actual que rige dichos servicios en Colombia y Brasil.
- Elaborar el marco teórico de los servicios de TDT y las comunicaciones LTE en la banda UHF de menos de 700 MHz y definir los escenarios de análisis para la coexistencia de los servicios de LTE y TDT en la banda 614-698 MHz para el caso Colombia-Brasil.
- Realizar simulaciones preliminares y mediciones de campo que permitan caracterizar la situación actual transfronteriza entre Colombia y Brasil en la banda de 614-698 MHz y proponer los ajustes pertinentes al modelo de propagación que puedan ser usados en proyectos posteriores.
- Formular, proponer y acordar con la ANE una metodología general para el estudio de la compatibilidad y convivencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos; dicha metodología podrá ser aplicada en fases posteriores de la solución de la problemática binacional Colombia-Brasil (y con otros países) para la banda de 614-698 MHz.

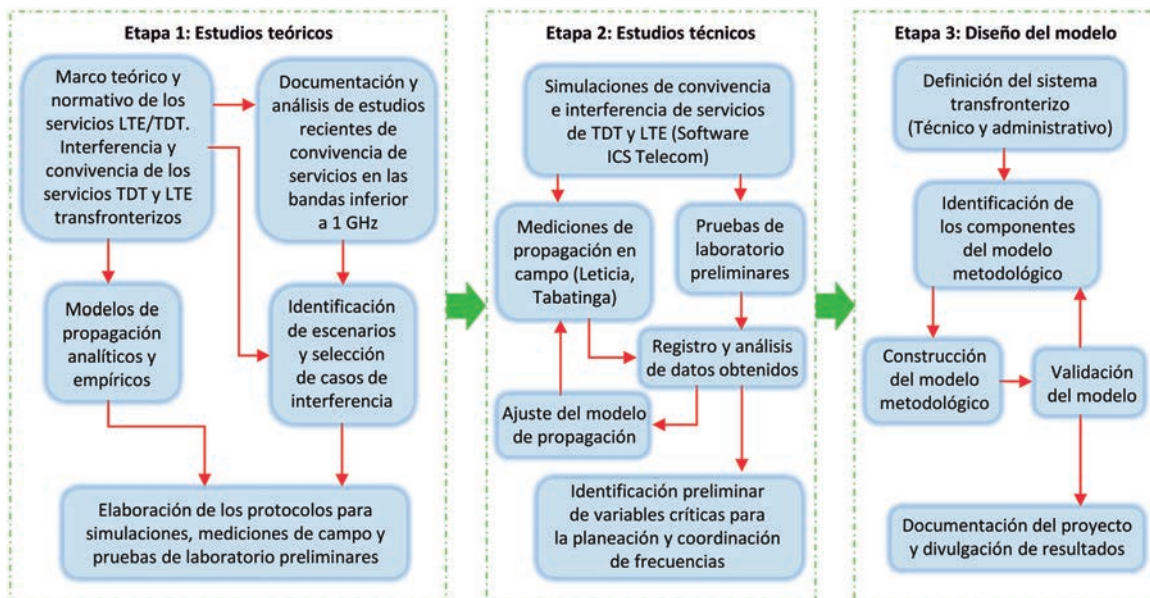


- Elaborar el informe final del proyecto y realizar la divulgación requerida en eventos nacionales e internacionales.

## Metodología

El grupo de investigadores de la Escuela propuso a los supervisores y expertos de la ANE una metodología para el desarrollo del proyecto de investigación en tres etapas, a saber: 1) estudios teóricos, 2) estudios técnicos y 3) diseño del modelo metodológico. La **Figura 1** presenta el esquema de la metodología acordada.

Se inició con los estudios teóricos, para lo cual se revisó a profundidad la normatividad de la gestión del espectro para los servicios TDT y LTE, incluyendo los planes de transición para el segundo dividendo digital (banda de 600 MHz), tanto en Colombia como en Brasil. Luego se realizó un análisis de las características espectrales de ambos servicios (densidad espectral, relaciones de protección, caída de los hombros de las máscaras y filtros en diversos escenarios). La revisión bibliográfica incluyó, además, las mejores prácticas para la coexistencia de estos servicios en las bandas de menos de 1 GHz de la CITELE (Américas), la FCC (EE. UU.), el IFT (México), la ITU (global) y el ETSI (Europa), entre otras. Finalmente, se realizó la definición de los escenarios de interferencia, 18 en total, teniendo en cuenta la diferencia de estándares DVB-T2 e ISDB-T para la televisión digital en Colombia y Brasil, respectivamente, así como la selección de casos y la elaboración de los protocolos para el estudio práctico.



**Figura 1.** Metodología del proyecto de investigación.

Como parte de los estudios técnicos, las simulaciones se realizaron con el *software* ICS Telecom y las pruebas de laboratorio preliminares se desarrollaron utilizando equipos de

*Software Defined Radio* (NI USRP-RIO 2950 y el *LTE Applications Framework*) con el fin de hacer más versátil el estudio de las diferentes tecnologías involucradas. Las medidas en campo fueron tomadas en Leticia y Tabatinga, ciudades fronterizas de Colombia y Brasil, en la región amazónica. De igual forma, un riguroso análisis matemático permitió realizar el ajuste del modelo de propagación para las zonas tropicales y selváticas de la frontera colombiana.

Para abordar el diseño del modelo metodológico se definió y documentó, en primera instancia, el proceso de coordinación y comprobación binacional de la coexistencia de servicios. Y tomando en consideración las buenas prácticas identificadas y las variables clave de los estudios teóricos y técnicos, se estructuró el “Modelo para el estudio de la compatibilidad y convivencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos”, el cual fue presentado y validado por un grupo de expertos de la ANE.

### Alcance

Teniendo en cuenta que los términos de referencia de la convocatoria de investigación ANE 2016 limitaban fuertemente el tiempo de ejecución y el apoyo económico, este proyecto cubrió solamente la fase I, que fue descrita en el macroproyecto de la *Problemática actual*; esta fase es de suma importancia para abordar de forma integral y sistemática el desarrollo de las otras dos.

De igual forma, los resultados de cada una de las fases planteadas en el macroproyecto (e incorporadas en el modelo metodológico propuesto en esta investigación) son de gran importancia para la ANE dada la posición de liderazgo regional que le ha sido reconocida en diversas instancias internacionales y al compromiso adquirido con la UIT para que el macroproyecto sea presentado en la CMR-19.





## Capítulo 2. Comunicaciones móviles y televisión digital terrestre



En este capítulo se hace un breve resumen de los conceptos tecnológicos relevantes que soportan la telefonía móvil de cuarta generación y de la Televisión Digital Terrestre (TDT), los servicios que se evaluarán en este proyecto. Adicionalmente, se describe el marco regulatorio donde se circunscriben dichas tecnologías tanto en Colombia como en Brasil y la formulación teórica de algunos modelos de propagación como base fundamental para iniciar el estudio de la propagación particular en la zona fronteriza.

### Telecomunicaciones móviles internacionales

Dado el gran despliegue tecnológico y la demanda acelerada por mayor ancho de banda, surgió la necesidad de establecer un nuevo *framework*, denominado Telecomunicaciones Móviles Internacionales - Avanzadas (IMT-Advanced). Según se establece en las recomendaciones de la UIT, estos son sistemas que proporcionan acceso a una amplia gama de servicios de telecomunicaciones, con aplicaciones de baja y alta movilidad, y a una amplia gama de velocidades de datos según las demandas del usuario, incluyendo capacidades para aplicaciones y servicios multimedia de alta calidad en diversas plataformas (UIT, 2008) (UIT, 2012).

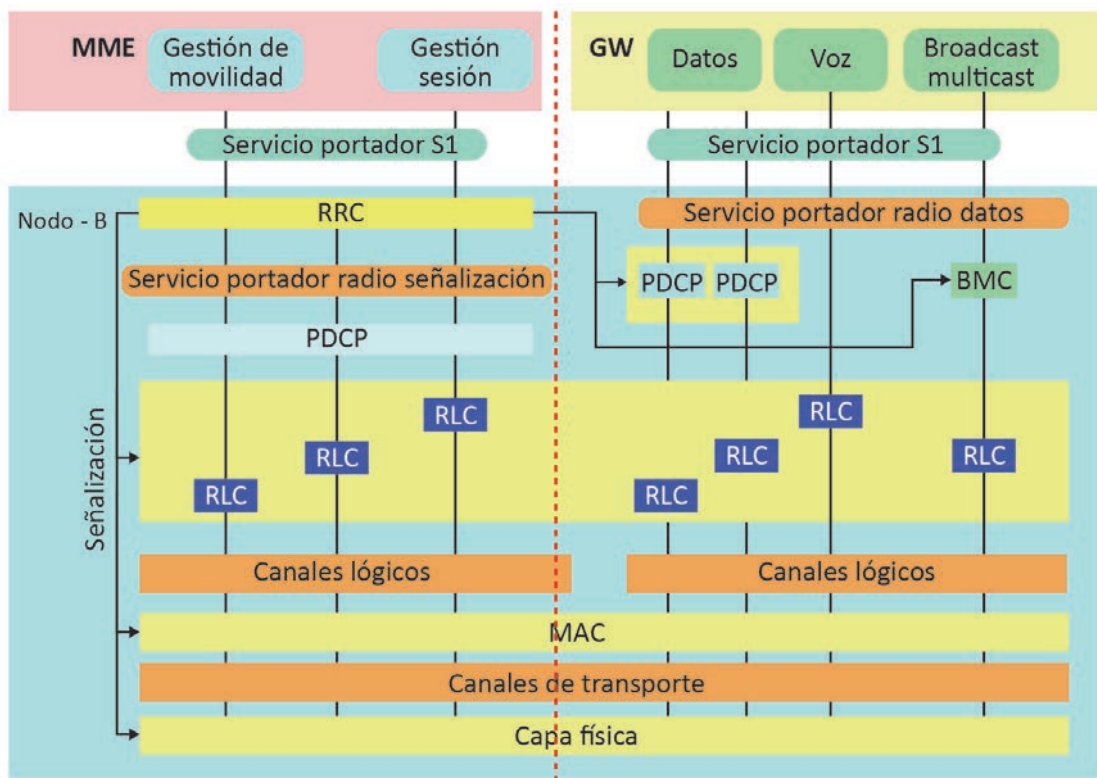
*Long Term Evolution* (LTE) es el estándar de telecomunicaciones móviles más reciente y ha hecho posible aumentar las capacidades para facilitar la prestación adecuada de transmisión y la disminución de los costos de despliegue de infraestructura para satisfacer la alta demanda de tráfico de los usuarios y las expectativas de negocio de los operadores. Este estándar ha sido desarrollado y especificado por el grupo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) como una evolución de los sistemas móviles: *Global System for Mobile Communications* (GSM) y *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS). El *Release 8*, publicado en 2008 por el 3GPP, contiene las especificaciones técnicas y de capacidades del sistema LTE, tales como tasas de transmisión pico de 100 Mbps en el enlace de bajada (*Down Link - DL*) y 50 Mbps en el enlace de subida (*up link - UL*), mayor eficiencia espectral que *High Speed Data Access* (HSPA), compatibilidad e interconexión con los otros sistemas de comunicaciones móviles existentes, y anchos de banda escalables para 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz (Gebner, 2011). En el *Release 10* de 3GPP se encuentra definido el estándar *LTE-Advanced*, evolución del estándar LTE, el cual ya ha sido probado y adoptado por la mayoría de operadores en el mundo.

En la Asamblea de Radiocomunicaciones de 2015 (AR-15) y en la CMR-15 de la UIT, realizadas en el mes de noviembre del 2015, se abordó la urgente necesidad de disponer de nuevas bandas de frecuencia para que las *IMT-Advanced* sigan su auge y los actores del sector de las telecomunicaciones, en el ámbito mundial y nacional, puedan establecer sus intereses con base en un ambiente que se evidencia cada vez más complejo. Simul-



táneamente, los grupos de trabajo de los organismos internacionales y regionales vienen realizando un gran esfuerzo colectivo para poder disponer del espectro necesario que les permita soportar las comunicaciones móviles de quinta generación (5G). LTE es el servicio móvil más avanzado entre los que están en operación y crecimiento en Colombia.

**Interfaz de radio de LTE.** La interfaz radio de LTE consta de tres capas y un conjunto de protocolos asociados, tal como se muestra en la **Figura 2**: la capa física, una segunda capa compuesta por los protocolos MAC de control de acceso al medio y *Radio Link Control* (RLC) de control del enlace de radio, y una tercera capa con el protocolo *Radio Resource Control* (RRC) de control de los recursos de radio.



**Figura 2.** Pila de protocolos de la interfaz de radio en LTE. Fuente: (Comes, 2010).

En el estándar LTE se definen tres tipos de canales: los canales lógicos, encargados de indicar el tipo de información que se intercambia y que permiten el cambio entre la MAC y el RLC. Los canales de transporte, encargados de estructurar la información en bloques de transporte (TrBk) y que permiten el intercambio entre la capa física y la MAC. Finalmente, los canales físicos, que establecen el modo de transmisión de los bits en las subportadoras OFDM (Gebner, 2011).

De igual forma, LTE tiene una característica fundamental que corresponde a la capacidad adaptativa del enlace en función de la calidad de la señal reportada por las terminales



móviles de usuarios (UE) con el parámetro *Channel Quality Indication* (CQI). Esta función realiza una revisión constante del estado de las señales y al variar en el eNB los parámetros de transmisión, permite la planeación o *scheduling* de la conexión de los usuarios. También se modifica permanentemente el esquema de modulación y codificación, cualidad que se conoce como *Adaptative Modulation and Coding* (AMC).

**Capacidad, cobertura y eficiencia espectral en LTE.** En todos los sistemas de comunicaciones móviles celulares la capacidad y la cobertura están condicionadas por el ruido, y, ante todo, por la interferencia, como consecuencia de la reutilización de las frecuencias. La interferencia que soporta un eNB conectado a un UE se llama intracelular y es producida por los demás UE de la célula. La interferencia intercelular se debe a las emisiones de los UE de otras celdas. La interferencia que soporta un UE conectado a un eNB de una celda se debe a las transmisiones de eNB de otras celdas que le puedan llegar. El parámetro de calidad utilizado en los cálculos de capacidad y cobertura se describe en la **Ecuación 1**:

$$SINR = \frac{Señal}{Interferencia + Ruido}$$

**Ecuación 1.**

En el DL la interferencia soportada por el UE es la intercelular, que puede considerarse nula por la ortogonalidad de dicho enlace. También se define el factor de geometría celular  $g$  como la relación entre la potencia recibida en el UE de la señal deseada ( $P_{sc}$ ) y la potencia de interferencia recibida de las demás células ( $P_{oc}$ ), tal como se describe en la **Ecuación 2**:

$$g = \frac{P_{sc}}{P_{oc}}$$

**Ecuación 2.**

Suponiendo que las potencias medias emitidas por todas las células son iguales y que la pérdida básica de propagación sigue leyes similares, el cociente  $g$  depende solo de la geometría celular, o sea del tipo de célula (omnidireccional o sectorizada) y del punto de evaluación. Por lo tanto, la relación SINR será como se define en la **Ecuación 3**:

$$SINR = \frac{P_{sc}}{(P_{oc} + P_n)} = \frac{1}{(g^{-1} + SNR^{-1})}$$

**Ecuación 3.**

Por lo anterior, la geometría celular limita la SINR máxima que se puede obtener, lo que es muy importante, ya que la eficiencia espectral o la tasa de transmisión dependen de la relación SINR. Y si  $g$  es pequeña, también lo será la SINR, y, en consecuencia, la tasa será muy reducida (lo cual ocurre en el borde de la célula).



Como el objetivo de LTE es alcanzar elevadas tasas de bits con alta eficiencia espectral, se deben reutilizar las frecuencias portadoras en todas las células (factor de reutilización = 1), pero esta intensa reutilización puede producir una interferencia excesiva en los bordes de las células, lo cual implica una reducción del factor  $g$  y, por consiguiente, de la SINR, limitando así la capacidad total. Por lo tanto, la eficiencia espectral  $\eta$  (bit/s/Hz) depende de la relación SINR, y para evaluar la SINR necesaria para una  $\eta$  determinada, se deben consultar tablas o curvas obtenidas mediante simulaciones de enlaces LTE.

**LTE scheduling y tipos de modulación.** Una de las características más importantes de LTE es que puede realizar la selección de la tasa del código de canal corrector de errores. Adicionalmente, para la modulación de datos se tienen varias posibles configuraciones divididas en el enlace de bajada y en el enlace de subida. Para el enlace de bajada DL se soportan modulaciones QPSK, 16 QAM y 64 QAM, mientras que para el enlace de subida UL se soportan modulaciones BPSK, QPSK, 16 QAM y 64 QAM.

La tecnología de acceso al medio LTE usa OFDMA para el enlace de bajada DL por la alta eficiencia en la operación móvil y por la alta resistencia a condiciones de desvanecimiento por multirayecto, aunque presenta problemas en los bordes de las celdas. Y utiliza SC-FDMA en el enlace de subida para reducir los costos en los *User Equipment* (UE) y mejorar el desempeño de los terminales en los bordes de las celdas. Las antenas para los *evolved Node B* (eNB) y los UE generalmente tienen configuración MIMO: dos antenas transmisoras y dos receptoras para el eNB y una antena transmisora y dos receptoras en el UE. De manera que en el enlace de bajada existe un arreglo 2x2 y en el enlace de subida, un arreglo 1x2.

En este sentido, basados en OFDM, se tiene un uso del recurso físico mediante la división en frecuencia y tiempo. La unidad básica de la transmisión es el *Resource Block* (RB), constituido por 12 subportadoras en frecuencia con separación de 15 KHz y 1 *Time Slot* (TS) de 0.5 ms con siete símbolos OFDM. En un intervalo de transmisión TTI de 1 ms se cuenta con un par de RB (Gebner, 2011). En la **Tabla 2** se presenta un resumen con las características descritas, y en la **Tabla 3** se describen los canales físicos de LTE.

**Tabla 2.** Características de LTE Release 8.

Enlace	DL		UL			
Modulación de datos	QPSK, 16 QAM, 64 QAM		BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM			
Tecnología de acceso	OFDMA		SC-FDMA			
Esquema de antenas de RF	2Tx-2Rx		2Tx-2Rx			
Codificación de canal	Turbo códigos					
Tasa máxima de transmisión	100-326.4 Mbps		50-86.4 Mbps			
Ancho de banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de bloques de recursos	6	15	25	50	75	100



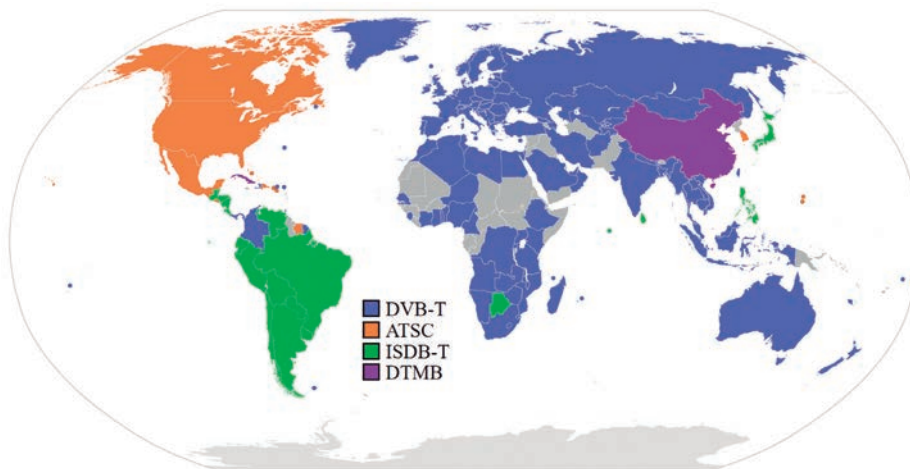
**Tabla 3.** Descripción de canales físicos en LTE.

Acrónimo	Nombre	Descripción	Dirección
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel.</i>	Portadoras con los datos útiles.	DL
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel.</i>	Portadoras con información de control.	DL
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel.</i>	Indica el formato del canal PDCCH.	DL
PHICH	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel.</i>	Portadoras ACK/NACKs para los paquetes de datos del enlace de subida.	DL
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel.</i>	Información durante la búsqueda de la celda.	DL
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel.</i>	Portadoras con los datos útiles.	UL
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel.</i>	Portadoras con información de control.	UL
PRACH	<i>Physical Random Access Channel.</i>	Transmisión preliminar para el acceso inicial.	UL

### Televisión digital terrestre

La TDT es el servicio de televisión que se ha desarrollado para reemplazar los sistemas análogos; en el mundo existen los siguientes estándares: ATSC, ISDB-T, DTMB, DVB-T y SBTVD. Este servicio contribuye a mejorar la experiencia del televidente, pues ofrece mayor calidad en la imagen y, adicionalmente, hace un mejor uso del espectro radioeléctrico, por lo que es más eficiente en comparación con un único canal analógico que ocupe un ancho de banda de 6 MHz u 8 MHz. En este mismo ancho de banda se pueden transmitir hasta cuatro servicios digitales TDT con calidad estándar (SD) o uno de alta definición (HD) y servicios de audio.

En la **Figura 3** se aprecia la distribución de los estándares por países; se evidencia en dicha distribución que el estándar europeo DVB-T predomina en la gran mayoría de países del mundo, incluyendo Colombia, mientras que en Latinoamérica predomina el estándar japonés ISDB-T, lo cual genera serios desafíos técnicos y administrativos de coexistencia de redes y servicios en las fronteras colombianas.



**Figura 3.** Sistemas TDT por país. Fuente: <https://goo.gl/321RtS>



Colombia escogió, en agosto del 2008, el estándar *Digital Video Broadcasting - Terrestrial* (DVB-T), y a mediados del 2010 decidió adoptar la segunda generación del mismo, denominada DVB-T2, cuyas primeras transmisiones se realizaron en mayo del 2012.

A continuación, se presenta una breve descripción de los estándares de TDT adoptados por los países que tienen frontera con Colombia: el estándar europeo DVB-T/T2, el japonés ISDB-T, que se usa en Ecuador, Perú y Venezuela, y el brasileiro SBTVD.

**Estándar europeo - DVB-T.** El estándar europeo DVB-T fue originalmente desarrollado por el Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI) a través del documento EN 300 744, el cual define la línea base para los sistemas de radiodifusión televisiva terrestre y especifica la estructura de la trama de datos, la codificación de canal y el tipo de modulación desde la salida del codificador MPEG hasta el canal de transmisión (ETSI, 2009).

En DVB-T el tratamiento de la señal de televisión digital maneja un proceso de cuatro etapas: a) el procesamiento de la señal de entrada, b) la intercalación de bits, codificación y modulación de la señal (BICM), c) la construcción de la trama, y d) la generación de la modulación OFDM. DVB-T hace uso del formato del *Moving Picture Experts Group* (MPEG) para la compresión de los datos de video y audio, y utiliza modulación codificada COFDM para la transmisión digital en combinación con modulaciones QPSK, 16 QAM o 64 QAM. El estándar también define cinco tasas diferentes para el control de error (*Forward Error Correction*, FEC), así como cuatro opciones de intervalos de guarda (1/32, 1/16, 1/8 y 1/4), y puede operar en canales de ancho de banda de 6, 7 y 8 MHz.

Dicho estándar proporciona diferentes ventajas para la transmisión de la televisión digital, como la inclusión de un intervalo de guarda, el cual ayuda a que la interferencia intersímbolo (ISI) y los ecos de la transmisión no afecten de manera significativa la transmisión. La modulación COFDM reduce la interferencia cocanal y de canal adyacente. Adicionalmente, DVB-T permite realizar dos niveles de codificación (de canal y modulación), para lo que es necesario implementar dos *Transport Stream* (TS). Cada TS se basa en un protocolo utilizado para audio, video y datos en los estándares MPEG-2/4. Cada uno de los TS es de diferente jerarquía: uno de prioridad alta (HP) y otro de prioridad baja (LP). De esta forma una señal televisiva puede ser transmitida simultáneamente en un modo de baja tasa de transmisión con gran robustez, lo que permite una recepción muy segura con un receptor más sencillo, y en un modo de alta tasa de transmisión para receptores más sofisticados, lo que permite una mejor calidad de imagen.

El diagrama de bloques de un sistema DVB-T está descrito en detalle en la **Figura 4** (ETSI, 2009). En primera instancia se parte de la fuente de señales digitales MPEG, codificadas y multiplexadas; posteriormente se ingresa a la sección de televisión digital del estándar DVB, donde se presentan los codificadores exteriores, el *interleaver* externo y el codificador externo. En la parte inferior se tienen los bloques propios de la parte terrestre, en los que está el *interleaver* interno, el mapeador que involucra la señal con la información, más las portadoras piloto y las señales TSP; luego se continúa con la adaptación de





la trama, la creación de las señales OFDM y la inserción de los intervalos de guarda. Finalmente se realiza una conversión digital análoga para ser transmitida a la radiofrecuencia y canales deseados.

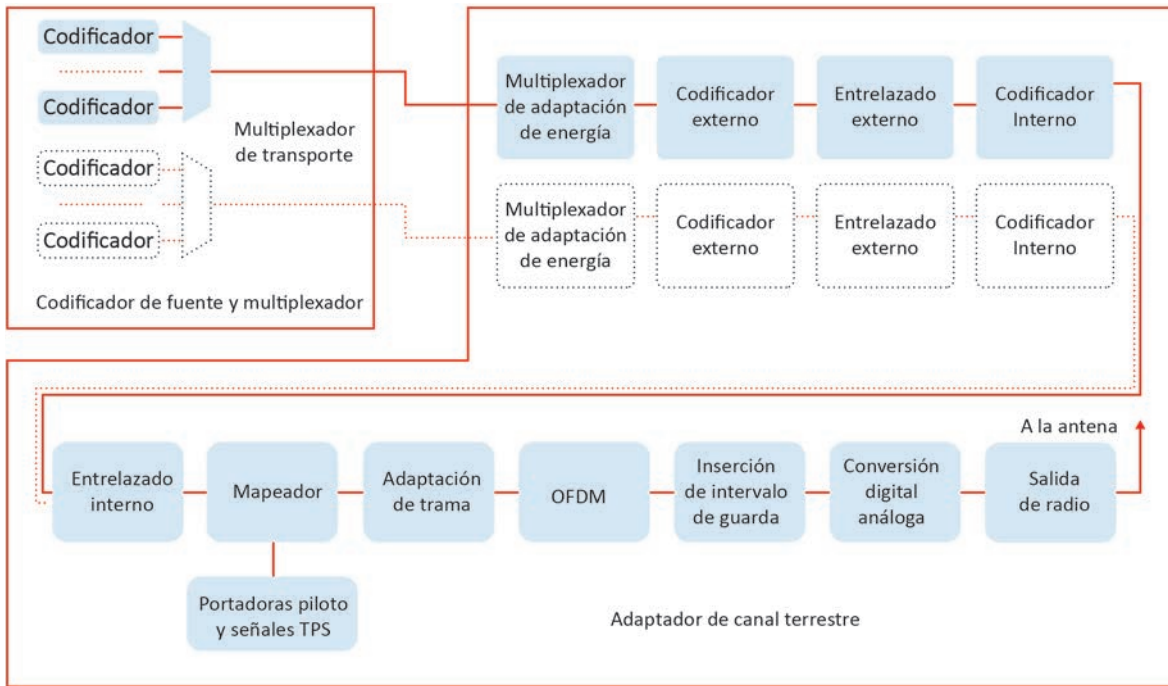


Figura 4. Diagrama de bloques de un transmisor DVB-T. Fuente: (ETSI, 2009).

**Estándar europeo de segunda generación DVB-T2.** La segunda generación del estándar europeo se denomina DVB-T2 y está estandarizada en los documentos ETSI-EN 302 755 (ETSI, 2010), ETSI-TS 102 773 (ETSI, 2012) y ETSI-TS 102 992 (ETSI, 2010); este estándar introduce características técnicas adicionales a las del DVB-T, tales como: modulación 256 QAM, esquemas de corrección de error *Low Density Parity Check* (LDPC) y BCH, tres intervalos de guarda adicionales (19/128, 19/256 y 1/128), más modos OFDM (1 K, 2 K, 4 K, 8 K, 16 K y 32 K) y anchos de banda de 1.7, 5, 6, 7, 8 y 10 MHz (ETSI, 2010).

Esta versión se diseñó para que fuera compatible con la plataforma ya desplegada de DVB-T y provee un aumento notable de la capacidad de transmisión (hasta en un 67 % en la carga útil), así como menores tasas de error, mayor robustez de la señal respecto a su predecesor y, particularmente, una reducción del *Peak Average Power Ratio* (PAPR) (DVB Project Office, 2016).

Este nuevo estándar define los bloques necesarios para la generación de la señal y posterior transmisión. Los procesos que más han cambiado son los del segundo bloque BICM, en el que las técnicas de codificación FEC y modulación aumentaron la capacidad del sistema para permitir la prestación de más y mejores servicios en el mismo espectro. Algunas de las nuevas tecnologías que trae consigo DVB-T2 son la codificación Almoluti,



la rotación de la constelación y las múltiples conexiones en la capa física (DVB Project Office, 2016). En la **Tabla 4** se presenta una comparación de las características técnicas de los estándares mencionados.

**Tabla 4.** Comparación de los sistemas TDT DVB-T y DVB-T2.

Parámetro	DVB-T	DVB-T2
FEC	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 Viterbi + ReedSolomon	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6 LDPC + BCH
Modos	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM
Intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/128, 1/8, 1/16, 1/32, 1/128
FFT	2 k, 8 k	1 k, 2 k, 4 k, 8 k, 16 k, 32 k
P. piloto dispersas	8 %	1 %, 2 %, 4 %, 8 %
P. piloto continuas	2 %	0.4 %-2.4 %
Ancho de banda	6, 7, 8 MHz	1.7, 5, 6, 7, 8, 10 MHz
Tasa típica	24.0 Mbps	40.0 Mbps
Máx. tasa de datos a 20 dB C/N y canal de 8 MHz	31.7 Mbps	45.5 Mbps
Relación C/N para 24 MBps	16.7 dB	10.8 dB

Fuente: ETSI (2009) y ETSI (2010).

**Estructura de trama OFDM y recepción DVB-T/T2 e interfaces de transmisión.** Para una correcta recepción es importante tener diversas señalizaciones, por lo cual no es suficiente haber modulado la información que se desea transmitir. La descripción de todos los elementos necesarios para una óptima transmisión-recepción del DVB-T y DVB-T2, así como las interfaces de transmisión más apropiadas, se detallan a continuación.

**Estructura de trama OFDM.** El estándar DVB-T utiliza portadoras que se encuentran dentro de la modulación COFDM, lo cual permite utilizar modulaciones digitales de fase, como son QAM y QPSK, al igual que diferentes tasas de transmisión; gracias a la utilización de OFDM se obtiene un mejor rendimiento en cuanto a la propagación. Este tipo de modulación busca dividir el flujo de información de diferentes portadoras haciendo que la velocidad en estas sea mucho más reducida, lo que permite que la señal sea robusta, y esto es importante a la hora de encontrarse con interferencias en la transmisión realizada.

La señal que se va a transmitir en DVB-T es organizada en tramas; cada una contiene 68 símbolos OFDM y cuatro componen una supertrama. De acuerdo a la selección de la *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT) hay dos modos de generar la señal OFDM: 2 K y 8 K. En 2 k se tienen 2048 subportadoras con espaciamiento de aproximadamente 4 KHz y duración de símbolo de 250 microsegundos, mientras que en 8 K se tienen 8192 subportadoras con espaciamiento de aproximadamente 1 KHz y duración de símbolo de 1 milisegundo.

La carga útil o *payload* en 2 K es de 1512 subportadoras, mientras que en 8 K es de 6048 subportadoras; las otras subportadoras son utilizadas para propósitos de señali-





zación y control. Existen tres tipos de portadoras piloto y control: *Continual Pilots* (CP), *Scattered Pilots* (SP) y *Transmission Parameter Signalling Pilots* (TPS); estas pueden ser usadas para sincronización de trama, sincronización de frecuencia, estimación de canal, identificación del modo de transmisión y seguimiento del ruido de fase, entre otros (Ivo & Queiroz, 2008).

En la **Tabla 5** se presentan los parámetros de OFDM para canales de 6 MHz, mientras que en la **Tabla 6** se presentan los tiempos para los intervalos de guarda de las señales OFDM en cada uno de los modos de transmisión.

**Tabla 5.** Parámetros de OFDM para canales de 6 MHz.

Parámetro	Modo 8 K	Modo 2 K
Número de portadoras (K)	6 817	1 705
Duración de $T_u$ ( $T_u$ )	1 194.67 $\mu$ s	298.67 $\mu$ s
Espaciamiento de subportadoras	0.837054 KHz	3.348214 KHz
Espacio entre portadora $K_{min}$ y $K_{max}$	5.71 MHz	5.71 MHz

Fuente: ETSI (2012).

**Tabla 6.** Duración de la parte de símbolo para los intervalos de guarda permitidos en canales de 6 MHz.

Modo	Modo 8 K				Modo 2 K			
	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Intervalo de guarda ( $\Delta/T_u$ )								
Duración de la parte de símbolo ( $T_u$ )	8 192 *T 1 194.667 $\mu$ s				2 048 *T 298.667 $\mu$ s			
Duración del intervalo de guarda $\Delta$	2 048 *T 298.667 $\mu$ s	1 024 *T 149.333 $\mu$ s	512 *T 74.667 $\mu$ s	256 *T 37.333 $\mu$ s	512 *T 74.667 $\mu$ s	256 *T 37.333 $\mu$ s	128 *T 18.667 $\mu$ s	64 *T 9.333 $\mu$ s
Duración del símbolo $T_s = \Delta + T_u$	10240 *T 1493.3 $\mu$ s	9216 *T 1344 $\mu$ s	8 704 *T 1269.3 $\mu$ s	8448 *T 1232 $\mu$ s	2560 *T 373.3 $\mu$ s	2304 *T 336 $\mu$ s	2176 *T 317.3 $\mu$ s	2112 *T 308 $\mu$ s

Fuente: ETSI (2012).

**Recepción DVB-T/T2 e interfaces de transmisión.** El estándar DVB-T tiene dispuestas diversas portadoras piloto, que son encargadas de proporcionar información adicional como sincronización de las tramas, seguimiento del ruido de fase, identificación del modo de transmisión, entre otras. Estas portadoras se encuentran divididas en tres: piloto-continuas o *continual pilot carriers*, piloto-dispersas o *scattered pilot carriers* y pilotos de señalización o *TPS carriers*. Gracias a las diferentes portadoras piloto que ofrece este estándar se puede realizar una correcta demodulación, de tal suerte que los errores disminuyan y la calidad en la recepción aumente significativamente (**Figura 5**).





Figura 5. Diagrama simplificado de un receptor DVB-T. Fuente: (R&S, 2012).

Por otro lado, es importante resaltar que DVB-T en su recepción realiza tres muestras de la tasa de error de bit (BER), la cual simboliza la pérdida de datos en la transmisión. Se realizan tres muestras con el fin de observar una correcta demodulación, las cuales se efectúan antes del Viterbi y antes y después de la decodificación Reed Solomon para que al final de la última etapa el BER sea igual o cercano a cero. En la Figura 6 se visualiza el proceso típico de demodulación de señales DVB-T. Para el caso de la segunda generación DVB-T2, el proceso de recepción se vuelve un poco más complejo, ya que se cambia el sistema de corrección de errores FEC, así como los procesos de mapeo y de procesamiento de la trama.



Figura 6. Diagrama simplificado de un receptor DVB-T2. Fuente: (R&S, 2012).

En cuanto a la interfaz de transmisión, la elección de una u otra tiene consecuencias importantes en los costes de los despliegues, en el servicio ofrecido y en el aprovechamiento del espectro. Sus características distintivas son las siguientes:

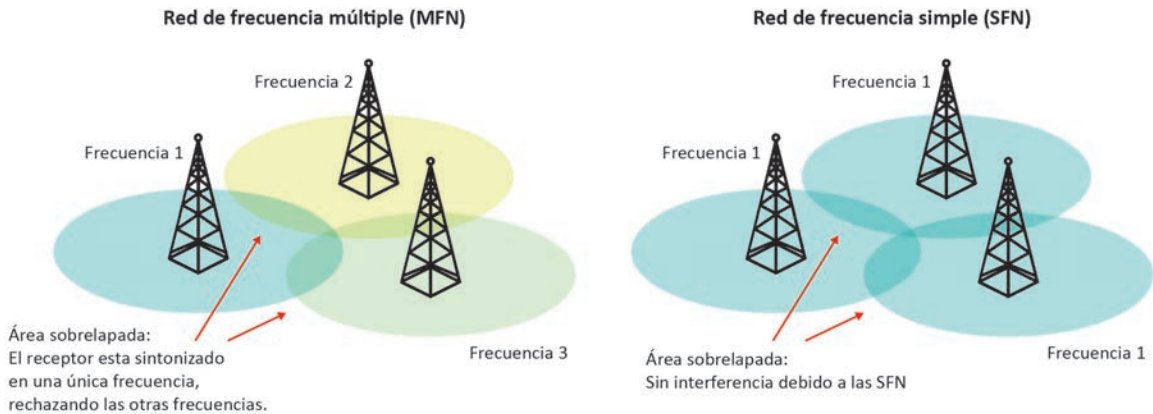
**Multiple Frequency Network (MFN).** En las redes de frecuencia múltiple cada transmisor dispone de radiofrecuencias individualizadas (cada uno de ellos transmite a una frecuencia diferente), no se requiere una sincronización de las distintas torres emisoras y se pueden realizar desconexiones de la programación a distintos niveles, en función de los intereses del editor de contenidos. Cuando se opte por este tipo de redes, debe tenerse en cuenta que harán falta más recursos de frecuencias.

**Single Frequency Network (SFN).** En las redes de frecuencia única todos los transmisores del área de cobertura radian a la misma frecuencia y todas las emisiones deben estar moduladas con la misma señal, para lo cual tienen que estar sincronizados todos los transmisores. No se pueden realizar desconexiones, pues la señal debe ser la misma para todos los equipos transmisores del área de cobertura. Por el contrario, permiten un mejor



aprovechamiento de los recursos del espectro y su planificación es más sencilla. En recepción se producen ganancias de la señal por los propios ecos que se generan durante la transmisión.

En la **Figura 7** se presentan las diferencias entre las redes de frecuencia única y de múltiple frecuencia, y, además, se enfatiza en la eliminación de interferencias cocanal debido al proceso de las SFN.

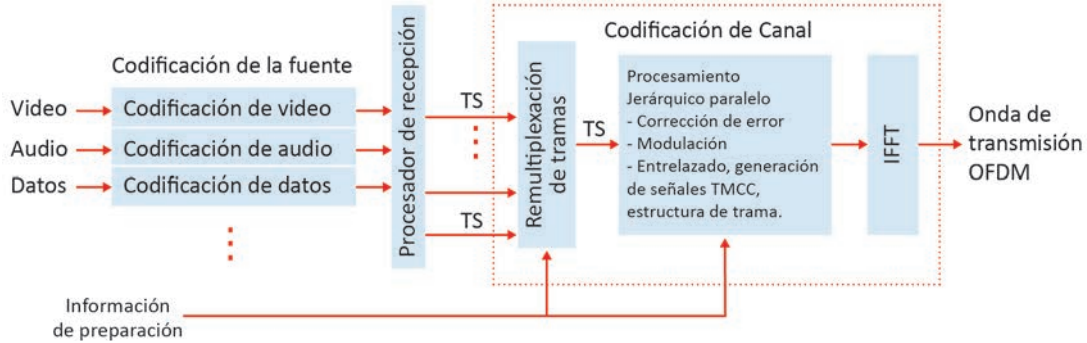


**Figura 7.** Comparación de sistemas MFN versus SFN.

**Estándar japonés ISDB-T.** *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial* (ISDB-T) es el estándar japonés definido en el 2003; se considera un medio de radiodifusión multimedia con el cual se pueden transmitir, además de audio y video, datos y texto enfocados en la interactividad. Es uno de los estándares más robustos para la recepción en dispositivos portables, ya que desarrolló un concepto conocido como "recepción parcial de un segundo". Este estándar está definido en el ARIB STD-B31, cuya versión vigente es la 2.2 de marzo del 2014 (ARIB, 2014). En el sistema ISDB-T las tramas provenientes de los multiplexores son re-multiplexadas en un único flujo de transporte (TS). Posteriormente, este TS es sujeto a diversas codificaciones de canal, incluyendo técnicas de *interleaving*, para luego ser enviado en una única señal modulada OFDM, con lo que se logra una comunicación mucho más robusta.

La transmisión de ISDB-T tiene 13 segmentos OFDM y cada uno ocupa un ancho de banda de 1/14 del canal total de televisión. Debido a que la codificación de canal es realizada por cada segmento OFDM, se pueden usar uno o varios segmentos para diversos servicios, como recepción fija, recepción móvil u otro servicio, en lo que se conoce como "transmisión jerárquica". Cada transmisión jerárquica puede contener uno o varios segmentos y variar los parámetros de la técnica de modulación, los códigos de corrección de errores, la tasa de codificación y el tiempo de *interleaving*. Un TS puede tener hasta un máximo de tres transmisiones jerárquicas, incluyendo una de recepción parcial. En la **Figura 8** se muestra el diagrama general de la arquitectura del ISDB-T (ARIB, 2014).





**Figura 8.** Arquitectura general del estándar japonés ISDB-T. Fuente: (ARIB, 2014).

ISDB-T presenta tres modos, todos enfocados en mejorar las características de recepción móvil mediante tres espaciamientos diferentes entre las subportadoras de OFDM. Los espaciamientos para los modos 1, 2 y 3 son 4 KHz, 2 KHz y 1 KHz, respectivamente, lo cual genera que el número de subportadoras varíe en cada modo; sin embargo, la tasa de símbolo es constante en cada uno de los tres modos.

**Estándar brasileiro SBTVD.** El *Sistema Brasileiro de Televisão Digital* (SBTVD) fue desarrollado tomando como base el ISDB-T japonés, después de comparar los demás sistemas de televisión digital existentes. Fue diseñado con la finalidad de permitir la inclusión digital y servir de herramienta para la democratización de la información en Brasil.

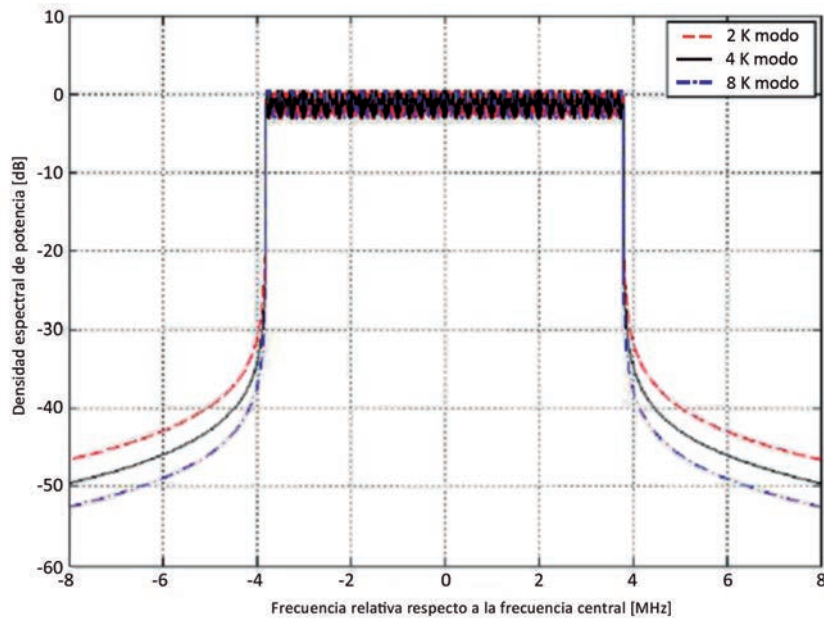
Las mayores diferencias en este estándar se encuentran en el uso de tecnologías de compresión de video y audio más avanzadas que las utilizadas en Japón, en el innovador *middleware* desarrollado en Brasil y en la protección de contenidos. No obstante, la modulación es idéntica en ambos sistemas. La transmisión digital se realiza con el *time interleaving* para proveer una codificación con la menor tasa de errores para la recepción móvil; el espectro de radiodifusión también consiste en 13 bloques OFDM sucesivos y cada uno ocupa 1/14 del ancho de banda del canal de televisión.

**Características espectrales de DVB-T2 e ISDB-T.** Las características espectrales del estándar europeo y del japonés son similares en cuanto a que ambos usan modulaciones OFDM y codificaciones que permiten el control de errores en los receptores. Sin embargo, las características particulares de la generación de las señales OFDM en la transmisión difieren de un estándar a otro. Los estudios sobre cómo sus máscaras afectan a los sistemas cercanos también son diferentes. Las características espectrales de ambos sistemas, así como sus máscaras y los parámetros para la creación de los segmentos OFDM, se describen a continuación.

**Características espectrales de DVB-T.** Debido a que los símbolos OFDM son una yuxtaposición de portadoras ortogonales en la que las amplitudes y fases varían entre cada



símbolo debido al proceso de mapeo, la densidad espectral de potencia de la señal modulada es la suma de todas las densidades espectrales de sus portadoras. Un aspecto importante en DVB-T es que el ancho de banda de cada símbolo modulado es inferior al espaciado entre subportadoras, lo que lleva a que la densidad espectral no sea constante en todo el ancho de banda nominal. En la **Figura 9** se muestra el espectro teórico de la señal OFDM para los modos de 2 K, 4 K y 8 K para un canal de 8 MHz (7.611607 MHz, 7.609375 MHz y 7.608259 MHz, respectivamente) (ETSI, 2009).



**Figura 9.** Densidad espectral potencia para diversos modos en DVB-T en canales de 8 MHz. Fuente: (ETSI, 2009).

Para asegurar una transmisión fuera de la banda nominal adecuada es necesario aplicar máscaras que permitan la coexistencia entre servicios de diversos sistemas. El estándar DVB-T recomienda una serie de máscaras con los estándares de televisión analógica para instalación de servicios TDT en sitios donde ya existen servicios analógicos y que cumplen dos requerimientos: a) no hay discriminación de la polarización entre los servicios analógicos y digitales y b) la potencia radiada por ambos servicios es la misma (en específico, la potencia picosincronizada analógica es igual a la potencia total del transmisor digital). Para realizar un análisis de las mediciones fuera de banda se observa la relación de las transmisiones con mediciones simuladas a través de máscaras de diversos servicios. Dichas máscaras aplicadas son a) *Critical*, b) G PAL/NICAM, c) G PAL/A2, d) I PAL/NICAM, e) K SECAM/K PAL y f) L SECAM/NICAM.

Estas máscaras indican diferentes tolerancias a emisiones fuera de banda y muestran diversos parámetros, como se observa en la **Tabla 7** y en la **Figura 10**. Cabe mencionar que el estándar define estos parámetros para canales de 8 MHz. Para canales de 6 MHz se re-



comienda hacer una compensación de frecuencia restando los valores de banda superior e inferior con 1 MHz aproximadamente a cada lado (ETSI, 2009).

Para el caso de la segunda generación DVB-T2, los espectros son similares, pero incluyen más modos del sistema. Estos están representados en la **Figura 11** para un sistema de 8 MHz (ETSI, 2012). El estándar deja a libertad de la administración correspondiente la definición de filtrado, dependiendo de las características de frecuencia, ubicación y bandas que se van a usar en el despliegue de DVB-T2.

**Tabla 7.** Parámetros de protección y máscaras dentro y fuera de banda para sistemas TDT operando en el mismo sitio de señales analógicas para canales de 8 MHz.

Ver nota	G/PAL NICAM		G/PAL A2		I/PAL NICAM		K/SECAMK PAL		L/SECAM NICAM	
	Frec. (MHz)	Nivel (dB)	Frec. (MHz)	Nivel (dB)	Frec. (MHz)	Nivel (dB)	Frec. (MHz)	Nivel (dB)	Frec. (MHz)	Nivel (dB)
1	-12	-100	-12	-100	-12	-100	-12	-100	-12	-100
2	-10.75	-76.9	-10.75	-76.9	-10.75	-76.9	-10.75	-78.7	-10.75	-72.4
3	-9.75	-76.9	-9.75	-76.9	-9.75	-76.9	-9.75	-78.7	-9.75	-72.4
4	-5.75	-74.2	-5.75	-74.2	-5.75	-70.9	-4.75	-73.6	-4.75	-60.9
5	-5.185	-60.9	-5.185	NA	-4.685	-59.9	-4.185	-59.9	-4.185	-79.9
6	NA	NA	-4.94	-69.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA
7	-4.65	-56.9	NA	NA	-3.925	-56.9	NA	NA	-4.65	NA
8	-3.9	-32.8	-3.9	-32.8	-3.9	-32.8	-3.9	-32.8	-3.9	-32.8
9	+3.9	-32.8	+3.9	-32.8	+3.9	-32.8	+3.9	-32.8	+3.9	-32.8
10	+4.25	-64.9	+4.25	-64.9	+4.25	-66.9	+4.25	-66.1	+4.25	-59.9
11	+5.25	-76.9	+5.25	-76.9	+5.25	76.2	+5.25	-78.7	+5.25	-69.9
12	+6.25	-76.9	+6.25	-76.9	+6.25	-76.9	+6.25	-78.7	+6.25	-72.4
13	+10.25	-76.9	+10.25	-76.9	+10.25	-76.9	+11.25	-78.7	+11.25	-72.4
14	+12	-100	+12	-100	+12	-100	+12	-100	+12	-100

**Parámetros**

1. Extremo inferior del canal adyacente inferior.
2. Portadora de imagen en el canal adyacente inferior.
3. Visión portadora 1 MHz en el canal adyacente inferior.
4. Extremo superior del video de la banda lateral en el canal adyacente inferior.
5. Extremo superior del ancho de banda de RF de la primera portadora de audio en el canal adyacente inferior.
6. Extremo superior del ancho de banda de RF de la segunda portadora de audio en el canal adyacente inferior.
7. Extremo superior del ancho de banda de RF de la señal de NICAM en el canal adyacente inferior.
8. Extremo inferior del ancho de banda de RF en la señal DVB-T.
9. Extremo superior del ancho de banda de RF en la señal DVB-T.
10. Extremo inferior de banda lateral de video en el canal adyacente superior.
11. Visión portadora en el canal adyacente superior.
12. Visión portadora 1 MHz en el canal adyacente superior.
13. Extremo superior del video de la banda lateral en el canal adyacente superior.
14. Extremo superior del canal adyacente superior.

Fuente: ETSI (2009).





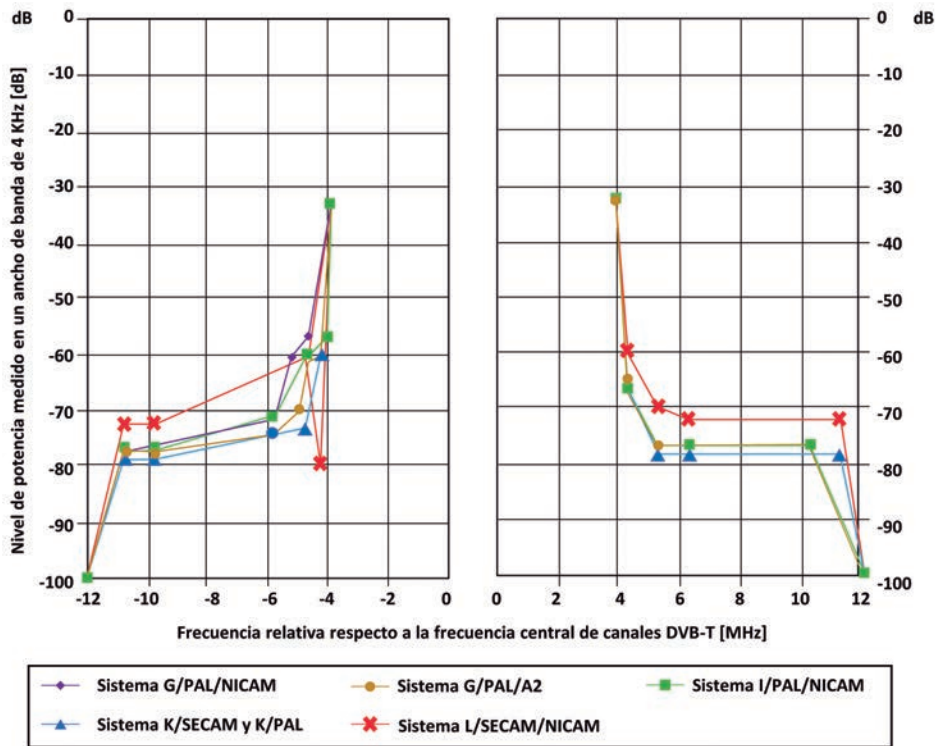


Figura 10. Máscaras espectrales para sistemas TDT operando en mismo sitio de señales analógicas para canales de 8 MHz. Fuente: (ETSI, 2009).

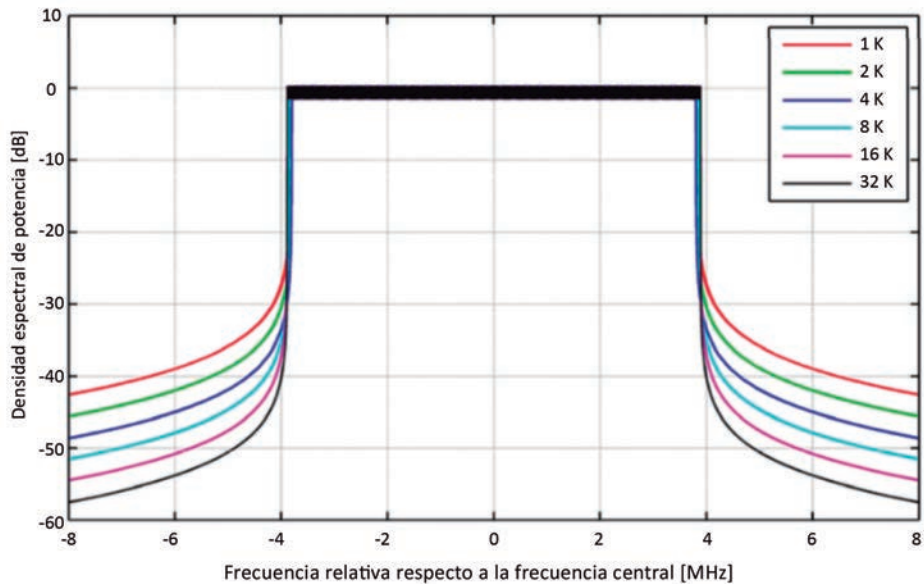
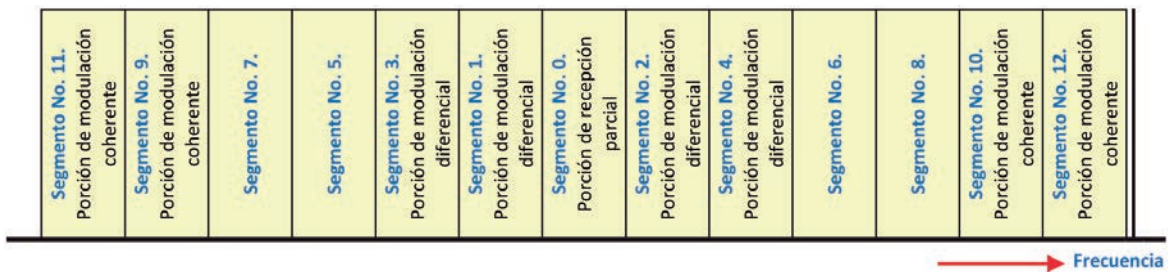


Figura 11. Densidad de potencia espectral para diversos modos en DVB-T2 en canales de 8 MHz. Fuente: (ETSI, 2012).



**Características espectrales de ISDB-T.** El estándar japonés especifica que los segmentos OFDM deben ser organizados desde el centro (segmento 0) y enumerados alternativamente hacia la izquierda y la derecha intercaladamente. Además, para las modulaciones diferenciales deben tener los números de segmentos inferiores (parte interna del espectro), mientras que las modulaciones coherentes deben estar en los números altos de segmentos (parte externa del espectro); esto con el fin de permitir una mejor recepción móvil. Por otro lado, el segmento 0 siempre debe ser asignado a la recepción parcial para facilitar la recepción en móviles sencillos. Finalmente, en la frecuencia más alta, ISDB-T estipula una portadora piloto para la demodulación y está determinada por el tipo de modo que se utilice. En la **Figura 12** se describe la organización espectral de ISDB-T.



**Figura 12.** Organización de segmentos OFDM en el espectro de transmisión de ISDB-T. Fuente: (ARIB, 2014).

La **Tabla 8** presenta los parámetros de la señal OFDM para la ISDB-T y describe el ancho de banda de cada uno de los segmentos y el espaciamiento entre portadoras para los tres modos definidos. La **Tabla 8** también define el número de portadoras piloto (SP = *Scatter Pilots*), las CP = *Continual Pilots* y los canales auxiliares (AC1 y AC2).

**Tabla 8.** Parámetros OFDM para los segmentos de ISDB-T.

Modo	Modo 1		Modo 2		Modo 3	
Ancho de banda del segmento (Bws)	6000/14 428.57 KHz					
Espaciamiento entre portadoras (Cs)	Bws/108 3.968 KHz		Bws/216 1.984 KHz		Bws/432 0.992 KHz	
Número total de portadoras	108	108	216	216	432	432
Data	96	96	192	192	384	384
SP	9	0	18	0	36	0
CP	0	1	0	1	0	1
TMCC	1	5	2	10	4	20
AC1	2	2	4	4	8	8
AC2	0	4	0	9	0	19
Tipo de modulación	QPSK 16 QAM 64 QAM	DQPSK	QPSK 16 QAM 64 QAM	DQPSK	QPSK 16 QAM 64 QAM	DQPSK

Continúa en la próxima página





**Continuación de la Tabla 8.** Parámetros OFDM para los segmentos de ISDB-T.

Modo	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Símbolos por trama	204		
Longitud efectiva del símbolo	252 $\mu$ s	504 $\mu$ s	1008 $\mu$ s
Intervalo de guarda	63 $\mu$ s (1/4) 31.5 $\mu$ s (1/8) 15.75 $\mu$ s (1/16) 7.875 $\mu$ s (1/32)	126 $\mu$ s (1/4), 63 $\mu$ s (1/8) 31.5 $\mu$ s (1/16) 15.75 $\mu$ s (1/32)	252 $\mu$ s (1/4) 126 $\mu$ s (1/8) 63 $\mu$ s (1/16) 31.5 $\mu$ s (1/32)
Longitud del símbolo	315 $\mu$ s (1/4) 283.5 $\mu$ s (1/8) 267.75 $\mu$ s (1/16) 259.875 $\mu$ s (1/32)	630 $\mu$ s (1/4) 567 $\mu$ s (1/8) 535.5 $\mu$ s (1/16) 519.75 $\mu$ s (1/32)	1260 $\mu$ s (1/4) 1134 $\mu$ s (1/8) 1071 $\mu$ s (1/16) 1039.5 $\mu$ s (1/32)
Longitud de la trama	64.26 ms (1/4) 57.834 ms (1/8) 54.621 ms (1/16) 53.0145 ms (1/32)	128.52 ms (1/4) 115.668 ms (1/8) 109.242 ms (1/16) 106.029 ms (1/32)	257.04 ms (1/4) 231.336 ms (1/8) 218.484 ms (1/16) 212.058 ms (1/32)
Frecuencia de muestreo de FFT	2048/252 = 8.126984 MHz		
Codificador interno	Código convolucional (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)		
Codificador externo	RS (204,188)		

Fuente: ARIB (2014).

El estándar ISDB-T requiere de al menos 5.7 MHz de ancho de banda para transmisión de TDT, independiente del modo de transmisión que se elija. Este valor debe garantizar que las portadoras superiores e inferiores de un ancho de banda de 5.61 MHz tengan margen para que se incluya el 99 % de la energía en un ancho de 5.572 MHz. Adicionalmente, la desviación de frecuencia permisible es máximo de 1 Hz (**Tabla 9**).

**Tabla 9.** Puntos de quiebre para las máscaras espectrales de ISDB-T.

Diferencia desde la frecuencia central (MHz)	Atenuación relativa a la potencia media P (dB/10 KHz)	Tipo de estipulación
$\pm 2.79$	-27.4	Límite superior
$\pm 2.86$	-47.4	Límite superior
$\pm 3.00$	-54.4	Límite superior
$\pm 4.36$	-77.4	Límite superior

Fuente: ARIB (2014).

Las máscaras espectrales utilizadas en ISDB-T están definidas en la **Figura 13**; en dichas máscaras se determinan las atenuaciones de potencia media de la transmisión. Para el caso de que los canales adyacentes sean analógicos, se debe usar la máxima atenuación posible de la **Figura 13** (cuando  $P > 2.5$  W).



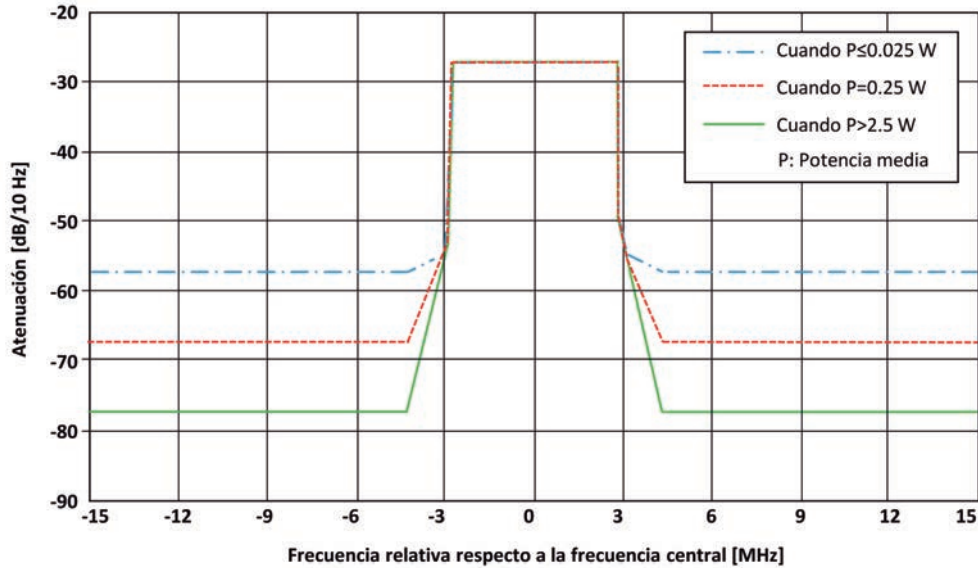


Figura 13. Límites de máscaras espectrales de ISDB-T. Fuente: (ARIB, 2014).

**Radio de protección.** Son un parámetro fundamental a la hora de establecer la coexistencia entre varios servicios y evitar fenómenos de interferencia. Para ello, la Recomendación EBU TECH 3348, en la sección de *Normatividad Internacional sobre LTE y TDT* hace la diferencia entre coexistencia de dos señales DVB-T2 y una señal DVB-T2 con una señal de otros servicios como LTE. Esto se muestra a continuación:

- **Entre señales DVB-T2.** a) Cocanal: Depende de la relación C/N. b) Canal adyacente: 19.7 dB sin *offset* de frecuencia. Si se tiene en cuenta un *offset*, la relación de protección (PR) se muestra en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Relaciones de protección entre señales DVB-T2 con diferentes *offsets*.

Offset (MHz)	PR (dB)
8	-30
16	-43
24	-43
32	-44
72	-49

Fuente: EBU (2014).

- **Entre señales DVB-T2 y LTE.** a) Cocanal: 19 dB. b) Canal adyacente: Depende de las cargas de tráfico o *traffic loading*. Sin *offset*: se debe tener en cuenta la **Tabla 11**, mientras que con *offset* el referente es la **Tabla 12**.



**Tabla 11.** Relaciones de protección entre señales DVB-T2 y LTE para diferentes *offsets*.

Tráfico	PR (dB)
0 %	11
50 %	18
100 %	19

Fuente: EBU (2014).

**Tabla 12.** Relaciones de protección entre señales DVB-T2 y LTE para diferentes *offsets*.

Offset (MHz)	PR (dB) con BS 0 %	PR (dB) con BS 50 %	PR (dB) con BS 100 %
10	-24	-38	-36
18	-32	-44	-43
26	-35	-45	-44
34	-39	-46	-45
42	-41	-47	-46
50	-46	-48	-47
58	-46	-49	-48
66	-45	-50	-49
74	-45	-50	-49

Fuente: EBU (2014).



## Capítulo 3. Gestión del espectro radioeléctrico y modelos de propagación



Una adecuada gestión del espectro radioeléctrico es requerida por el acelerado crecimiento de la tecnología, la creciente demanda de los usuarios de servicios móviles, y la interconexión entre máquinas, en lo que ahora se conoce como el “Internet de las Cosas”; además, es esencial para que todos tengan la oportunidad de contar con más y mejores posibilidades para acceder a servicios de banda ancha inalámbrica. Según la organización 4G Americas (4G Americas, 2013), la armonización del espectro radioeléctrico ofrece diversos beneficios, entre los cuales se puede destacar una mayor economía de escala. De igual forma, se pueden conseguir beneficios desde el punto de vista de la autonomía de las baterías de los dispositivos, de la mejora en la itinerancia y de la reducción de la interferencia en las fronteras de los países.

La organización encargada de la armonización del espectro radioeléctrico en el mundo es la UIT mediante las CMR. Los niveles necesarios para que se produzca dicha armonización son: i) la asignación de frecuencias de radio para servicios móviles, de acuerdo con las recomendaciones de la UIT. ii) Establecimiento de las disposiciones de frecuencias mundiales o regionales, incluyendo el tamaño del canal y las opciones de canalización. iii) Desarrollo de especificaciones y normas técnicas detalladas, incluyendo el rendimiento del sistema, el rendimiento de la radiofrecuencia y la coexistencia con otros sistemas en bandas vecinas. iv) Asignación de bloques de frecuencias con las condiciones técnicas y especificaciones asociadas con los operadores y proveedores de servicio. En la **Figura 14** se presenta gráficamente el proceso de la armonización del espectro radioeléctrico.

En Colombia el MinTIC, según la Ley 1341 de 2009, tiene como funciones planear, asignar, gestionar y controlar el espectro; establecer y mantener actualizado el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF); administrar el régimen de contrataciones y pagos de derechos; representar al país ante los organismos internacionales del sector; y ejecutar los tratados y convenios sobre TIC ratificados. El soporte técnico que requiere el MinTIC para cumplir con la gestión, planeación y ejercicio de la vigilancia y control del espectro radioeléctrico lo ejerce la ANE, que es una unidad administrativa especial adscrita a dicho ministerio, sin personería jurídica propia, pero con autonomía técnica, administrativa y financiera (MinTIC, Decreto 4169, 2011).



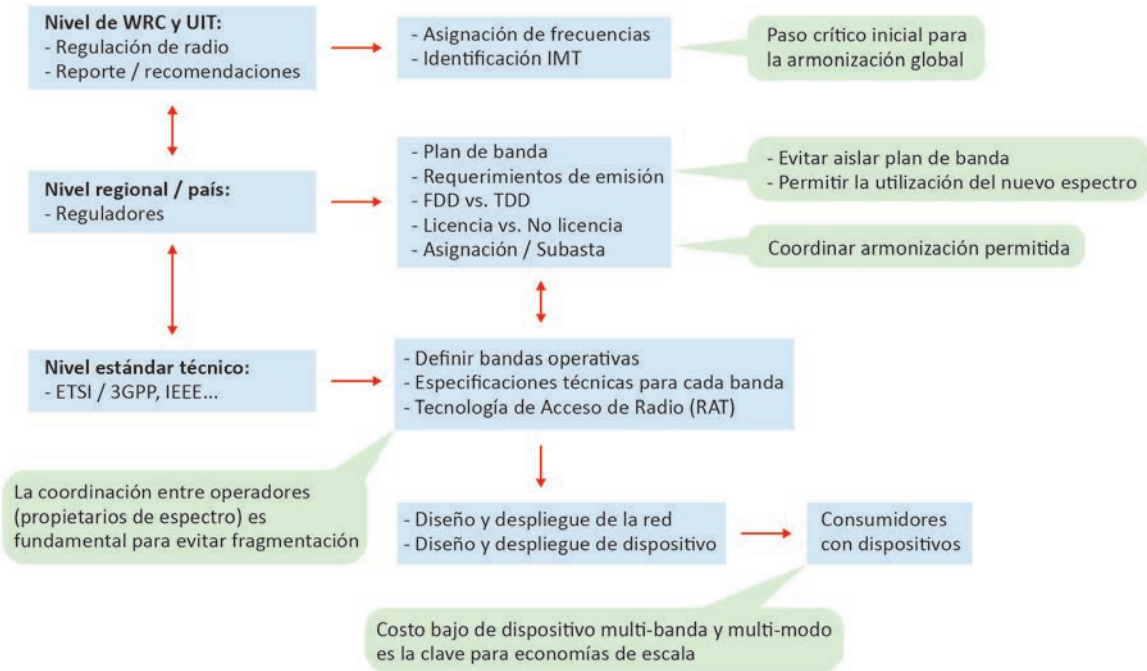


Figura 14. Procesos para la armonización del espectro radioeléctrico. Fuente: (ANE, 2010).

### Normatividad internacional sobre LTE y TDT

La normatividad estipulada por organismos reguladores, tales como la UIT, la CITELE y el ETSI, que puede contribuir a la definición de una metodología para el estudio de la coexistencia de las señales TDT y LTE en la banda de 614-698 MHz, y específicamente en ambientes transfronterizos, se relaciona en la [Tabla 13](#).

En la UIT-R BT 2033 de 2013 (UIT, 2013), sobre márgenes de protección de TDT y LTE, se definen los criterios de para la planificación, incluidas las relaciones de protección para la DVB-T2. Se destaca que las relaciones de protección para las señales de DVB-T2 interferidas por señales de televisión digital terrenal DVB-T2, o por señales de eNB LTE, o por señales de EU LTE, dependen del tipo de canal y del tipo de modulación. Es importante mencionar que para recepción fija y portátil deben adoptarse los valores correspondientes a los canales de Rice y de Rayleigh, respectivamente. Así mismo, los tipos de interferencias que se pueden producir son cocanal y de canal adyacente.

Para el estudio de interferencia entre señales TDT y LTE se deben tener en cuenta las cargas de tráfico; en este sentido, la norma define tres niveles de tráfico, ya que es improbable que pueda predecirse la carga de tráfico verdadera (funcionamiento real de los eNB y de los EU). El nivel más elevado de protección se alcanza tomando el valor más alto de la relación de protección y el valor más bajo para el umbral de sobrecarga para cualquier tecnología del sintonizador. Estos valores varían significativamente con el tipo de material del sintonizador; esto se presenta en la [Tabla 14](#).

**Tabla 13.** Normas y documentos sobre convivencia de los servicios TDT y LTE.

Documento	Año	Resumen
UIT-R BT 2215	2016	Mediciones de las tasas de protección y umbrales para receptores de TDT.
UIT-R BT 1368	2014	Criterio de planeación para tasa de protección para los servicios de TDT en las bandas VHF/UHF.
UIT-R BT 2033	2013	Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, para la segunda generación de los sistemas de radiodifusión de televisión digital terrestre en las bandas de ondas métricas/decimétricas.
UIT-R BT 2247-3	2015	Mediciones de campo y análisis de compatibilidad entre TDT y IMT.
UIT-R BT 2337-0	2014	Estudios de compatibilidad entre televisión digital terrestre y aplicaciones de banda ancha móvil terrestre, incluyendo IMT en la banda 470-694/698 MHz.
UIT-R BT 2296-0	2013	Ejemplo de aplicación de la recomendación UIT BT1895 y reporte UIT BT 2265 para medir la interferencia en los servicios de radiodifusión causadas por los sistemas IMT en amplificadores de cabecera existentes.
ETSI TR 101 290	2014	Guía de medidas para sistemas DVB. Cap. 11.3.
ETSI TS 102 831	2012	Guía de implementación de DVB-T2.
ETSI TR 101 190	2011	Valores mínimos de intensidad de campo.
EBU TR-034	2015	Parámetros de simulación para estudios teóricos de sistemas LTE.
EBU Tech 3348	2014	Lineamientos técnicos aplicables al estándar DVB-T2. Relación C/N.

**Tabla 14.** Cargas de tráfico para equipos en LTE.

LTE eNB		LTE UE	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
Inactiva	Señales de sincronización	Carga ligera	1 Mbps
Carga media	50 % de carga	Carga media	10 Mbps
Carga total	100 % de carga	Carga elevada	20 Mbps

### Normatividad colombiana para TDT, radiodifusión sonora y TV

En el ámbito nacional, la Resolución 4047 de 2012, definida por la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC), establece las condiciones técnicas mínimas aplicables a la red y a los receptores del servicio TDT en Colombia bajo el estándar DVB-T2. Según esta resolución, se deben seguir los lineamientos enunciados en la Recomendación ETSI TR 101 190 V1.3.2 de 2011 (ETSI, 2011) y en la Recomendación EBU Tech 3348 de 2014 (EBU, 2014).

El estudio detallado de estas normas es de suma importancia para analizar el funcionamiento de los servicios TDT en el país, especialmente en zonas de frontera, a la hora de compartir bandas de frecuencias con otros servicios como LTE para evitar interferencias y garantizar la coexistencia y el buen desempeño de estos servicios.

Para el caso fronterizo, en febrero de 2015 Colombia firmó con Ecuador el “Acuerdo modificadorio para la asignación y uso de frecuencias radioeléctricas para la operación de



estaciones de radiodifusión sonora y televisión abierta VHF y UHF en el área de frontera". En este se establecen dos grupos de banda UHF para la zona de coordinación y se asignan, tal como se muestra en la **Tabla 15** (MinTIC, 2015).

**Tabla 15.** Distribución de canales para el servicio de televisión en banda UHF.

País	Grupos	Banda IV	Banda V	Canales
Colombia	UHF-1	470 - 608 MHz 614 - 632 MHz	632 - 698 MHz	Canales pares entre el 14 y 51
Ecuador	UHF-2	470 - 482 MHz 512 - 608 MHz 614 - 644 MHz	644 - 698 MHz	Canales impares entre 14 y 51

Fuente: MinTIC (2015).

Se define la zona de coordinación, delimitada por una distancia de 15 km hacia cada uno de los respectivos países a partir de la línea de frontera. La intensidad de campo mínima por proteger, para el caso de los servicios de TDT bajo el estándar ISDB-T, es de 51 dB $\mu$ V/m y para el estándar DVB-T2 se establece en 42 dB $\mu$ V/m. Las relaciones de protección C/N según el origen de la señal interferente y la señal deseada se resumen en la **Tabla 16**:

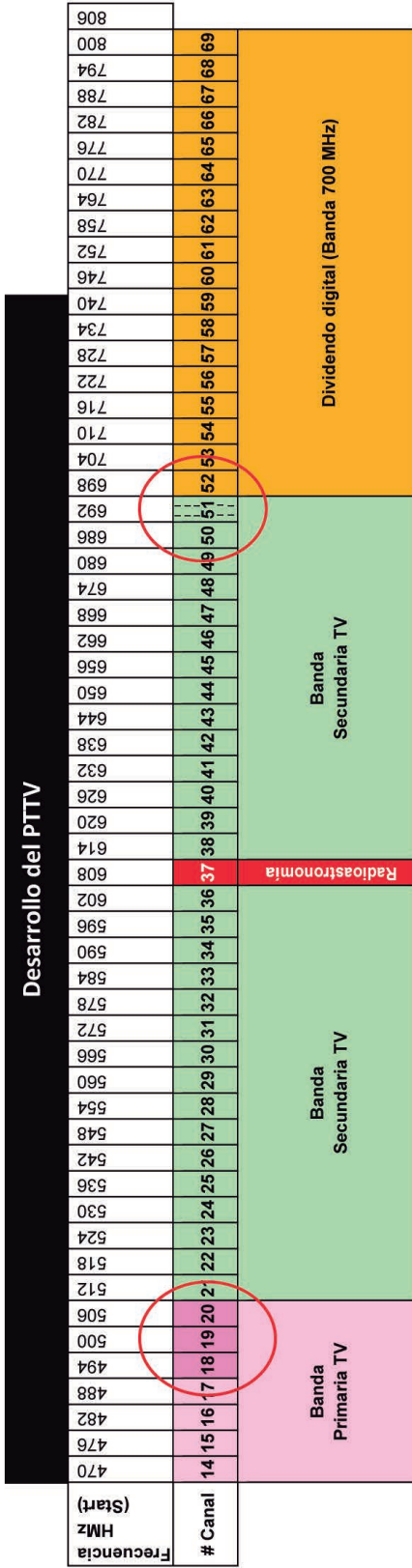
**Tabla 16.** Relaciones de protección entre servicios.

Señal deseada	Señal interferente	Relación de protección (dB)		
		Canal inferior (N-1)	Cocanal	Canal superior (N+1)
ISDB-T	DVB-T2	-26	20	-23
DVB-T2	ISDB-T	-35	20	-37

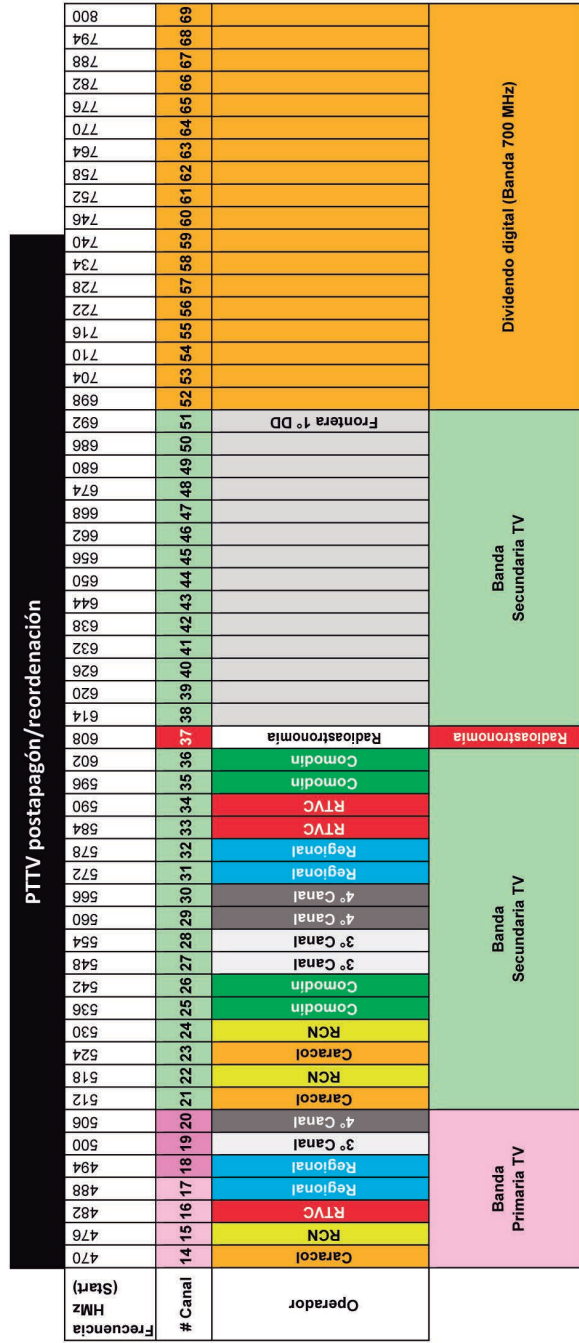
Fuente: MinTIC (2015).

**Planes de transición de televisión en Colombia.** Siguiendo las recomendaciones de la UIT, en Colombia se estructuró el plan para la liberación de los canales 52 al 69, con el fin de lograr la asignación de la banda de 700 MHz para los sistemas IMT, entre ellos LTE. Para soportar la estructuración, transición y uso de frecuencias en las bandas de televisión, en el año 2014 se definió el Plan Técnico de Televisión (PPTV), el cual fue adoptado con la Resolución 419 de 2014 de la ANE (ANE, 2014) y modificado en junio de 2016 mediante la Resolución 405 de 2016 (ANE, 2016). En la **Figura 15** se observa el desarrollo del PPTV en las fases a) simulcast y b) postapagón.





A. Simulcast



B. Postapagón

Figura 15. Desarrollo del PTTV. Fuente: (ANE, 2014).



El PTTV describe la planeación de frecuencias durante la fase denominada *multicast* (convivencia entre la televisión analógica, la televisión digital y otros sistemas) y el cronograma para el apagón analógico y la posterior reordenación de frecuencias (ANE, 2014). De este modo se pretende que para el año 2019 en Colombia se haya completado la transición total a la TDT, con posibles asignaciones de frecuencias de los canales 2 al 51 (CRC, 2013). La especificación técnica para los equipos de recepción de la señal de DVB-T2 exige que soporten las siguientes bandas de operación: VHF (54-72 MHz, 76-88 MHz, 174-216 MHz) y UHF (470 MHz-698 MHz). En la primera fase de *simulcast* se propuso maximizar el uso inicial de canales inferiores al 36 para reducir el número de resintonizaciones en la fase posterior al apagón, que comenzaría en enero del año 2020.

### Normatividad para TDT y LTE en Brasil

Dentro de la normatividad de Brasil para la regulación del estándar ISDB-T se destaca la Resolución 625 de 2013 de la *Agência Nacional de Telecomunicações* (ANATEL) (ANATEL, 2013), en la cual se definen las condiciones para la asignación del espectro en la banda de 698-806 MHz. Así mismo, está la norma ARIB STD-B31 de 2005 (ARIB, 2014) y la Recomendación UIT-R 1306-7 de 2015 (UIT, 2015), en las cuales se estipulan los parámetros que debe cumplir un sistema de transmisión ISDB-T para minimizar la interferencia a sistemas LTE.

Otra norma que se debe tener en cuenta para el caso del estándar brasileiro es la Recomendación UIT - R BT 1368 - 12 de 2014 (UIT, 2014), en la que se enuncian las relaciones de protección para señales ISDB-T interferidas por señales DVB-T2 y LTE. En la **Tabla 17** se resumen los criterios que se deben tener en cuenta para analizar estos fenómenos. Los valores de tabla aplican para un *offset* de frecuencia en la señal ISDB-T de +1.7 MHz. Si la señal no tiene *offset*, deben incrementarse los valores de los radios de protección en 1 dB. Para interferencia de canal adyacente se enuncia un valor único de -27 dB. En cuanto a las interferencias de las señales ISDB-T con LTE se enuncia que los radios de protección deben estar en los rangos establecidos en la **Tabla 18**.

**Tabla 17.** Radios de protección para interferencia cocanal para una señal ISDB-T que interfiere con una señal DVB-T2 con un canal Rice de 6 MHz de ancho de banda.

Modulación	FEC	PR (dB)	Modulación	FEC	PR (dB)
16 QAM	1/2	11	64 QAM	1/2	16
	2/3	13		2/3	19
	3/4	14		3/4	20
	5/6	15		5/6	21
	7/8	16		7/8	22

Fuente: UIT (2013).



**Tabla 18.** PR y umbrales de sobrecarga  $U_s$  para una señal ISDB-T de 6 MHz de ancho de banda que interfiere con una señal LTE EB o EU con un canal Gaussiano.

offset N/(MHz)	LTE eNB		LTE EU	
	PR (dB)	$U_s$ (dBm)	PR (dB)	$U_s$ (dBm)
Cocanal (AWGN)	20.2	-	20.2	-
Cocanal (LTE)	20.0	-	19.5	-
1/(9 MHz)	-22.5	-12.0	-4.2	-20.0
2/(15 MHz)	-34.9	-10.0	-9.8	-17.5
4/(27 MHz)	-36.2	-8.0	-32.5	-16.0
6/(39 MHz)	-37.2	0.0	-50.1	-15.5
18/(111 MHz)	-38.9	0.0	-46.9	-6.0
19/(117 MHz)	-38.9	0.0	-45.8	-7.0

Fuente: UIT (2013).

### Propagación de ondas y modelos de propagación

Los canales de radio para comunicaciones imponen limitaciones fundamentales en el funcionamiento de los sistemas de comunicación inalámbrica. El trayecto de transmisión entre un transmisor y el receptor puede variar desde un sistema con línea de vista directa hasta un trayecto que se vea gravemente obstaculizado por alguna construcción, por montañas o por el follaje de grandes árboles, lo cual hace que la potencia recibida por una antena receptora varíe notablemente dependiendo de diversos parámetros, tales como la altura de las antenas, la distancia entre ellas, la frecuencia, la potencia, el terreno e incluso la velocidad del terminal móvil, lo que impacta drásticamente el nivel de la señal que puede ser recibida (Rappaport, 2002).

Un modelo de propagación es, entonces, un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radiopropagación en un ambiente dado. Predice la pérdida que se debe a la propagación que una señal RF pueda tener entre una antena transmisora y una receptora. Los modelos de propagación tienen en cuenta aspectos como la frecuencia, la distancia, la altura de las antenas transmisoras y receptoras y sus ganancias, y el terreno donde se propaga la señal.

Los modelos de propagación para señales en VHF y UHF han sido estudiados en detalle desde los años 40. Phillips (*et al.*) presenta un estudio detallado de más de 50 modelos de propagación en bandas de VHF y UHF hasta mediados de la década del 2010. Dicho estudio presenta un árbol taxonómico de modelos y los divide en dos ramas principales, a saber: 1) modelos *a priori*, en los que un conocimiento previo debe ser considerado para la generación de dichos modelos. Esta rama contiene seis categorías principales: i) modelos teóricos y fundamentales, ii) modelos básicos, iii) modelos de terreno, iv) modelos suplementarios, v) modelos de desvanecimiento estocásticos y vi) modelos de muchos rayos; 2) modelos que deben usar mediciones asociadas a métodos de predicción y que se dividen en: i) mapeo explícito, ii) modelos particionales, iii) refinamiento heurístico inte-

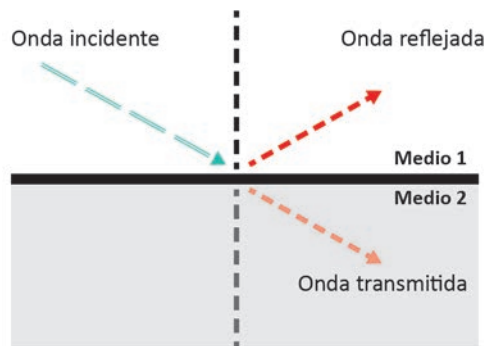


ractivo y iv) aprendizaje geoestadístico activo. En esta rama, a diferencia de los *a priori*, los modelos se consideran una metodología para predecir valores donde no hay información disponible a partir de una descripción de procedimientos para la adquisición e interpolación de datos en lugares con características similares e información conocida (Phillips, Sicher & Grunwald, 2013).

Dada la importancia de los modelos *a priori*, nos enfocaremos en los más relevantes para describir sus características.

**Principios básicos de propagación de ondas.** La propagación de las ondas electromagnéticas depende del medio por el que viajan y de su longitud de onda. Pueden atravesar varios medios y colisionar con diferentes obstáculos, lo cual produce importantes cambios en la intensidad de la señal. Por esta razón se estudian los mecanismos que impactan la propagación de las ondas, como la reflexión, difracción y dispersión (*scattering*).

**Reflexión.** La reflexión de una onda electromagnética se produce cuando una de ellas incide sobre un objeto que posee características electromagnéticas diferentes al medio de transmisión y una longitud de onda de dimensiones comparativamente más grandes que la de la señal, por lo cual se refleja en otra dirección. Las reflexiones se pueden producir por efecto de la superficie de la tierra, de las construcciones, de las paredes, entre otros. Si la onda plana incide sobre un dieléctrico perfecto, parte de la energía se transmite en un segundo medio y la parte restante de la energía es reflejada de regreso al primer medio, mientras que si el segundo medio es un conductor perfecto, toda la energía es reflejada de regreso al primer medio sin perder energía. En la **Figura 16** se aprecia cómo la energía de la onda incidente se divide en la onda reflejada y la onda transmitida al medio 2.



**Figura 16.** Reflexión de una onda en un dieléctrico.

Para el primer caso, la reflexión en un medio dieléctrico, la intensidad de campo eléctrico de la señal reflejada y transmitida depende del coeficiente de reflexión de Fresnel ( $\Gamma$ ). Este coeficiente depende a su vez de las propiedades eléctricas del material, de la polarización de onda, del ángulo de incidencia y de la frecuencia. Por su parte, las características de



un medio son la permitividad ( $\epsilon$ ), la permeabilidad ( $\mu$ ) y la conductividad ( $\sigma$ ). De lo anterior se puede determinar que la constante dieléctrica de un material está dada por la **Ecuación 4** y la permitividad, por la constante  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  multiplicada por una permitividad relativa  $\epsilon'$  dada por la conductividad y la frecuencia, tal y como se observa en la **Ecuación 5**.

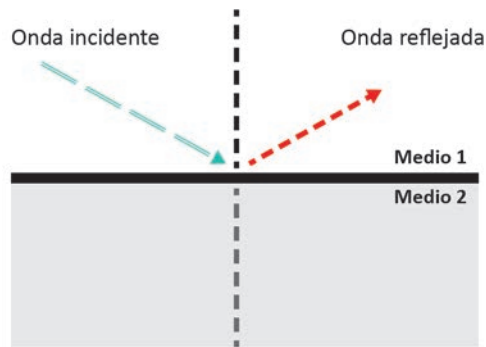
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - j\epsilon'$$

**Ecuación 4.**

$$\epsilon' = \frac{\sigma}{2\pi f}$$

**Ecuación 5.**

Para el caso de la reflexión en un medio conductor perfecto, la energía electromagnética no puede pasar a través de este, por lo que una onda plana incidente refleja toda su energía. Sin embargo, existen dos casos particulares: en el primero la señal tiene una polarización vertical respecto a un plano horizontal y en el segundo la señal tiene una polarización horizontal respecto a un plano horizontal. En realidad, este caso es una particularidad del anterior, donde toda la energía se refleja en un ángulo reflejado igual al incidente  $\theta_i = \theta_r$  y donde el campo eléctrico reflejado es igual en magnitud al incidente y su signo depende de si es de polarización vertical (transversal) o de polarización horizontal (paralela), como se observa en las **Ecuaciones 6** y **7**, respectivamente (**Figura 17**).



**Figura 17.** Reflexión de una onda en un conductor perfecto.

*Polarización vertical, donde*  $\Gamma_{\perp} = -1$   $E_i = -E_r$

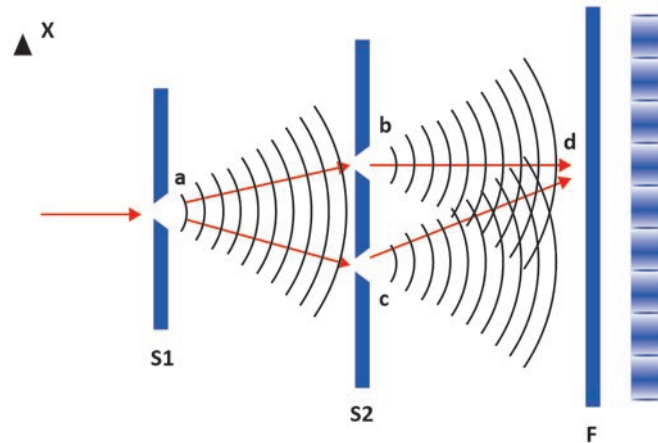
**Ecuación 6.**

*Polarización horizontal, donde*  $\Gamma_{\parallel} = +1$   $E_i = +E_r$

**Ecuación 7.**



**Difracción.** El fenómeno de difracción es explicado a través del principio de Huygens, el cual postula que todas las partes de un frente de onda tienen la propiedad de comportarse como puntos de generación de ondas secundarias, las cuales se combinan para producir un nuevo frente de onda en la dirección de la propagación. La **Figura 18** presenta un ejemplo de una onda que, al llegar a un obstáculo S1, genera un nuevo frente de ondas b y c.



**Figura 18.** Fenómeno de difracción.

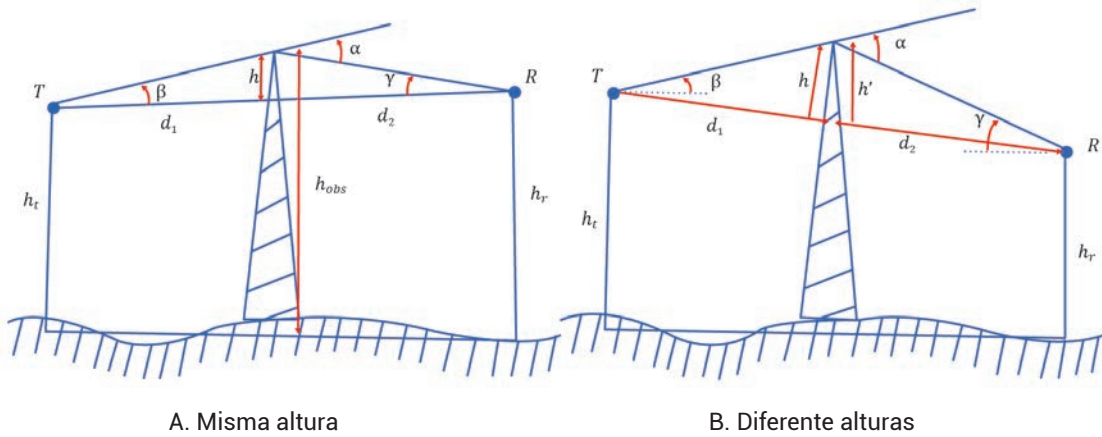
La curvatura del frente de onda está directamente relacionada con la longitud de onda y con las dimensiones del obstáculo; a medida que la longitud de onda sea mayor, mayor será la curvatura, y viceversa. De igual manera sucede con las dimensiones del obstáculo: a medida que el obstáculo sea más agudo, mayor será la curvatura (Rábanos, 1995). La difracción permite la propagación a través de la curvatura de la tierra y a través de objetos y obstrucciones. El ejemplo más claro ocurre cuando una terminal no posee línea de vista y hay un obstáculo, como un edificio, caso en el cual la difracción permite que la señal le llegue al terminal y que se “doble” en el borde del edificio en vez de atravesarlo.

**Zonas de Fresnel.** La geometría de la zona de Fresnel se define considerando un transmisor y un receptor separados por un espacio libre con un obstáculo de altura efectiva  $h$  colocado entre ellos a una distancia  $d_1$  del transmisor y  $d_2$  del receptor. La **Figura 19A** presenta esta geometría, donde se asume que  $h \ll d_1, d_2$  y  $h \gg \lambda$ .

La **Ecuación 8** describe el exceso de camino y la **Ecuación 9**, la diferencia de fase de la onda difractada, comparada con una posible señal en línea recta.

Para el caso en que los transmisores estén a una altura diferente, la **Figura 19B** presenta la geometría y la **Ecuación 10** define el ángulo de difracción entre la señal difractada y la original.





**Figura 19.** Geometría de la difracción para antenas. Fuente: Rappaport (2002).

$$\Delta \approx \frac{h^2 (d_1 + d_2)}{2 d_1 d_2}$$

**Ecuación 8.**

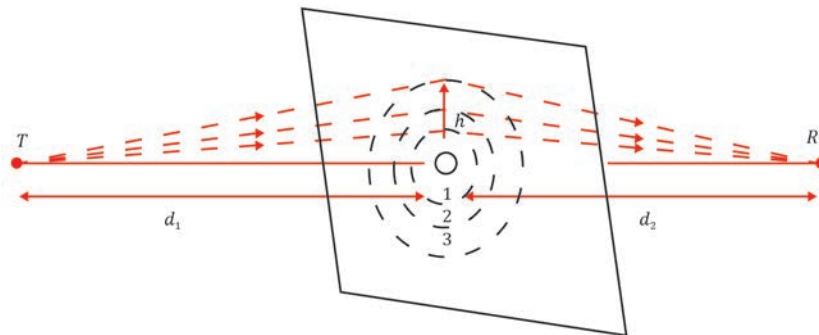
$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \approx \frac{2\pi h^2 (d_1 + d_2)}{\lambda 2 d_1 d_2}$$

**Ecuación 9.**

$$\alpha \cong h \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right)$$

**Ecuación 10.**

La **Figura 20** presenta un diagrama de las zonas de Fresnel; en las regiones sucesivas las ondas secundarias tienen una longitud de trayectoria entre el transmisor y el receptor más grande que el camino de línea de vista (LOS). Las zonas de Fresnel representan esas zonas en el plano imaginario que generan los círculos concéntricos y que, además, proveen interferencia constructiva o destructiva.



**Figura 20.** Zonas de Fresnel. Fuente: Rappaport (2002).



En la **Ecuación 11** se presenta la ecuación de los radios de las zonas de Fresnel, donde se ubican los anillos concéntricos. Esta aproximación es válida para  $d_1, d_2 \gg r_n$ . El radio más grande se presenta cuando  $d_1 = d_2$  y disminuye conforme se acerca a alguna de las antenas.

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

**Ecuación 11.**

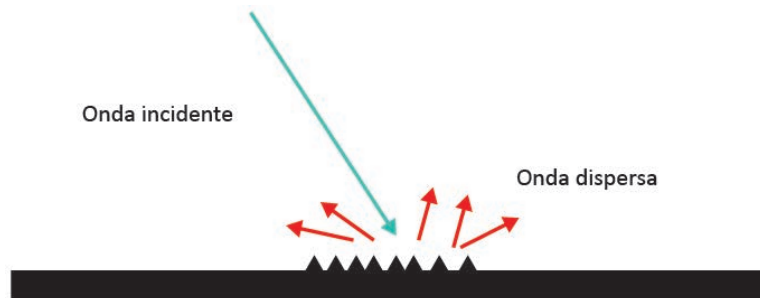
**Dispersión (scattering).** La dispersión se produce cuando la onda electromagnética incide en objetos cuyas dimensiones son del orden de su longitud de onda o inferiores. En estos casos se produce una distribución aleatoria de la energía incidente y la señal se difumina al chocar con una superficie rugosa.

Usualmente, las superficies no son completamente planas e inducen a la dispersión en la reflexión. Este proceso es homólogo a la difracción, pero debido a la relación de tamaños de las ondas y los objetos, se refleja en diversas direcciones. La **Figura 21** presenta un ejemplo descriptivo de la dispersión.

Para superficies con rugosidad a menudo se prueban utilizando el criterio de Rayleigh, que define una altura crítica de las protuberancias de superficie  $h_c$  para un ángulo incidente  $\theta_i$  que especifica la altura máxima de una protuberancia definida en la **Ecuación 12**.

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i}$$

**Ecuación 12.**



**Figura 21.** Efecto de la dispersión.

Se considera una superficie suave si sus diferencias entre protuberancias y valles es menor que  $h_c$ , y se considera áspera si la protuberancia es mayor que  $h_c$ . En el caso de las superficies rugosas, el coeficiente de reflexión de la superficie plana debe ser multiplicado por un factor de pérdida de dispersión  $\rho_s$ , para tener en cuenta el campo reflejado disminuido. Se asume que la altura de la superficie  $h$  es una distribución gaussiana variable aleatoria con una media local y se define a  $\rho_s$  en la **Ecuación 13**, donde  $\sigma_h$  es la desviación estándar de la altura de la superficie sobre la altura media de superficie (Rappaport, 2002).





$$\rho_s = \exp \left[ -8 \left( \frac{\pi \sigma_h \text{sen} \theta_i}{\nu} \right)^2 \right]$$

**Ecuación 13.**

**Link Budget.** El *Link Budget* o cálculo de pérdidas es un presupuesto de todas las ganancias y pérdidas en un sistema de transmisión. En este cálculo se determinan los requerimientos de energía necesarios para realizar un enlace punto a punto de manera satisfactoria. Los parámetros de un *Link Budget* se definen en la **Tabla 19**, mientras la **Ecuación 14** define la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida, la cual está dada por las ganancias entre las antenas, las pérdidas entre los cables y la pérdida en la trayectoria de propagación. Este último parámetro es el que más depende de los mecanismos de propagación descritos en la anterior sección y es el que se define en los modelos de propagación.

$$P_{Tx}[dBm] - Pe_{Tx}[dB] + G_{Tx}[dBi] - L[dB] + G_{Rx}[dBi] - Pe_{Rx}[dB] \\ = \text{Margen} - Se_{recep}[dBm] = P_{Rx}[dBm]$$

**Ecuación 14.**

**Tabla 19.** Descripción parámetros ecuación *Link Budget*.

Parámetro	Descripción
$P_{Tx}$	Potencia transmitida
$Pe_{Tx}$	Pérdida en el cable transmisor
$G_{Tx}$	Ganancia de antena transmisora
$L$	Pérdida en la trayectoria
$G_{Rx}$	Ganancia de antena receptora
$Pe_{Rx}$	Pérdida en cable receptor
$Se_{recep}$	Sensibilidad del receptor
$P_{Rx}$	Potencia recibida

Fuente: Rappaport (2002).

Los modelos de propagación se pueden dividir en dos categorías: i) modelos determinísticos y ii) modelos empíricos. Los determinísticos definen el valor de las pérdidas a partir de la teoría electromagnética y se caracterizan por ser muy teóricos y no tener en cuenta aspectos del terreno donde se transmite la señal. Por su parte, los empíricos o estadísticos se basan en mediciones para la estimación de propagación de señales radioeléctricas y se enfocan en la aproximación del valor medio de la señal de potencia o campo eléctrico recibido en una trayectoria con condiciones particulares. Los modelos empíricos tienen en cuenta, mediante procesos de aproximación, los efectos generados por la zona donde se aplica, tales como edificios, bosques, curvaturas de la tierra y tipos de terrenos.



**Modelos de propagación teóricos y fundamentales.** Dentro de estos modelos fueron considerados los de espacio libre, plano de tierra y *Log-Distance*, así como la Recomendación P525.

**Modelo de espacio libre.** Está definido por la teoría básica de propagación de ondas electromagnéticas y se basa en las ecuaciones de Maxwell. Este modelo es utilizado para predecir la potencia de la señal cuando existe una línea de vista entre un transmisor isotrópico y un receptor, y no involucra ningún impacto del terreno o zona donde se propaga la señal. El modelo de espacio libre se define a través de la **Ecuación 15** (Beltrán, Fermín & Hernández, 2012) donde sus pérdidas relacionadas con el *Link Budget*, se definen en la **Ecuación 16**, donde la longitud de onda y la distancia están en metros; además, la definición de los parámetros se sintetiza en la **Tabla 20**.

$$P_{Rx}(d) = \frac{P_{Tx}G_{Tx}G_{Rx}\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

**Ecuación 15.**

$$L_{FreeSpace}[dB] = G_{Tx}[dBi] + G_{Rx}[dBi] + 20 \log(\lambda) - 20 \log(d) - 2.198$$

**Ecuación 16.**

**Tabla 20.** Descripción de parámetros del modelo de espacio libre.

Parámetro	Descripción
$P_{Rx}$	Potencia recibida
$P_{Tx}$	Potencia transmitida
$G_{Tx}$	Ganancia de antena transmisora
$G_{Rx}$	Ganancia de la antena receptora
$\lambda$	Longitud de onda en metros
$d$	La distancia de separación de Tx-Rx en metros
$L$	Pérdidas no asignadas a la propagación

Fuente: Cuevas (2009).

**Modelo de plano de tierra.** Cuando la onda de radio se propaga cerca del suelo con una línea de vista (LOS), la pérdida de trayectoria puede describirse mejor por el modelo de pérdidas de trayecto en el plano de tierra (PE) que por el de espacio libre. El modelo de pérdidas de trayecto PE incluye los efectos de la difracción y la reflexión en el suelo y se describe en la **Ecuación 17**; sus parámetros se relacionan en la **Tabla 21**.

$$L_{PE}(dB) = 40 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_T) - 20 \log_{10}(h_R)$$

**Ecuación 17.**



**Tabla 21.** Parámetros modelo pérdida de trayecto en el plano tierra.

Características	Descripción
$d$	Distancia entre el transmisor isotrópico y la antena receptora en metros
$h_T$	Altura de la antena transmisora en metros
$h_R$	Altura de la antena receptora en metros

Fuente: Song Meng, Hui Lee & Chong Ng (2009).

**Modelo Log-Distance.** Los modelos teóricos indican que el promedio de la potencia de la señal recibida decrece logarítmicamente con la distancia. El promedio, a gran escala, de pérdidas de trayectoria es expresado como una función de la distancia usando el exponente  $n$  de pérdidas de trayectoria. Las **Ecuaciones 18** y **19** describen la relación de pérdidas, donde  $d_0$  es la distancia cercana de un transmisor. La **Tabla 22** describe los parámetros del modelo *Log-Distance* y la **Tabla 23** presenta el factor  $n$ , que varía según el entorno en que se están evaluando las pérdidas, así como los parámetros y sus valores típicos (Cuevas, 2009).

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n$$

**Ecuación 18.**

$$\overline{L}_{Logdistance}(dB) = \bar{L}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

**Ecuación 19.**

**Tabla 22.** Descripción de parámetros ecuación *Log-Distance*.

Parámetro	Descripción
$n$	Exponente de pérdidas indica la tasa en que las pérdidas se incrementan con la distancia
$d_0$	Distancia cercana de referencia la cual se determina por medidas próximas al emisor
$d$	Distancia entre transmisor-receptor

Fuente: Cuevas (2009).

**Tabla 23.** Descripción del parámetro  $n$  en la ecuación *Log-Distance*.

Ambiente	$n$
Espacio libre	2
Área urbana de radio celular	2.7 a 3.5
Urbana con sombras ( <i>shadowed</i> ) radio celular	3 a 5
Edificios con línea de vista (LOS)	1.6 a 1.8
Obstruidas en edificios	4 a 6
Obstruidas en fábricas	2 a 3

Fuente: Cuevas (2009).



**Recomendación UIT-R P525.** Está enfocada en los enlaces punto a multipunto o punto a punto en una zona de servicio donde no se consideran efectos externos que afecten la propagación. Para el caso de un enlace punto a punto es preferible calcular la atenuación en el espacio libre entre antenas isotrópicas, denominada también pérdida básica de transmisión en el espacio libre (descrita en las **Ecuaciones 20 y 21**), donde la primera está en función de la longitud de onda y la segunda en función de la frecuencia (MHz) y la distancia (km). La **Tabla 24** describe los parámetros del enlace.

$$L_{bf} = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

**Ecuación 20.**

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log (f) + 20 \log (d) \quad (dB)$$

**Ecuación 21.**

**Tabla 24.** Descripción de parámetros enlace punto a punto.

Características	Descripción
$L_{bf}$	Pérdida básica de transmisión en el espacio libre (dB)
$d$	Distancia en km
$\lambda$	Longitud de onda
$d$ y $\lambda$	Se expresan en las mismas unidades

Fuente: UIT-R (1994).

**Modelos de propagación básicos y estocásticos.** Constituyen una de las categorías más abundantes de acuerdo con la taxonomía de Phillips. Se basan en un desarrollo computacional y una correlación de un camino sencillo entre el transmisor y el receptor, donde se tienen en cuenta variables como la frecuencia, la distancia, la altura de antenas y el terreno. Dentro de los modelos básicos se encuentran dos categorías: los determinísticos y los estocásticos; estos últimos se caracterizan por ser modelos basados en mediciones exhaustivas de campo que incorporan las variaciones estocásticas de los diversos parámetros que afectan la propagación y las pérdidas. Ejemplos de estos últimos son Egli Model, Gree-Obaidat, Edwards-Drunkin, Blomquist-Ladell, Allsebrook-Parson, de Souza-Lins, TM90, Walfisch-Bertoni, Walfisch-Ikegami, ERCEG, IMT-200 y, el más conocido, Okumura-Hata, que incluye variaciones como ECC-33, Hata-Davison, COST-231, Extended Hata y Rural-Hata, entre otras. A continuación se presentan los modelos más representativos: el Okumura, con su modificación Hata, y el COST 231.

**Modelo Okumura.** Okumura desplegó una serie de mediciones de campo y con algunos ajustes desarrolló unas curvas que entregan la atenuación relativa al espacio libre para una



zona urbana sobre terreno casi plano. Las mediciones fueron realizadas usando antenas verticales y omnidireccionales, tanto en la estación base como en el móvil. En la **Ecuación 22** se describe el modelo de pérdidas, que tiene un rango de operación de entre 150 MHz y 3 GHz, con una altura de las antenas de entre 30 y 1000 metros y una distancia entre ellas de 1 a 100 Km. La **Tabla 25** describe los parámetros del modelo Okumura (Bordón López, Quintana & Montejo Sánchez, 2012).

$$L_{50}(dB) = Lf + A_{mu}(f, d) - G(h_{tx}) - G(h_{rx}) - G_{area}$$

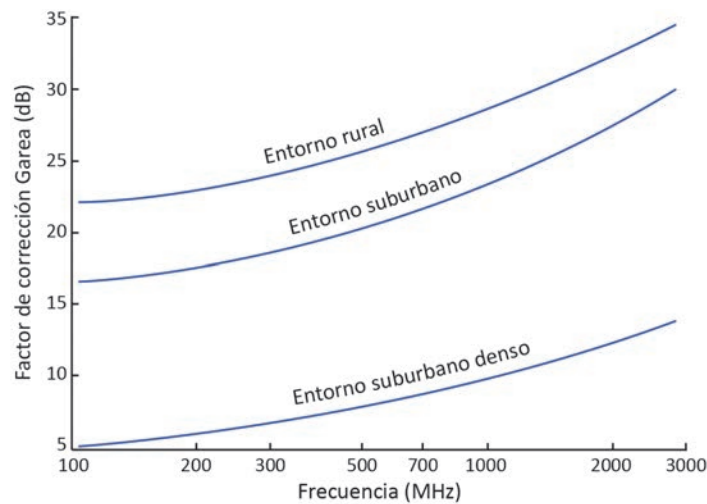
**Ecuación 22.**

**Tabla 25.** Descripción de parámetros del modelo de Okumura.

Parámetro	Descripción	
$L_{50}$	Atenuación mediana por trayectoria	
$Lf$	Atenuación de espacio libre	
$A_{mu}(f, d)$	Atenuación relativa promedio	
$G(h_{tx})$	Ganancia de altura de la antena de Tx	
$G(h_{rx})$	Ganancia de altura de la antena de Rx	
$G_{area}$	Ganancia debido al tipo de ambiente	
$G(h_{tx})$ y $G(h_{rx})$	$G(h_{tx}) = 20 \log(h_{tx}/200)$	$30m \leq h_{tx} \leq 1000 m$
	$G(h_{rx}) = \begin{cases} 10 \log(h_{rx}/3) \\ 20 \log(h_{rx}/3) \end{cases}$	$h_{rx} \leq 3 m$ $3 m < h_{rx} \leq 10 m$

Fuente: Bordón López, Quintana & Montejo Sánchez (2012).

La **Figura 22** muestra el factor de corrección  $G_{area}$  para entornos diferentes al urbano.



**Figura 22.** Factor de corrección dependiente del entorno para el modelo Okumura. Fuente: Bordón López, Quintana & Montejo Sánchez (2012).



**Modelo Hata.** Es una formulación empírica de los datos de pérdida de propagación provistos por Okumura. La **Ecuación 23** describe el modelo de pérdidas de Hata, el cual opera entre los 150 y 1500 MHz, con distancias de 1 a 20 km y alturas de las antenas de transmisión de entre 30 y 200 metros y de recepción de entre 1 y 10 metros (Pedraza, 2010).

$$\begin{aligned}
 L_{50}(\text{urbano})(dB) &= 69.55 \\
 &+ 26.16 \log(f_c) \\
 &- 13.82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{te})) \log(d)
 \end{aligned}$$

**Ecuación 23.**

Hata introduce una nueva variable  $a(h_{re})$ , que es el factor de corrección por altura efectiva del móvil, el cual depende de la zona de cobertura. El valor de  $a(h_{re})$  para ciudades pequeñas, medianas y grandes se presenta en las **Ecuaciones 24** y **25**, respectivamente. Mientras que la **Ecuación 26** presenta un factor de suma que se adiciona a la **Ecuación 23** para los escenarios suburbano y rural.

$$a(h_{re}) = (1.1 \log(f_c) - 0.7) * h_{re} - (1.56 \log(f_c) - 0.8)$$

**Ecuación 24.**

$$a(h_{re}) = \begin{cases} 8.29 * (\log 1.54 h_{re})^2 - 1.1 & f_c < 300\text{MHz} \\ 3.20 * (\log 11.75 h_{re})^2 - 4.97 & f_c \geq 300\text{MHz} \end{cases}$$

**Ecuación 25.**

$$\text{Factor} = \begin{cases} -2 * [\log(f_c/28)]^2 - 5.4 & \text{Suburbano} \\ -4.78 * (\log f_c)^2 + 18.33 * \log(f_c) - 40.94 & \text{Rural} \end{cases}$$

**Ecuación 26.**

**Modelo COST 231.** La Cooperación Europea para Investigación Científica y Técnica (Euro-COST) desarrolló este modelo, el cual se basa en el modelo Hata y se extiende hasta el rango de los 2 GHz cubriendo la banda de VHF y UHF. La **Ecuación 27** presenta el modelo de pérdidas ajustado por COST.

$$L(dB) = 46.3 + 33.9 \log(f_c) - 13.82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log(h_{te})) \log(d) + C_M$$

**Ecuación 27.**

Adicionalmente, el modelo COST 231 introduce el factor  $C_M$ , que es un factor de corrección para adecuar el modelo para ciudades medianas y áreas suburbanas o centros metropolitanos con valores de 0 dB o 3 dB, respectivamente. Este modelo opera entre los 150 MHz y



2 GHz, con distancias entre 1 y 20 km, alturas de transmisión de entre 30 y 200 metros y de recepción de entre 1 y 10 metros. El valor  $a(h_{re})$  es el mismo que en el Hata (Pedraza, 2010).

**Implicación de la vegetación en modelos de propagación.** Existen algunos estudios que introducen las implicaciones de la vegetación, los bosques y demás elementos que modifican la propagación a través de estos espacios en las zonas tropicales. La propagación a través de la vegetación se puede modelar a partir de la transmisión de la señal por difracción sobre la copa de los árboles, a través de los mismos árboles o por reflexión en un túnel entre la parte inferior de la copa de los árboles y el piso.

**Modelados matemáticos.** La Recomendación UIT-R P.833-9 presenta una formulación compleja del modelado de la obstrucción de los bosques y vegetación caracterizada por lo siguiente: i) tasa de atenuación específica del bosque [dB/m] y ii) máxima atenuación total [dB] dentro de la vegetación. La primera define la tasa en la cual la energía propagada se pierde debido a las pérdidas por ramas, troncos, hojas y demás impedimentos de los bosques. La segunda define la máxima atenuación que puede presentar la vegetación antes de que la energía y la señal proveniente de otros caminos se conviertan en la señal predominante (UIT, 2016). En la **Ecuación 28**,  $d$  es la distancia dentro de la vegetación,  $\gamma$  es la atenuación específica y  $A_m$  es la máxima atenuación para un tipo particular de vegetación.

$$A_{ev} = A_m \left( 1 - \exp \left( -d * \gamma / A_m \right) \right)$$

**Ecuación 28.**

Adicionalmente, Torico (Torico, Bertoni & Lang, 1998) presenta un modelo matemático en el que los árboles son considerados como cilindros y las hojas discos para caracterizar y modelar la atenuación específica ( $\gamma$ ) para diversas polarizaciones y calcula las pérdidas por propagación relativas al modelo de espacio libre cuando hay árboles en la línea de vista.

Con base en la Recomendación UIT-R P.833-9, los modelos de propagación son contruidos a partir de las **Ecuaciones 29 y 30** simplificadas mostradas a continuación, donde  $f$  es la frecuencia en MHz,  $d$  es la distancia del camino dentro de la vegetación en metros y  $\theta$  es el ángulo de elevación del rayo directivo. Los valores de A, B, C, D, E y G deben ser hallados de manera empírica.

$$L_{PerdidaTotal} = L_{PlanoTierra} + L_{Vegetacion}$$

**Ecuación 29.**

$$L_{Vegetacion} = A * f^B * d^C * (\theta + E)^G$$

**Ecuación 30.**





**Modelo Weissberger.** El modelo de decaimiento exponencial modificado de Weissberger es aplicable en casos en los que la línea de vista esté bloqueada por una densa arborización de hojas secas, como ocurre en climas templados. Es aplicado en situaciones en las que la propagación se produce a través de un bosque de árboles en lugar de la difracción sobre la copa de los árboles. En la **Ecuación 31** se describe el modelo de pérdidas de Weissberger, el cual considera dos situaciones particulares: i) cuando la propagación se realiza en zona boscosa de menos de 14 metros de altura y ii) cuando el tamaño de la zona boscosa está entre 14 y 400 metros. Para ambos casos el modelo es válido desde 230 MHz a 95 GHz (Weissberger, 1981).

$$L_w(dB) = \begin{cases} 1.33 * f^{0.284} d^{0.588} & 14 m < d \leq 400 m \\ 0.45 * f^{0.284} d & 0 m \leq d < 14 m \end{cases}$$

**Ecuación 31.**

**Modelo COST 235.** Fue propuesto con base en las mediciones realizadas en las frecuencias de ondas milimétricas (9.6 a 57.6 GHz) a través de un pequeño ( $d < 200$  m) bosque de árboles; sin embargo, es perfectamente ajustable a las bandas de VHF y UHF. La **Ecuación 32** representa el modelo y considera los bosques con hojas o sin hojas, según las estaciones de verano o invierno (COST, 1996).

$$L_{Cost235}(dB) = \begin{cases} 26.6 * f^{-0.2} d^{0.5} & Sin\ hojas \\ 15.6 * f^{-0.009} d^{0.26} & Con\ hojas \end{cases}$$

**Ecuación 32.**

**Modelo FITU.** Para el modelo FITU (*Fitted ITU*) los datos fueron recolectados durante dos estados de foliación, con hojas y sin hojas, en un rango de frecuencia de 11.2 y 20 GHz. No obstante, al igual que el modelo COST 235, es ajustable a las bandas de VHF. Las pérdidas del modelo se describen en la **Ecuación 33** (Al-Nuamimi & Stephens, 1998).

$$L_{FITU-R}(dB) = \begin{cases} 0.37 * f^{0.18} d^{0.59} & Sin\ hojas \\ 0.39 * f^{0.39} d^{0.25} & Con\ hojas \end{cases}$$

**Ecuación 33.**

**Modelo Nanyang.** El modelo de la Universidad de Nanyang (Indonesia) realiza un estudio y un ajuste a los modelos de follaje descritos previamente y concluye que todos los sistemas de pérdidas están determinados por la **Ecuación 34**. En esta ecuación se define que las pérdidas son producto de una constante de atenuación A, la frecuencia elevada a un coeficiente B, multiplicados por la distancia y por otro coeficiente C. Dicha expresión



intenta modelar la propagación de las ondas de radio en bosques, teniendo en cuenta el efecto de la onda lateral, bajo el supuesto de una perfecta reflexión en el plano de la tierra (Song Meng, Hui Lee & Chong Ng, 2009).

$$L_{forest}(dB) = A * f^B * d^C + 40 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(h_T) - 20 \log_{10}(h_R)$$

**Ecuación 34.**

Los tres valores numéricos A, B, y C se calculan utilizando el ajuste de error cuadrado en los datos medidos y sus resultados son 0.48, 0.43, y 0.13, respectivamente. Es decir que con el aumento de la frecuencia y la profundidad de los bosques la pérdida de trayectoria se incrementa. Por lo tanto, la **Ecuación 35** describe el modelo de pérdida en exceso de follaje incluyendo el efecto de la onda lateral, como lo plantea el modelo lateral UIT-R (LITU-R), que puede ser utilizado para la propagación de largo alcance en áreas de follaje en la banda de VHF.

$$L_{Nanyang}(dB) \cong 0.48 * f^{0.43} d^{0.13}$$

**Ecuación 35.**



## Capítulo 4. Estudios de coexistencia y buenas prácticas para bandas inferiores a 1 GHz



Con el objeto de aprovechar al máximo el dividendo digital para su uso en el desarrollo de las comunicaciones móviles de 4G, en conjunto con otros servicios de telecomunicaciones, muchos países se han enfocado en realizar estudios sobre la convivencia de los servicios de TDT y LTE, así como en el desarrollo de metodologías para evitar interferencias tanto en los países como en sus zonas fronterizas.

### **Análisis de recomendaciones, metodologías y buenas prácticas para el estudio de la coexistencia de servicios**

Dentro del acopio de información realizada para analizar los temas de la coexistencia de los servicios de TDT y LTE se encontraron varios documentos y recomendaciones importantes de la UIT y la CITELE, así como algunas cartas de intención de la FCC, lo cual se resume en los siguientes ítems.

**Recomendaciones y reportes de la UIT y el ETSI.** En 1995 la UIT publicó la Recomendación UIT-R SM 1049-1, la cual expone un método de gestión del espectro que facilita el proceso de asignación de frecuencias a estaciones de servicios terrenales en zonas fronterizas. Sugiere crear zonas de coordinación a través de acuerdos bilaterales o multilaterales entre las administraciones que compartan sus fronteras (UIT, 1995) y establece que dentro del acuerdo se tengan en cuenta como mínimo los siguientes aspectos:

- Gama o gamas de frecuencias que debe cubrir el acuerdo.
- Anchura de banda del servicio autorizada.
- Sistema de modulación.
- Altura efectiva de antena.
- Limitación de la zona de servicio de los transmisores a la superficie necesaria que debe cubrirse.
- Información pertinente que debe intercambiarse; por ejemplo, zona de servicio, etc.
- Método para cotejar, normalizar e intercambiar información.
- Método para identificar las estaciones que necesitan coordinación.
- Punto del proceso en el que se efectúa la coordinación.

Así mismo, se sugieren las siguientes opciones de compartición de frecuencias:

- **Frecuencias adjudicadas.** Frecuencias asignadas a una administración individual de forma exclusiva o preferente que pueden ser a su vez asignadas por dicha adminis-



tración sin coordinación previa, siempre que se satisfagan las características técnicas establecidas por un acuerdo precedente.

- **Frecuencias compartidas.** Frecuencias que pueden compartir las administraciones sin coordinación previa, siempre que se satisfagan las características técnicas establecidas por un acuerdo precedente.
- **Frecuencias coordinadas.** Frecuencias que pueden asignarse únicamente tras llevar a cabo con éxito el proceso de coordinación.
- **Frecuencias adjudicadas utilizadas sobre la base de planes de redes geográficos.** Frecuencias (por ejemplo, de planes de adjudicación celular o de radiodifusión) utilizadas en los países interesados sobre la base de un plan de redes geográfico preparado y adoptado anteriormente, teniendo en cuenta las características técnicas establecidas en el plan.

Este documento contiene algunos modelos de acuerdos para la asignación de frecuencias a estaciones de servicios terrenales en zonas fronterizas que pueden servir como ejemplo a las administraciones para la creación de sus propios acuerdos. De los casos consignados en la Recomendación UIT-R SM 1049-1, se analizó con detenimiento el Acuerdo de Viena, suscrito en 1993 por 14 países de la Unión Europea para la coordinación de frecuencias de los servicios fijo y móvil terrestre.

Por otro lado, en el Reporte UIT-R BT 2215-6 de 2016 se describe una metodología para la medida de los radios de protección en los receptores de TDT. La **Figura 23** muestra el esquema para realizar un test de prueba según dicha recomendación; en esta se puede observar que es necesario insertar un filtro pasa-banda entre el generador de la señal interferente y el multiplexador o MUX con el objetivo de eliminar el ruido generado por la señal interferente. Si este ruido no se reduce, es muy difícil tomar una medida precisa de los niveles de protección (UIT, 2016).

El método utilizado para determinar las relaciones de protección y los umbrales de sobrecarga se compone de dos pasos:

- La relación de protección del receptor se obtiene restando  $I$  (potencia de la señal interferente) a partir de la curva  $S/I$  en cualquier punto de esta línea. La relación de protección obtenida puede ser utilizada para todos los niveles de la señal deseada.
- Una fuerte desviación de la curva medida  $S/I$  de la línea recta con pendiente unitaria indica el lugar donde la señal interferente alcanza el umbral de sobrecarga, es decir, la aparición de un comportamiento no lineal fuerte. El segmento desviado de la curva  $S/I$  se aproxima por una vertical al eje  $I$ . El valor de  $I$  en el punto de intersección entre la línea recta con pendiente unidad y la línea vertical del eje de  $I$  se considera que es el umbral de sobrecarga receptor.



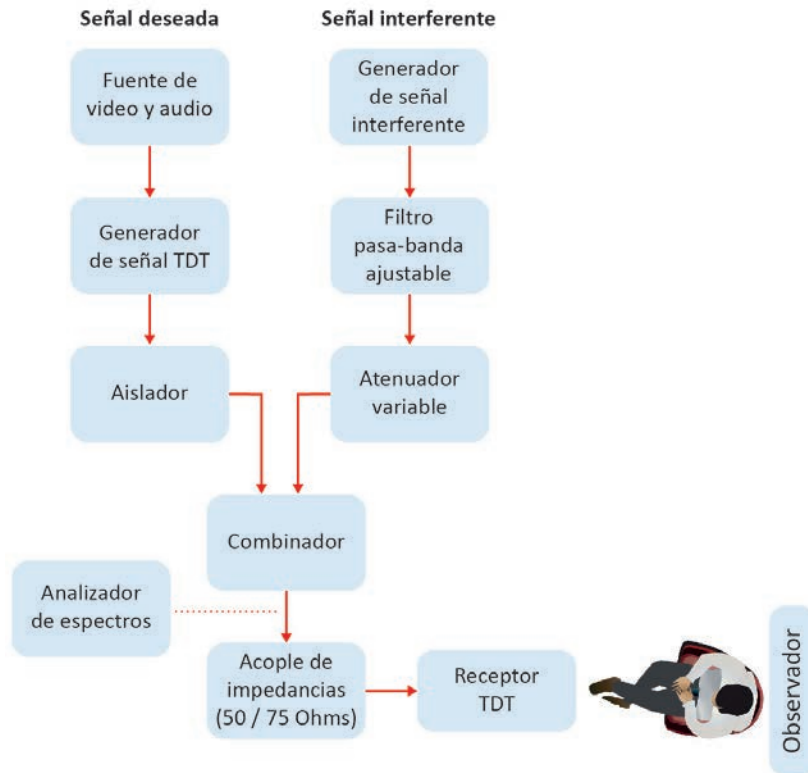


Figura 23. Esquema para realizar un test de prueba. Fuente: (UIT, 2016).

En la búsqueda bibliográfica, relacionada en la **Tabla 3**, se encontró abundante material de la UIT y el ETSI, con información que puede ser extrapolada para realizar el estudio de la coexistencia de las señales TDT y LTE en la banda de 614-698 MHz.

**Recomendaciones y documentos de la CITEI.** En el documento 3339 de la CITEI, de la XXII Reunión del CCP.III de noviembre de 2013 sobre *cooperación y convergencia entre servicios de radiodifusión y servicios móviles usando redes LTE*, se demostró que las redes de televisión digital y las redes LTE son complementarias y pueden ser usadas en cooperación de manera eficaz (CITEI, 2013).

En el informe final de la XXIII Reunión del Comité Consultivo Permanente II: Radiocomunicaciones (CCP.II), realizada en Cartagena en marzo de 2014 (documento 3597 de la CITEI), se incluyeron las "directrices para la armonización de los procedimientos de medición en la comprobación técnica del uso del espectro para coordinación en zonas de frontera", junto con un anexo que incluye: a) los términos y definiciones, b) la planeación y preingeniería para la comprobación técnica del uso del espectro y c) la ejecución de la comprobación técnica del uso de este. Dicho documento contiene, además, la publicación de los siguientes estudios de compatibilidad de radiodifusión de televisión digital terrestre y los sistemas móviles terrenales en la banda 698-806 MHz (CITEI, 2014):



- **Documento CCP.II-RADIO/doc. 3545/14.** Resultados del estudio "Técnicas para convivencia de servicios TDT DVB-T2 con servicios IMT y servicios de voz convencional", realizado por la administración de Colombia, en el que se implementó una metodología para evaluar la interferencia de servicios LTE sobre TDT compuesta por tres fases, basadas en simulaciones mediante el uso de las herramientas computacionales de planificación como SEAMCAT e ICS Telecom. En la primera fase se utilizó SEAMCAT para desarrollar simulaciones iniciales. La segunda fase consistió en simular diferentes escenarios con el *software* ICS Telecom, el cual se basa en información cartográfica que permite modelar las redes en un entorno más realista. La tercera fase fue la entrega de resultados y la comparación entre las dos herramientas de simulación. Este estudio concluyó que la mayor interferencia se produce de un sistema LTE a un terminal TDT.
- **Documento CCP.II-RADIO/doc. 3512/14.** "Informe sobre las pruebas de laboratorio pertinente a la interferencia en la banda ancha móvil LTE de la banda 700 MHz hacia la TV digital en la banda de 470-698 MHz", presentado por ABERT como resultado del Grupo de Discusión de la Comunidad Virtual de la CITEC sobre el Espectro.

De igual forma, la Declaración CITEC 3807 de 2015 contiene las directrices para la armonización de los procedimientos de medición en la comprobación técnica del uso del espectro para la coordinación en zonas de frontera, con el objetivo de que los países involucrados puedan identificar y solucionar los problemas de interferencia de la mejor manera posible. En este documento se redactan las pautas para llevar a cabo los procedimientos de medición que permitan comprobar el uso del espectro en las zonas fronterizas. Así mismo, se recomienda que las administraciones que comparten fronteras comunes incluyan procedimientos para identificar problemas de interferencia como parte de sus procesos de coordinación (CITEC, 2015).

De igual forma, en el Documento CCP.II-RADIO/doc. 3648/14 de la XXIV Reunión del Comité Consultivo Permanente, realizada en septiembre de 2014 en Mérida (México), se incluyen los resultados de los "Estudios de convivencia entre el sistema brasileño de TV digital y LTE en la banda de 700". La metodología para obtener los cálculos teóricos y simulaciones utilizó el sistema *Multi Coupling Loss* (MCL) y el método Montecarlo. Los cálculos MCL fueron obtenidos tomando en consideración diferentes distancias de separación entre los transmisores interferentes y los receptores afectados. Para el caso de mayor interferencia, que se da cuando las antenas están una frente a la otra, los cálculos fueron realizados siguiendo el modelo de espacio libre, el modelo de Okumura-Hata para distancias superiores a 1 km y el modelo de *Okumura-Hata Short Range Distance* (SRD) para distancias inferiores a 1 km (CITEC, 2014).

La simulación Montecarlo permite recrear un ambiente más real considerando la aleatoriedad de posición entre los transmisores interferentes y los receptores afectados, lo que permite verificar mejor la cantidad de casos afectados por interferencias. Para el estudio brasileño fueron usadas las configuraciones que se muestran en las **Figuras 24, 25 y 26**.



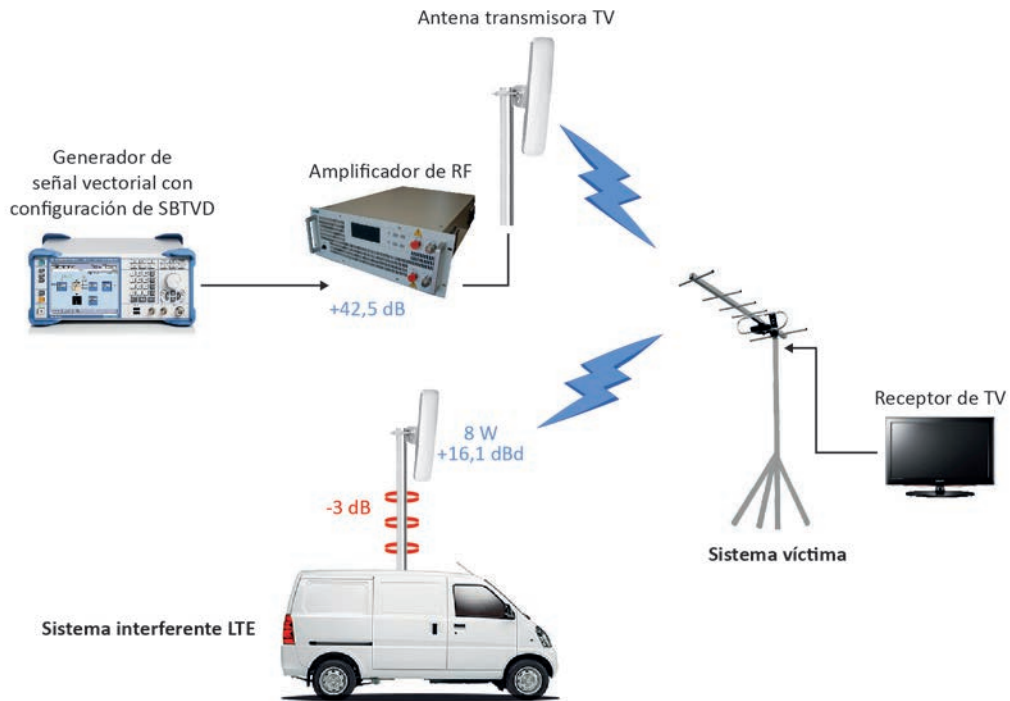


Figura 24. Caso de prueba para medición de interferencia de LTE sobre el sistema SBTVD (UE dentro de la Van). Fuente: (CITEL, 2014).

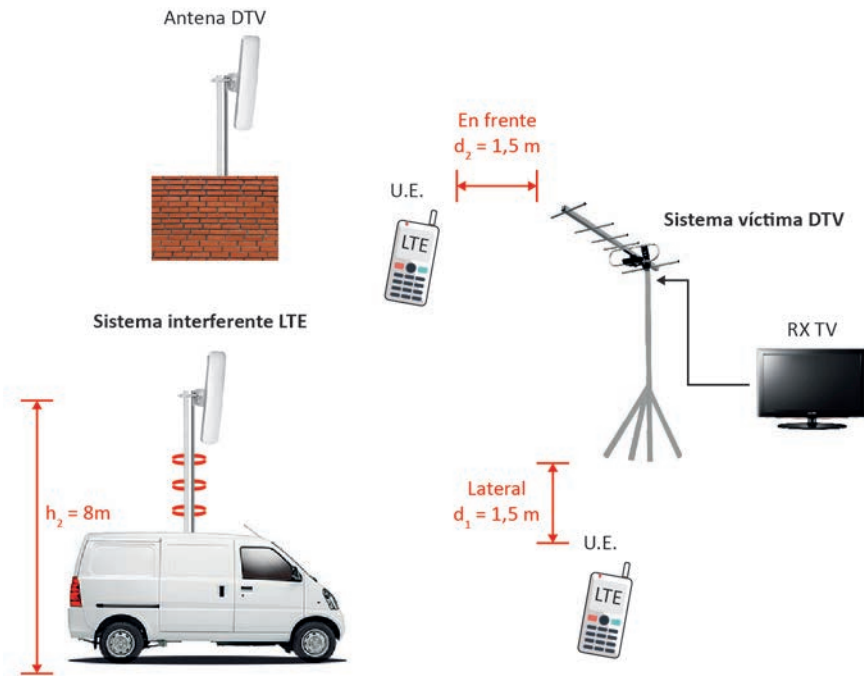
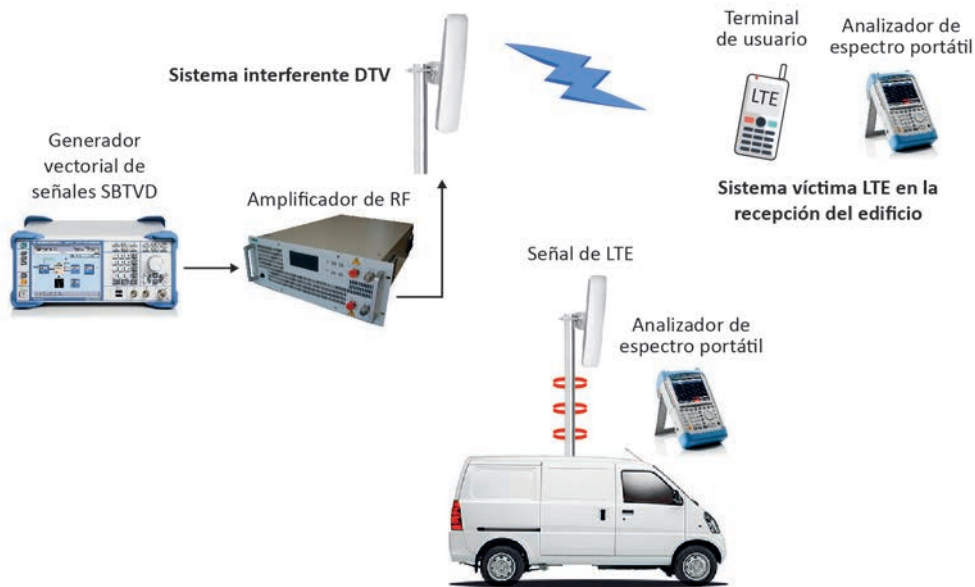


Figura 25. Caso de prueba para medición de interferencia de LTE sobre el sistema SBTVD (UE fuera de la Van). Fuente: (CITEL, 2014).







**Figura 26.** Caso de prueba para medición de interferencia de SBTVD sobre LTE (UE dentro de edificio). Fuente: (CITEL, 2014).

Otros documentos de la CITEL analizados, relacionados con la compatibilidad de los servicios de TDT y las comunicaciones móviles en la banda de 700 MHz, fueron los 3702, 3661 y 3635 de 2014.

**Buenas prácticas para la coexistencia de servicios en la banda de 600 MHz.** Estados Unidos, en cabeza de la *Federal Communications Commission (FCC)*, es uno de los países pioneros en la gestión del espectro para servicios móviles y actualmente realiza procesos de liberación de la banda de 600 MHz para el despliegue de los servicios IMT. Con una visión futurista, ha iniciado procesos de coordinación en sus fronteras con Canadá y México para evitar la interferencia y promover la coexistencia armoniosa de los servicios de TDT y LTE. Para esto ha suscrito sendas cartas de intención, en las cuales se incluyen los conceptos de subasta de incentivos y *clearing target*, entre otros.

**Carta de intención de la FCC con el Departamento de Industria Canadiense.** La carta de intención entre la FCC e *Industry Canada* busca la armonización del espectro radioeléctrico en la banda de 600 MHz, particularmente en la frontera entre Estados Unidos y Canadá, para su uso en la prestación de servicios de telefonía móvil posterior a una reorganización de las bandas usadas por la radiodifusión televisiva. Los aspectos más relevantes de esta carta, y que pueden ser tenidos en cuenta como referentes importantes en la elaboración de los futuros acuerdos binacionales por parte de Colombia o en la suscripción de cartas previas de intención con los países vecinos, son:



**Intenciones.** Las agencias FCC e *Industry Canada* se reunieron para exponer los intentos de reconfiguración del uso del espectro de radiodifusión televisiva y los servicios de telefonía en la banda UHF. Partiendo de la necesidad, de ambos países, de disponer de nuevas bandas para servicios de telefonía móvil y de usar eficientemente el espectro electromagnético para los servicios TDT e IMT, se incluye la adecuada planeación de su utilización en coordinación internacional de común acuerdo. Consideran que las agencias de ambos países tienen la intención de reconfigurar el uso del espectro en las bandas utilizadas para la radiodifusión de televisión a través del aire mediante la asignación de una parte del espectro contiguo, excluyendo el canal 37, para uso de los servicios de banda ancha móvil, que comienza con el canal 51 y se extiende hacia abajo. Los representantes de ambos países tienen la intención de elaborar un acuerdo de distribución para la televisión digital en VHF (alta y baja) y las bandas UHF, y un plan de adjudicación de la televisión digital dentro de los 30 días posteriores a la conclusión y validación de la subasta de incentivos de la FCC que se describe más adelante.

**Consideraciones.** Las agencias tienen la intención de cambiar al menos 42 MHz de espectro de banda ancha móvil. Dicho espectro se liberará hacia la banda de 138-144 MHz, destinada a telefonía fija y celular en Estados Unidos y a telefonía fija, investigación espacial y *broadcasting* de TV en Canadá. La reasignación de las bandas de radiodifusión de televisión se realizará de acuerdo con los siguientes criterios:

- El listado de asignación canadiense para reasignación será reemplazado por un canal digital con el mismo ancho de banda que el original de VHF baja (54 a 72 MHz, 76 a 88 MHz), VHF alta (174 a 216 MHz) o UHF (470 a 698 MHz).
- El listado de asignación estadounidense para reasignación será reemplazado por un canal digital con la misma asignación del ancho de banda canadiense.
- Las estaciones de televisión que tengan cambios en sus bandas de frecuencia solamente podrán ser reasignadas a bandas de frecuencias menores.
- Se intentará asignar una banda de radiodifusión en las bandas descritas previamente para cada estación canadiense y estadounidense; estas últimas, con excepción de las estaciones que el FCC determine, deben dejar de operar de acuerdo a la subasta de incentivo.

Para el proceso de reasignación se tiene la intención de generar:

- Un plan de televisión digital donde se realiza la adjudicación adjunta que contiene las asignaciones de canales de televisión contigua, reservada por las agencias para su próxima aplicación.
- Un plan de banda contigua para el servicio de banda ancha móvil, el cual se aplicará posteriormente para su licenciamiento nacional. A efectos de esta declaración de intención se cubre el mayor rango de frecuencia asignada para el servicio de banda ancha móvil en la banda de 470-698 MHz, en cualquier área de Estados Unidos, como resultado de la subasta de incentivos.



- Se permitirá, para Estados Unidos, una cantidad limitada de superposición entre las asignaciones para la televisión y el plan de banda para el servicio de telefonía móvil en la banda anteriormente mencionada.
- Los canales de televisión canadiense no pueden ser asignados en el espectro de banda ancha móvil.
- Para evitar la interferencia entre los servicios de Canadá derivados de las asignaciones de televisión de Estados Unidos superpuestas o adyacentes al servicio móvil, se cumplirán las técnicas establecidas previamente.
- El proceso de reutilización determinará la cantidad de espectro por reutilizar según el plan de adjudicación de TDT resultante, así como sus técnicas aceptables y el plan de banda ancha móvil, de acuerdo con lo que se establezca en la carta de intención y con los resultados de la subasta de incentivos.
- En el nuevo plan de adjudicación de TDT conjunta, las agencias tienen la intención de dar la condición de asociado primario a las instalaciones en zonas fronterizas; las instalaciones con estado de asociación primaria serán protegidas por las operaciones primaria y secundaria. El criterio de protección y los parámetros para la asignación de la asociación primaria serán descritos en los apéndices.
- Las agencias trabajarán en conjunto antes, durante y después de la subasta de incentivos de la FCC hasta completar la asignación final de la radiodifusión. Durante dicho proceso se compartirán la información necesaria para facilitarlos (resultados de simulaciones de computador, listas de canales y análisis de datos de interferencias).
- Se validarán conjuntamente los procedimientos y datos relacionados con los factores, como la cobertura de televisión y la interferencia entre servicios, con el fin de tener el criterio adecuado de selección de bandas para el plan de *clearing target*.
- Las agencias intentarán implementar la reconfiguración del uso del espectro en la banda UHF (470-698 MHz) solamente si el resultado de la subasta de incentivos de la FCC es validada y confirmada de acuerdo con las provisiones existentes.

**Subasta de incentivos.** Con el fin de maximizar el uso del espectro radioeléctrico, asignarlo de manera equitativa y proporcional, y asegurar su disponibilidad, se creó la subasta de incentivos, proceso que fue propuesto en el año 2010 por la FCC con el fin de liberar 275 MHz de espectro en los siguientes cinco años y un total de 500 MHz en los próximos 10; la cantidad liberada será reasignada a nuevas tecnologías. El proceso de subasta por incentivos consiste en que los entes que hacen uso del espectro para televisión devuelven voluntariamente al Estado las frecuencias que tienen asignadas a un precio determinado; a este proceso se le denomina “subasta inversa”. La FCC actúa como facilitadora entre los concesionarios y los potenciales oferentes antes y durante la ejecución de la subasta.

Adicionalmente, la FCC debe encargarse de la reasignación de frecuencias en el caso de que los concesionarios manifiesten el interés en seguir utilizando el espectro y generar los bloques de espectro que sean sustentables desde el ámbito económico y técnico; este proceso se denomina “subasta hacia adelante”.





**Clearing target.** Es el objetivo al que se llega con la "subasta inversa", es decir, al efectuar el ejercicio de entrega del espectro por parte de cada uno de los concesionarios, se liberan las frecuencias para su reasignación. La liberación del espectro entre Estados Unidos y Canadá se realizará para los canales descritos en la **Figura 27** (FCC, 2015) (FCC, 2016).

#### **Carta de intención de la FCC con el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT-México).**

En este caso se busca liberar los servicios de la banda de 600 MHz con el fin de hacer una reasignación del espectro de radiodifusión televisiva y de telefonía celular; para ello, Estados Unidos realizó una carta de intención donde se muestran específicamente las bandas que se van a liberar, el proceso que se llevaría a cabo (subasta de incentivo) y las condiciones que se mantendrían durante el mismo.

Con esto se busca establecer acuerdos de reubicación de frecuencias de servicios de radiodifusión televisiva en ambos países. En México, dichos servicios se encuentran en las siguientes bandas: 54-72 MHz, 76-88 MHz, 174-216 MHz y 470-608 MHz. La carta de intención se enfoca en la transición del servicio de televisión análoga a digital y en la reconfiguración específica de la banda UHF de televisión con el fin de reasignar esta última para el servicio de telefonía móvil.

**Intenciones.** Las intenciones del acuerdo contienen tres aspectos principales:

1. Reconfigurar el espectro de radiodifusión televisiva con una porción contigua de espectro excluyendo el canal 37 para usar el ancho para el servicio de telefonía móvil, iniciando en el canal 51 y extendiéndolo hacia abajo. Se intenta asignar un máximo de 84 MHz de la televisión UHF en México y un máximo de 144 MHz de la televisión UHF en Estados Unidos para el ancho de banda del servicio de televisión.
2. Se definen en tablas anexas al documento las estaciones que pueden modificarse para proteger la operación del servicio, bien sea asignadas como resultado de la subasta de incentivos o por medio de un canal alternativo.
3. Realizar un trabajo continuo entre los dos países que incluya la definición de desarrollos técnicos aceptables y factores que permitan a los servicios operar en frecuencias adyacentes y superpuestas con el fin de evitar o suprimir la interferencia entre servicios (ISI).

También se resaltan los parámetros técnicos relacionados con la intensidad de campo mínima para evitar situaciones de interferencia, la interferencia cocanal si hay una superposición de frecuencias entre 1 y 5 MHz, y de canal adyacente si la superposición se da entre -5 y 0 MHz. En la **Tablas 26 y 27** se muestran los valores mínimos estipulados en dichas cartas de intención:



**Tabla 26.** Intensidad de campo mínima para una señal de TDT de 6 MHz y un canal inalámbrico EB.

Superposición (MHz)	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
Intensidad de campo (dB $\mu$ V/m)	11.3	12.2	13.5	15.2	18.0	28.4	55.4	56.5	55.7	59.5	62.6

Fuente: FCC (2015).

**Tabla 27.** Intensidad de campo mínima para una señal de TDT de 6 MHz y un canal inalámbrico EU.

Superposición (MHz)	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
Intensidad de campo (dB $\mu$ V/m)	27.6	28.5	29.8	31.4	34.2	44.5	59.6	60.4	61.4	62.7	64.6

Fuente: FCC (2015).

### **Análisis de los estudios sobre interferencia de TDT y LTE en bandas inferiores a 1 GHz**

A continuación se presenta el análisis de los diferentes estudios realizados sobre interferencia y convivencia de los servicios TDT y LTE en las bandas de 800 y 700 MHz, cuatro de los cuales corresponden a la región 1 (Europa), siete a la región 2 (Américas) y dos a la región 3 (Asia Pacífico).

**Región 1. Europa.** Uno de los países con mayor nivel de investigación relacionada con la operación de los servicios DVB-T y LTE es el Reino Unido. El estudio titulado "Assessment of LTE 800 MHz base station interference into DTT receivers" (Parker & Munday, 2011), realizado para Ofcom (regulador del espectro radioeléctrico del Reino Unido), presenta los resultados de la interferencia en la banda de 800 MHz entre la tecnología LTE y la emisión de servicios en TDT que operan por debajo de los 790 MHz.

La finalidad del estudio era la medición práctica con respecto a la relación C/I para los rangos de los receptores TDT; para ello se debían cumplir las siguientes condiciones:

- Equipos receptores TDT con los estándares DVB-T y DVB-T2.
- Nivel de señal deseada en el receptor de -70, -50, -30, -20 y -12 dBm.
- Evaluar los estados de *full* carga e inactividad en las estaciones de LTE.
- Evaluar el *offset* en frecuencia en rangos de 8 MHz.

Para la configuración de la prueba se usaron dos tipos de sintonizador superheterodino (CAN) y de silicio, y un tipo de receptor (iDTV, PRV, STB). La señal deseada TDT fue producida por un generador de señales configurado con los estándares DVB-T y DVB-T2 con los parámetros establecidos por el ETSI, entre los que se destacan la modulación 64 QAM y 256 QAM, ancho de banda del canal de 8 MHz y técnica de modulación COFDM. Las emisiones de la estación base LTE se usaron como fuente interferente y la señal se situó en 800 MHz, con ancho de banda de 10 MHz. Durante las pruebas realizadas se evaluaron

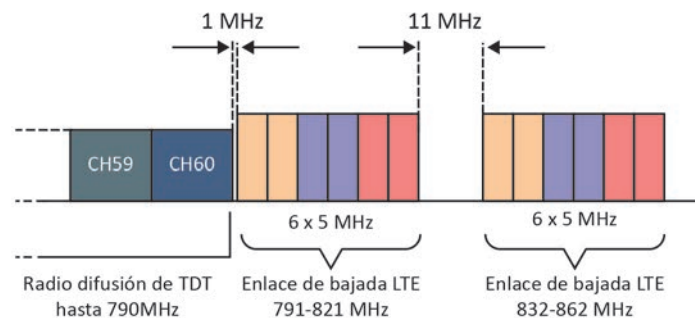




dos estados: cuando existe el tráfico máximo (100 % carga) y en inactividad de la red LTE (no hay tráfico en la estación base). Estos dos estados se evaluaron, ya que en TDT los receptores son más susceptibles en estado inactivo (*idle*) porque no hay tráfico en la red y solamente está presente la señalización entre estación base y terminal.

Se determinó que cuando la estación base LTE está con carga completa, DVB-T2 es más susceptible a la interferencia y DVB-T cuando la estación base está en estado inactivo. El informe recomienda el uso de filtros a la entrada en los receptores TDT que tienen una relación señal a interferencia insuficiente (Parker & Munday, 2011).

En el año 2015 se realizó en Eslovaquia un estudio de coexistencia para analizar las interferencias presentes entre los sistemas DVB-T/T2 y LTE en la banda de 800 MHz. Se compararon los sistemas con una transmisión en el canal 60 con frecuencia de 786 MHz y ancho de banda de 8 MHz versus el DL de LTE entre 791 MHz y 821 MHz, con una banda de guarda entre sistemas de 1 MHz, tal como se describe en la **Figura 28** (Sendrei, Félix, Oravej & Marchevsky, 2015).



**Figura 28.** Asignación de frecuencia en el estudio de Eslovaquia.

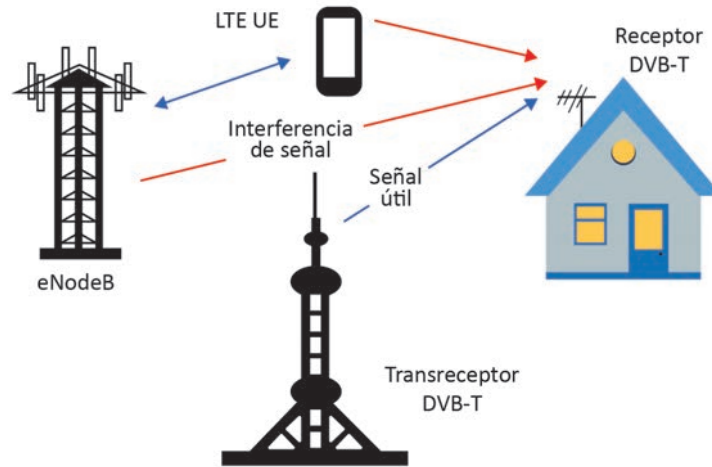
Se establecieron un ambiente de simulación y tres escenarios de pruebas (**Figura 29**):

1. Interferencia causada por la estación LTE al receptor DVB-T. Sin filtros en DVB-T.
2. Interferencia causada por la estación LTE al receptor DVB-T, con la aplicación de una máscara de emisión (*Spectral Emission Mask - SEM*) en la estación LTE.
3. Interferencia causada por la estación LTE al receptor DVB-T aplicando un filtro en la entrada del receptor DVB-T.

Se realizó la medición de cuatro parámetros, a saber: valor medio DRSS (*Desired Received Signal Strength*) o C, valor medio IRSS (*Interfering Received Signal Strength*) o I, la relación portadora-interferencia C/I y la probabilidad de interferencia. Para todos los casos se establecieron las características de transmisión de la estación base LTE y del sistema DVB-T fijas. El sistema LTE con modulación OFDMA para el DL y un modelo de propagación Hata Extendido.







**Figura 29.** Ambiente de pruebas para el estudio de Eslovaquia.  
Fuente: (Sendrei, Félix, Oravej & Marchevsky, 2015).

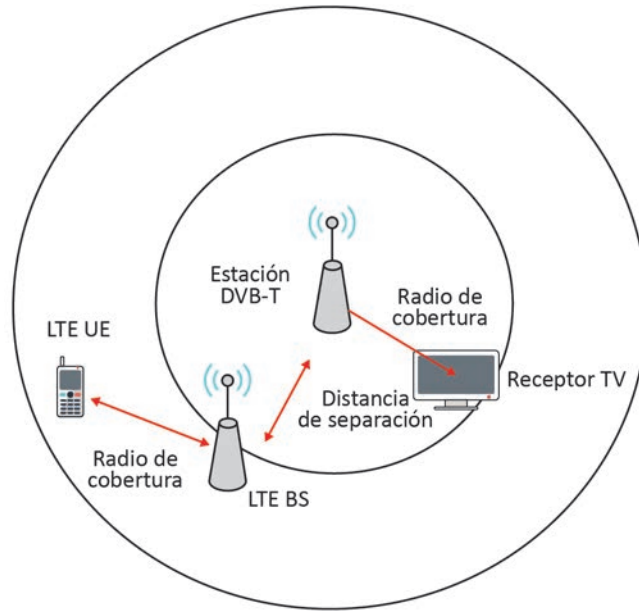
De acuerdo con los resultados de la simulación, se estableció que “la mejor solución para mitigar las interferencias causadas por una transmisión LTE en un receptor DVB-T es la aplicación de un filtro variable que pueda suprimir efectivamente la señal interferente” (Sendrei, Félix, Oravej & Marchevsky, 2015).

En Lituania se publicó en 2015 un estudio sobre la compatibilidad de sistemas DVB-T y LTE en canales adyacentes en la banda de 700 MHz. Se analizó la interferencia causada por un transmisor DVB-T a la estación base de LTE, se evaluó la separación entre el transmisor TDT y la estación base LTE y se analizó el sistema LTE con FDD 2x30 MHz en la banda de 703-733 MHz para el *UL* y de 758-788 MHz para el *DL*, y el canal 48 DVB-T en la banda de 686-694 MHz con ancho de banda de 8 MHz. Como señal de referencia se tomó la máscara de recepción de LTE (Ancans, Stankevicius & Bobrovs, 2015).

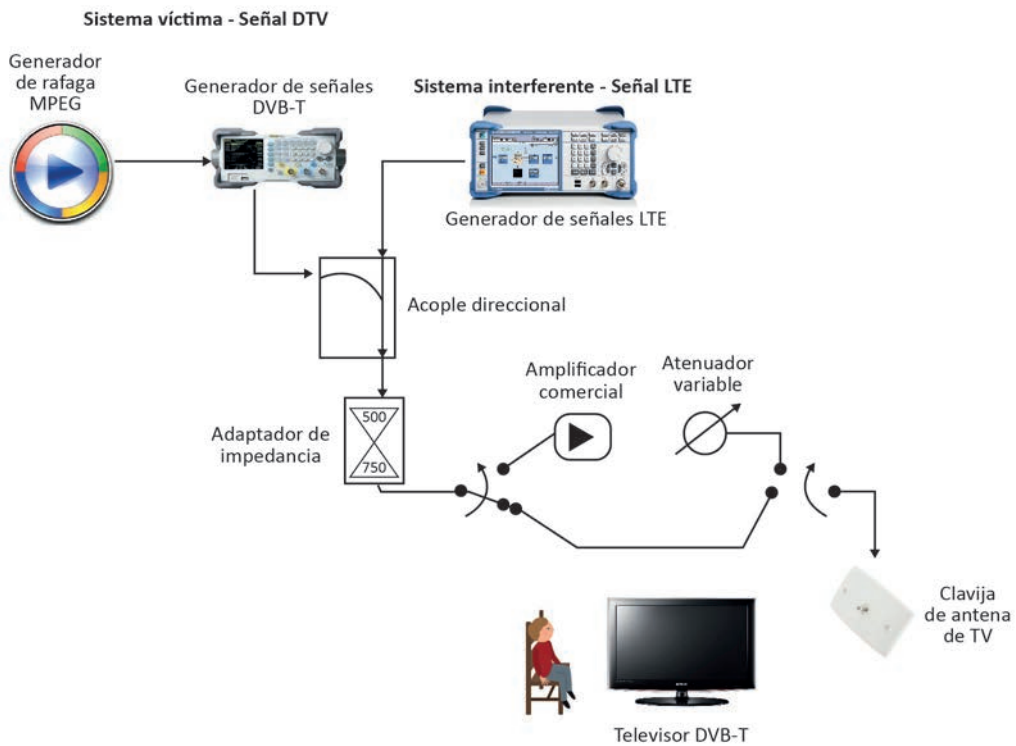
Para realizar las simulaciones se utilizaron dos métodos: MCL (*Minimum Coupling Loss*) y la simulación Montecarlo mediante el *software* SEAMCAT. A partir del escenario planteado en la **Figura 30** se estableció la relación SINR (*Signal to interference plus Noise Ratio*) de la estación base LTE y el CQI (*Channel Quality Indicator*). Se concluyó a través del método MCL que se requiere una separación entre los transmisores DVB-T y LTE de 26.15 km y mediante la simulación Montecarlo se sugirió una distancia de 13 km con una de aceptación de 4.8 % del *throughput* de LTE (Ancans, Stankevicius & Bobrovs, 2015).

También en el año 2015, en Italia, se desarrolló un estudio de la medida de la interferencia de las señales del enlace de bajada de LTE en los canales DVB-T; particularmente se evaluaron los efectos generados por la señal interferente de una terminal UE de LTE en proximidad a un receptor DVB-T. Se utilizó el esquema de la **Figura 31** para ejecutar las pruebas (Celedonio, Masullo, Pulcini & Vaser, 2015).





**Figura 30.** Escenario de simulación en el estudio de Lituania.  
Fuente: (Ancans, Stankevicius & Bobrovs, 2015).



**Figura 31.** Esquema de pruebas para el estudio de Italia.  
Fuente: (Celedonio, Masullo, Pulcini & Vaser, 2015).



La señal interferente proviene de una terminal UE de LTE transmitiendo en la banda de 832-862 MHz en modo FDD; se consideraron tres frecuencias de portadora LTE UL, a saber: 837 MHz (832-842 MHz), 847 MHz (842-852 MHz) y 857 MHz (852-862 MHz). Las características de la señal de DVB-T fueron modulación 64 QAM, FFT 8K, *code rate*  $\frac{3}{4}$ , intervalo de guarda  $\frac{1}{4}$ , ancho de banda 8 MHz y tasa de 22.39 Mbps. Se realizó la comparación entre dos tipos de sintonizadores (*CAN Tuner Superheterodino* y *Silicon Tuner*) y se usó un preamplificador de mástil *Masthead Amplifiers*. Con el esquema propuesto se evaluó el PR midiendo el mínimo valor de potencia de LTE que afecta la calidad de video de DVB-T, un valor crítico de VBER de la señal víctima mayor que  $2 \times 10^{-4}$  después del decodificador de Viterbi o mayor que  $1 \times 10^{-11}$  después del decodificador RS, y el valor de C/I, donde la señal de TV se pierde.

Finalmente, se concluyó que los sintonizadores *Silicon Tuner* tienen mejor comportamiento, un menor PR incluso en distancias cercanas a un metro y con niveles altos de potencia de LTE. El estudio recomienda la aplicación de filtros pasa-bajos en el preamplificador de mástil (Celedonio, Masullo, Pulcini & Vaser, 2015).

**Región 2. Américas.** En Latinoamérica, específicamente en el caso colombiano, se analizaron tres estudios realizados por la Universidad Politécnica de Valencia en asocio con el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) y con participación de la ANE, los cuales fueron desarrollados entre los años 2013 y 2014. Estos exploraron la coexistencia de servicios TDT y LTE en Colombia, particularmente en la banda de 700 MHz (Figura 32); aunque consideraron varios escenarios, se enfocaron solo en dos, que fueron determinados como los más críticos (Fuentes, 2013).

El primero con UE de LTE fuera del edificio y la recepción de TDT con una antena fija en la parte externa del edificio. El segundo con UE de LTE dentro del edificio en la misma habitación que el receptor TDT, y este con antena móvil (Figuras 33 y 34).

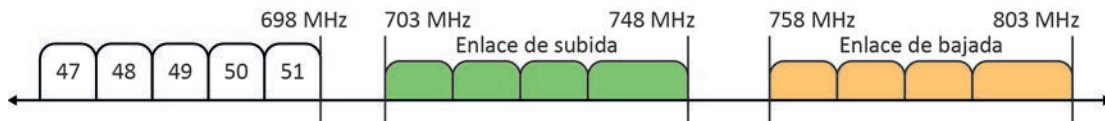


Figura 32. Localización en bandas de frecuencia 700 MHz TDT y LTE.

Con respecto a estos escenarios (Figuras 33 y 34), el primero hace referencia a ambientes rurales y el segundo a entornos urbanos; además, son considerados en el borde de la celda donde el UE transmite con la máxima potencia para alcanzar el eNB (23 dBm) y el receptor TDT recibe la mínima potencia posible.

El estudio fue realizado en ambientes controlados de laboratorio y dichos casos son los de más gravedad porque las antenas del UE y el receptor TDT se encuentran en línea de vista directa, lo que hace que la afectación sea mayor que en los otros escenarios. Sin embargo, en ambientes *indoor* el problema se hace aún mayor en razón a que el receptor



TDT tiene pérdidas por la penetración que debe hacer la señal y el transmisor UE está más cerca de la antena; adicionalmente, debe usar la máxima potencia para comunicarse con el eNB debido a las atenuaciones presentadas por la edificación (Garro, 2013).

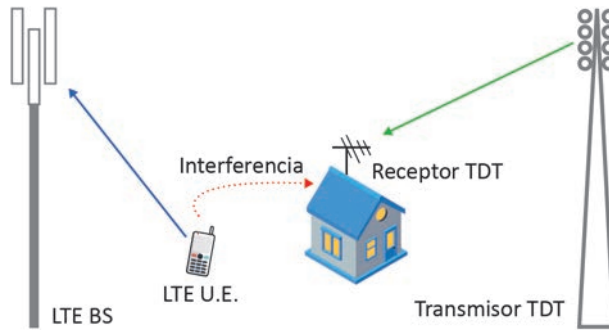


Figura 33. Configuración del sistema de interferencias LTE-UE sobre TDT *outdoor*.

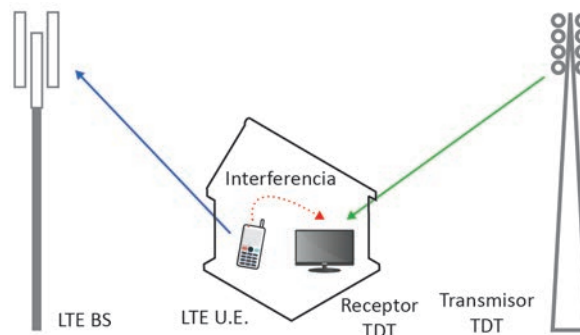


Figura 34. Configuración del sistema de interferencia LTE-UE sobre TDT *indoor*.

El objetivo de los estudios estaba relacionado con la medición del margen de protección PR entre los sistemas DVB-T y LTE y con el estudio del impacto de los siguientes parámetros: carga de tráfico de LTE, ancho de banda de LTE y enlace origen de la interferencia UL y DL. Se observó mayor incidencia en el nivel de interferencia generado por el enlace UL de LTE y cuando hubo baja carga de tráfico en la celda, y además un ancho de banda mayor de LTE, producía mayores niveles de interferencias y la recepción *indoor* resultó más afectada, nuevamente por el enlace de subida UL.

Las soluciones planteadas fueron no usar el canal 51 para TDT, ampliar la banda de guarda hasta 11 MHz con el canal 50 o utilizar filtros en el receptor TDT; adicionalmente se fijaron distancias mínimas entre el UE de LTE y el receptor TDT para garantizar el menor nivel de interferencia: 5.8 metros sin filtro y 2.7 metros con filtro; para niveles normales de potencia del UE sin filtro la distancia mínima fue 0.4 metros para ambiente rural y 0.15 metros para ambiente urbano (Gómez-Barquero, López-Sánchez, Martínez, Rivadeneira-Ramírez & Garro, 2014).



De igual forma, en Brasil se han desarrollado diferentes estudios sobre la convivencia entre el estándar ISDB-T y LTE en la banda de 700 MHz. Como ya se mencionó, la *sección 4.1.2 del documento 3648 de CITEL* muestra los resultados de un estudio teórico-práctico en el cual se observó que en las situaciones de proximidad extrema de las antenas la convivencia entre sistemas es totalmente factible, con excepción de algunas situaciones específicas en las que se requeriría emplear técnicas de mitigación de interferencias (CITEL, 2014). Para ello se verificaron las siguientes alternativas:

- Distancias de separación mínima entre las antenas de TDT y los UE como las que actualmente son observadas en instalaciones de tipo residencial con las antenas de recepción externa.
- Filtros pasa-banda para reducción de interferencia en la recepción de TDT. De la misma manera, se demostró que la interferencia de una transmisión de TV (canal digital adyacente o cocanal analógico) en un sistema LTE no es suficiente para afectar la transmisión en banda ancha móvil. Y la interferencia producida por el sistema LTE en canal adyacente al de TDT permite la convivencia de uso (CITEL, 2014).

En otro estudio realizado por la Universidad Mackenzie en el 2013, y contratado por la Sociedad Brasileira de Ingeniería de Televisión (SET), se determinó que la introducción de la señal 4G/LTE en la banda de frecuencia de 700 MHz podría causar interferencias perjudiciales en millones de televisiones que reciben señal de TDT si no se tomaban a tiempo las medidas necesarias para disminuir las interferencias. Los estudios demostraron que la interferencia es consecuencia de valores diferenciados de potencia, de emisiones fuera de la banda, dependiendo de las características de los servicios y de sus respectivos equipamientos (Moura, 2014).

Así mismo, los resultados de la Universidad Mackenzie muestran que si se quiere tener una convivencia armónica entre LTE y TDT en la banda de 700 MHz, es necesario realizar ajustes mediante filtros en los receptores de TDT y en los transmisores eNB. La instalación de filtros en los eNB tiene como principal objetivo reducir las emisiones interferentes mientras que la instalación de filtros en los receptores de TDT tiene como principal beneficio aumentar su protección contra estas interferencias. Los autores también hacen hincapié en la necesidad de reducir las potencias de transmisión de los eNB, realizar modificaciones en la recepción de TDT y aumentar la banda de guarda (Moura, 2014).

En otro estudio realizado por la *Advanced Topographic Development & Images Ltd.* (ATDI) se concluye que es posible encontrar interferencia entre los servicios TDT y LTE (ATDI, 2014). Sin embargo, si se toman medidas para mitigar las interferencias, el problema se reduce considerablemente. Dentro de los resultados se encontró que para el caso de una señal LTE que interfiera con ISDB-T (en canal adyacente) la probabilidad de interferencia es media. Cuando la ISDB-T interfiere con LTE, la probabilidad de interferencia tanto cocanal como de canal adyacente es alta. Sin embargo, estos impactos se pueden



reducir considerablemente si se utilizan técnicas de mitigación como las enunciadas a continuación:

- Limitar las potencias de emisión.
- Utilizar filtros tanto en la emisión como en la recepción de la señal LTE-EB.
- Usar polarización ortogonal en las antenas.
- Mejorar la calidad de los receptores.

Los resultados mostrados en el estudio de ATDI concluyen que estos servicios pueden coexistir utilizando las técnicas de mitigación como la combinación de filtros, tanto en transmisores como en receptores de las dos señales, y la limitación de las potencias de emisión. Como recomendaciones, los autores sugieren evitar las emisiones de potencias altas en los canales 48 al 51.

Finalmente, se encontró un estudio de la GSMA (GSM Association) publicado en el año 2015 y denominado "Análisis de la situación actual y estudio de coexistencia de sistemas de radiodifusión y servicios LTE en la banda de 700 MHz en Perú", en el cual se realizaron pruebas de laboratorio para determinar los márgenes de protección y ponderar el nivel de interferencia considerando los cuatro casos que se muestran en la **Tabla 28** dentro de los escenarios de convivencia que se muestran en la **Figura 35**.

**Tabla 28.** Casos de interferencia estudio de coexistencia en Perú.

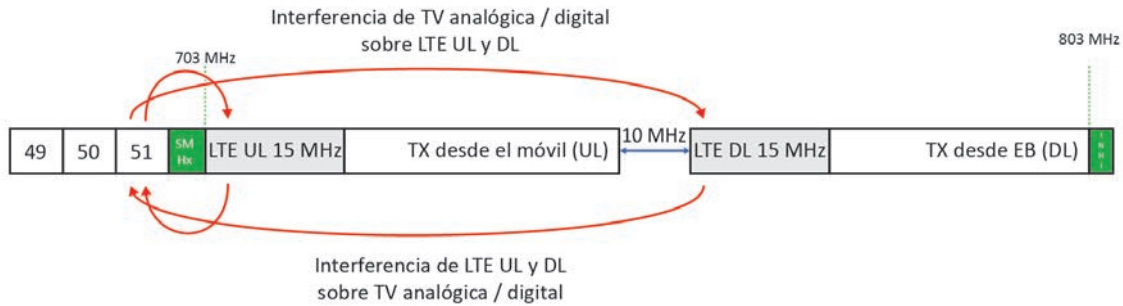
Sistema interferente	Sistema víctima
Transmisor TV analógica	Estación base LTE
Transmisor TV digital	Estación base LTE
Terminal LTE	Receptor TV analógica
Terminal LTE	Receptor TV digital

Fuente: GSMA (2015).

Para el caso peruano, el estándar de televisión digital adoptado fue el ISDB-T brasilero y la canalización de la banda de 700 MHz corresponde a la propuesta por Asia Pacífico (APT) (GSMA, 2015).

En este estudio se evaluó el límite del canal de televisión 51 y el UL del sistema LTE; además, se realizaron mediciones de los márgenes de protección y umbrales de saturación a través del método de fallo de punto subjetivo. Se consideraron "distancias de 10 km de separación entre la estación transmisora de TV y la estación base LTE, 100 metros entre una estación base LTE y un receptor de TV con antena en tejado y 10 metros entre un terminal de usuario LTE en exterior y un receptor de TV con antena en tejado" (GSMA, 2015). Se consideraron como técnicas de mitigación el uso de filtros, la ampliación de la banda de guarda, la ampliación de la separación geográfica y la reducción de potencia de los transmisores de televisión.

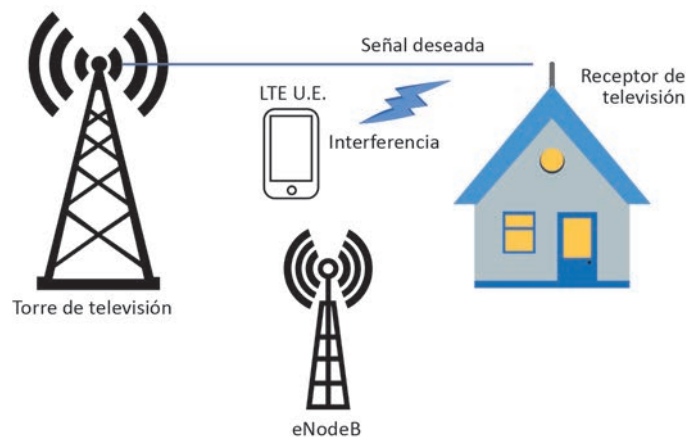




**Figura 35.** Escenario de convivencia de servicios en bandas adyacentes en el estudio de Perú.

De igual forma, se recomendó de manera general la eliminación del canal 51, es decir, 6 MHz de banda de guarda entre sistemas, combinada con el uso de filtros; sin embargo, se sugirió que el uso de estos filtros debería incluir un análisis económico debido al impacto sobre operadores y usuarios. Además, se determinó una distancia mínima de 7.7 metros entre un UE LTE y el receptor TDT.

**Región 3. Asia Pacífico.** En el año 2014 se realizó en Australia un trabajo acerca de la interferencia en la recepción de DVB-T con sistemas LTE en bandas adyacentes (Basnet, Gunawardana, Biyanwilage & Liyanapathirana, 2014). Se analizó la interferencia percibida por un receptor DVB-T con una banda de guarda de 9 MHz en el canal 51 (687-694 MHz) generada por una señal LTE en 701 MHz y anchos de banda para UL y DL de 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz (**Figuras 36 y 37**).



**Figura 36.** Escenario propuesto para el estudio de Australia.

Los resultados de las simulaciones dieron un valor de las distancias de protección e indicaron que estas deben ser mayores que 669 metros en entornos urbanos y 825 metros en rurales entre el UE y una antena receptora DVB-T, y de 4.91 km en entornos urbanos y 6.05 km en rurales para prevenir interferencia del eNB al receptor DVB-T. El estudio con-





cluyó que el incremento en la separación entre el UE o eNB de LTE reduce la interferencia en canales adyacentes y que existe una notable interferencia en el canal 51 cuando LTE está operando en el canal adyacente.

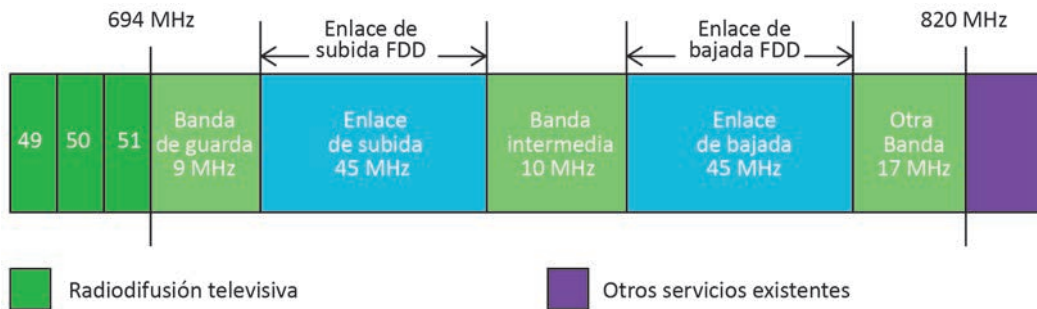


Figura 37. Asignación de frecuencia en el estudio de Australia.

En la misma región, específicamente en Corea del Sur, se publicó en el 2014 un estudio acerca del PR entre los sistemas DVB-T2 y LTE, el cual se centró en la determinación de la banda de guarda cuando existe una separación menor que 1 o 2 MHz entre los sistemas DVB-T2 y LTE. Para este propósito se planteó el esquema de la Figura 38 (Hong, Son & Chong, 2014).

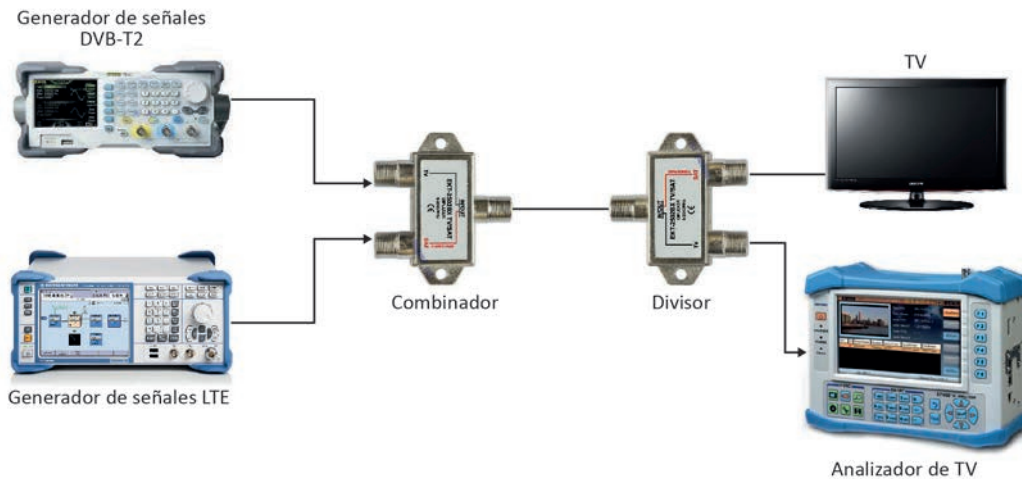


Figura 38. Configuración del sistema para medidas en el estudio de Corea del Sur. Fuente: (Hong, Son & Chong, 2014).

El método usado en el estudio fue SFP para determinar el error en la señal de TV. Se establecieron los parámetros para el sistema DVB-T2 con modulación 256 QAM, *code rate* 2/3, intervalo de guarda 1/16 y ancho de banda de 6 MHz, y para el sistema LTE un ancho de banda de 10 MHz. Se realizaron pruebas con la estación base y el UE de LTE en estados *idle* y de carga completa y se varió la potencia de LTE recibida en el televisor en valores de

-40, -30, -20 y -15 dBm. De igual forma, se modificó la banda de guarda entre los sistemas desde 1 MHz hasta 13 MHz.

Se tomó la medida de los PR entre DVB-T2 y LTE ante las variaciones y se calcularon los valores de ACS y ACLR. De los resultados, el estudio concluyó que “el valor del ACLR tiene mayor efecto en el PR cuando la banda de guarda entre sistemas es más pequeña que 1 o 2 canales de DVB-T2” (Hong, Son & Chong, 2014).

### Distribución y asignación de canales y máscaras de emisión espectral

A partir del análisis de los estudios desarrollados en las diferentes regiones del mundo se pudo establecer que las primeras investigaciones se basaban en una matriz de recomendaciones enfocadas exclusivamente en las modulaciones utilizadas, según lo establecía la Recomendación ITU-R SM 669-1 de 1994 sobre “relaciones de protección para las investigaciones sobre la compartición del espectro”; por lo tanto, en los estudios realizados se prestaba poca atención a los requerimientos de los servicios y a la operación en frecuencia. El desarrollo de investigaciones posteriores y la socialización de las mismas permitieron determinar que el espectro compartido debería enfocarse en las bandas de operación y las características particulares de cada sistema involucrado, razón por la cual “los estudios de hoy se centran en los requerimientos de servicio y bandas de frecuencia específicas” (Celedonio, Masullo, Pulcini & Vaser, 2015).

En este sentido, se pudo determinar que, como elemento fundamental de los estudios, se necesita conocer e identificar claramente la distribución y asignación del espectro para los servicios en cada región y en cada país. Se requiere conocer, además, en qué frecuencia de operación los servicios de DVB-T/T2 y comunicaciones móviles LTE se encuentran adyacentes y, específicamente, cuál es el enlace de LTE que está más cercano en frecuencia a DVB-T/T2; es decir, de acuerdo a la canalización, establecer si el UL o el DL tienen mayor probabilidad de incidencia o afectación respecto a DVB-T/T2.

Otro de los aspectos comunes encontrado en los estudios consultados fue la utilización de valores de referencia para ser comparados durante las pruebas o simulaciones propuestas; estos valores se obtienen a partir de una señal de referencia que en general corresponde a una máscara espectral, de la cual se definen dos tipos: *máscara de emisión espectral* (SEM) y *máscaras de recepción o bloqueo*. La SEM define los límites que debe tener una señal al ser emitida en el transmisor y se puede caracterizar en los parámetros de la **Figura 39** (CEPT & ECC, 2016):

- **Ancho de banda necesario.** Ancho de banda en frecuencia que es teóricamente suficiente para asegurar la transmisión de la información.
- **Ancho de banda de ocupado.** Ancho de la banda en frecuencia tal que, por debajo de la parte inferior y por encima de los límites de frecuencia superior, las potencias medias emitidas son iguales a un porcentaje especificado  $\beta/2$  de la potencia media total. El valor de  $\beta/2$  se considerará como 0.5 %.



- **Emisiones fuera de banda.** Emisiones en las frecuencias situadas inmediatamente fuera del ancho de banda del canal que son resultado del proceso de modulación y de la no linealidad en el transmisor; no se incluyen las emisiones espurias.
- **Emisión espuria.** Emisión en frecuencias fuera del ancho de banda del canal y cuyo nivel puede reducirse sin afectar la correspondiente transmisión de información; no se incluyen emisiones fuera de banda.
- **Emisiones no deseadas.** Consisten en emisiones fuera de banda y emisiones espurias.

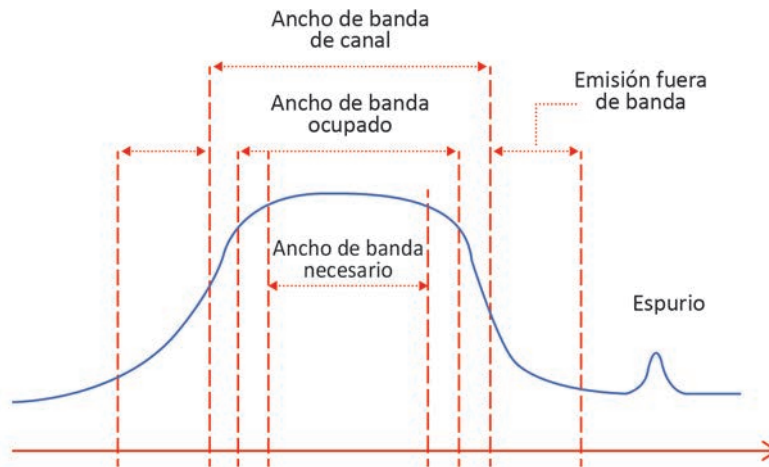


Figura 39. Máscara de emisión espectral.

El ancho de banda necesario se considera en las mediciones para determinar el máximo nivel de interferencia cocanal que es aceptable para el receptor y el ancho de banda ocupado se usa para determinar en qué parte del canal se concentra el 99 % de la potencia transmitida (CEPT & ECC, 2016).



## Capítulo 5. Escenarios de interferencia y pruebas preliminares para la banda de 614-698 MHz



En este capítulo se describen los trabajos prácticos desarrollados para determinar los aspectos técnicos relevantes respecto a la coexistencia entre los servicios de LTE y TDT en la banda de 614-698 MHz. Se inicia con la identificación de los escenarios de interferencia y la definición de algunos de ellos para su respectivo análisis. Además, se presentan los resultados de simulación de los escenarios elegidos y los resultados de las pruebas de laboratorio preliminares.

### Escenarios y casos de interferencia en la banda de 614-698 MHz en zonas fronterizas

Los escenarios de coexistencia de servicios en la frontera son un tema novedoso, del cual no se encontraron estudios técnicos que identifiquen interferencia o coexistencia entre dos países, y mucho menos estudios que incluyan diversos tipos de tecnologías para TDT o IMT. Debido a la situación particular en la zona fronteriza colombo-brasilera, donde existen dos tecnologías de TDT (DVB-T/T2 y SBTVD) y una de servicios móviles IMT (LTE/LTE *Advanced*), se logró identificar un total de 38 escenarios de interferencia transfronterizos, sumados a 18 posibles de interferencia dentro de cada país.

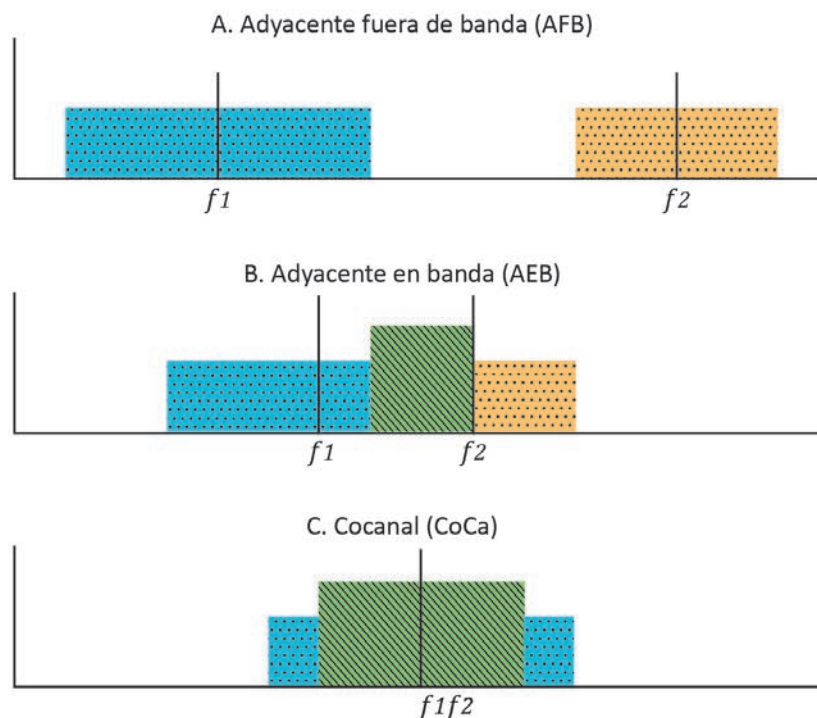


Figura 40. Diferentes tipos de interferencia.



Para este estudio en particular se seleccionaron, en conjunto con la ANE, 18 escenarios de interferencia que se dividen en tres grupos, a saber: a) interferencia entre estaciones, b) interferencia entre estaciones y usuarios y c) interferencia entre usuarios. A esto se deben sumar las posibilidades de interferencia de canal adyacente en banda, fuera de banda o cocanal, como se muestra en la **Figura 40**, lo cual incrementa de forma significativa el tipo de análisis y estudio de interferencia para cada uno de los escenarios seleccionados (**Tabla 29**).

**Tabla 29.** Escenarios de interferencia transfronterizos Colombia-Brasil.

Escenario	Elemento interferente	Tipo de transmisión	Elemento víctima	Tipo de recepción
<b>Entre estaciones</b>				
1	ISDB-T BS (Bra)	Outdoor	LTE-BS (Col)	Outdoor
2	LTE-BS (Col)	Outdoor	LTE-BS (Bra)	Outdoor
<b>Estaciones y usuarios</b>				
3	DVB-T/T2 BS (Col)	Outdoor	ISDB-T TV (Bra)	Outdoor
4	DVB-T/T2 BS (Col)	Outdoor	ISDB-T TV (Bra)	Indoor
5	ISDB-T BS (Bra)	Outdoor	DVB-T/T2 TV (Col)	Outdoor
6	ISDB-T BS (Bra)	Outdoor	DVB-T/T2 TV (Col)	Indoor
7	ISDB-T BS (Bra)	Outdoor	LTE-UE (Col)	Outdoor
8	ISDB-T BS (Bra)	Outdoor	LTE-UE (Col)	Indoor
9	LTE-BS (Col)	Outdoor	ISDB-T TV (Bra)	Outdoor
10	LTE-BS (Col)	Outdoor	ISDB-T TV (Bra)	Indoor
<b>Entre usuarios</b>				
11	LTE-UE (Bra)	Outdoor	LTE-UE (Col)	Outdoor
12	LTE-UE (Bra)	Outdoor	LTE-UE (Col)	Indoor
13	LTE-UE (Bra)	Indoor	LTE-UE (Col)	Outdoor
14	LTE-UE (Bra)	Indoor	LTE-UE (Col)	Indoor
15	LTE-UE (Col)	Outdoor	ISDB-T TV (Bra)	Outdoor
16	LTE-UE (Col)	Outdoor	ISDB-T TV (Bra)	Indoor
17	LTE-UE (Col)	Indoor	ISDB-T TV (Bra)	Outdoor
18	LTE-UE (Col)	Indoor	ISDB-T TV (Bra)	Indoor

**Definición de escenarios para análisis y pruebas.** Debido a las restricciones técnicas de los equipos de prueba utilizados y al poco tiempo, las pruebas se limitaron al estudio de dos escenarios: el primero se enfoca en la interferencia de TDT sobre LTE y el segundo en su caso opuesto. Estos escenarios de prueba se basan en los escenarios 7 y 9 de la **Tabla**

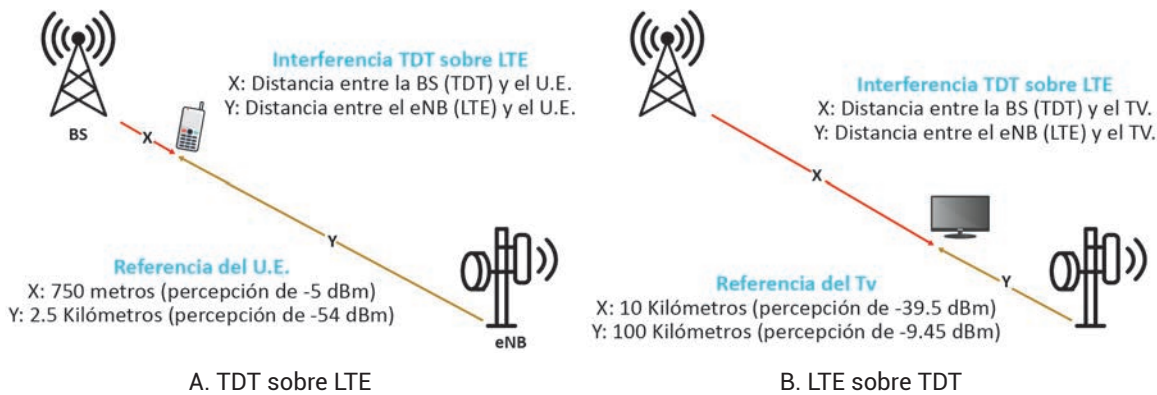


29, y dadas las características de los equipos de laboratorio se tuvo que cambiar el sistema ISDB-T por el DVB-T, como se muestra en la **Tabla 30**; sin embargo, esto no representa un problema, por cuanto la transmisión de ambos sistemas es muy similar, tal como se describió en la sección *Televisión Digital Terrestre (Sección 2.2)*.

**Tabla 30.** Escenarios de interferencia transfronteriza usados en casos de pruebas de laboratorio.

Escenario	Elemento interferente	Tipo de transmisión	Elemento víctima	Tipo de recepción
<b>Estaciones y usuarios</b>				
A	DVB-T BS	Outdoor	LTE-UE	Outdoor
B	LTE-eNB	Outdoor	DVB-T-Tv	Outdoor

La **Figura 41A** muestra el diagrama del escenario de prueba A de interferencia de un sistema de transmisión TDT sobre un UE de LTE.  $X_{TDT}$  representa la distancia entre la antena de televisión interferente y el UE, mientras que  $Y_{eNB}$  es la distancia entre el UE y el eNB que le da servicio. Por otro lado, la **Figura 41B** muestra el diagrama del escenario B que describe la interferencia de un sistema LTE DL sobre un receptor TDT. Para este caso, el valor  $X_{TDT}$  es del enlace deseado de televisión, mientras que el  $Y_{eNB}$  es la distancia del enlace interferente entre el televisor receptor TDT y el eNB.



**Figura 41.** Modelo de interferencia usado para análisis.

En la **Tabla 31** se presentan las relaciones de distancia en los escenarios de prueba con los tipos de interferencia TDT sobre LTE y viceversa. Adicionalmente se evalúan las potencias de cada uno de los enlaces en el receptor para cada una de las distancias seleccionadas, convertidas a partir del modelo de propagación Okumura-Hata en ambiente rural, bajo los parámetros de las antenas y potencias halladas en los transmisores de televisión y telefonía móvil de la frontera colombo-brasilera para implementar pruebas de laboratorio.

**Tabla 31.** Relaciones de distancias y potencias de los modelos de interferencia.

Escenario	Tipo de interferencia	Distancia enlace deseado	Potencia en Rx del enlace deseado	Distancia enlace interferente	Potencia en Rx del enlace interferente
A	TDT -> LTE	$Y_{eNB-UE} = 2.5 \text{ km}$	-54.5 dBm	$X_{TDT-UE} = 750 \text{ m}$	-5.0 dBm
B	LTE -> TDT	$X_{TDT-TV} = 10 \text{ km}$	-39.5 dBm	$Y_{eNB-TV} = 100 \text{ m}$	-9.45 dBm

**Descripción de las pruebas y casos de interferencia.** Para cada uno de los escenarios de prueba descritos en la sección anterior se evaluaron dos casos en los cuales se realizaron movimientos espectrales de las bandas de TDT o LTE. Los dos casos fueron evaluados tanto en simulaciones como en pruebas de laboratorio.

El escenario A se eligió a partir de los estudios relacionados con los canales de televisión brasileños para definir una posible canalización de LTE analizando cómo esta interferiría a uno de los canales existentes en la frontera. Se optó, entonces, por seleccionar el canal 42 brasileño, el cual se mantiene en su frecuencia de trabajo, mientras que el enlace LTE-DL se mueve en diferentes frecuencias buscando que pase de la interferencia fuera de banda (AFB) y de la interferencia en banda (AEB), cocanal, para retornar al fuera de banda. En este proceso se varían las bandas de guarda de 0 MHz hasta los 4 MHz.

La **Figura 42** presenta la configuración del caso 1 y describe los 15 movimientos de la banda de LTE desde los 614-634 MHz hasta los 648-668 MHz. Las primeras cinco pruebas y las últimas cinco presentan interferencia con banda adyacente fuera de banda (AFB); las tres pruebas centrales se definieron para tener interferencia cocanal (CoCa), mientras que las dos restantes fueron definidas para interferencia adyacente en banda (AEB).

Por otro lado, el caso 2 se basó en la hipótesis de que existe una canalización definida LTE y se lograría negociar un posible corrimiento de frecuencias de televisión en la frontera por parte de Brasil. Debido a que a la fecha no existe canalización alguna para dicha banda se utilizó una definida a partir de los criterios relacionados con las bandas de guarda, los movimientos y su relación con los canales de TV. Como se presenta en la **Figura 43**, los movimientos de los canales de TDT deben ser discretos en pasos de 6 MHz. La primera prueba se inició con el canal 39 para tener un movimiento simétrico de la banda entre el canal 39 y el 45, tomando como eje central el canal 42 para que coincida con el mismo centro de la banda LTE, como se muestra en la prueba 4, para así dar lugar a la realización de siete pruebas con una banda de guarda de 5 MHz en los casos extremos. Otros tamaños de bandas de guarda están por fuera del alcance de este proyecto de investigación.









## Simulaciones de interferencia

Con el fin de evaluar los parámetros de interferencia entre los sistemas de televisión digital y LTE se desarrolló un grupo de simulaciones enfocadas en evaluar las áreas interferidas y las relaciones de C/I para los escenarios de pruebas A y B (TDT sobre LTE y LTE sobre TDT, respectivamente), descritos previamente.

En estas simulaciones se consideró un área de cobertura de 20 km en la zona de frontera colombo-brasilera. Los parámetros usados para dichas simulaciones están definidos en el [Anexo 1](#). En estas pruebas se destaca que el receptor víctima está mucho más cerca de la antena interferente que de su antena transmisora. Además, se variaron únicamente las frecuencias de los servicios LTE o TDT para los casos de prueba 1 y 2, respectivamente. Las variaciones de distancias, de potencias y de máscaras de protección y filtros quedan por fuera del alcance de este estudio y se recomienda evaluarlas en detalle en las siguientes fases del macroproyecto. Las simulaciones se enfocaron en tres parámetros principales: i) porcentaje de interferencia, ii) área de interferencia y iii) relación C/I requerida para evitar la interferencia.

Los resultados arrojaron que en el escenario A, cuando se produce interferencia cocanal, el porcentaje de interferencia es mayor, así como el área de interferencia, lo cual implica que se requiere mayor C/I para evitarla; además, hay mayor interferencia por parte de televisión a sistemas IMT. Para la interferencia AFB, entre mayor sea la banda de guarda, más disminuyen el porcentaje de interferencia y el área de interferencia, por lo que se requiere un valor menor de C/I. Cuando se produce interferencia AEB, el porcentaje y el área de interferencia son los mismos que para la interferencia cocanal, lo cual es coherente con estudios realizados por otros autores en distintas bandas. En el escenario A, cuando se produce interferencia cocanal, el porcentaje de interferencia puede llegar a ser del 0.1 %. Así mismo, el área de interferencia se incrementa a valores cercanos a los 1.23 km<sup>2</sup>. La C/I requerida está entre 3.2 y 13.2 dB, dependiendo de la distancia de separación entre las frecuencias centrales de las señales. En el [Anexo 1](#) se pueden observar los detalles de los resultados para cada caso analizado.

En la [Figura 44](#) se presentan los resultados comparativos de los escenarios A y B para el porcentaje de interferencia. En ella se puede observar que para el escenario A (TDT interfiere a LTE), el porcentaje de interferencia es mayor que en el escenario contrario, lo que muestra que el sistema LTE es más propenso a sufrir interferencias por parte del servicio de TDT para los parámetros de pruebas elegidos. Así mismo se observa que el porcentaje de interferencia no sobrepasa el 0.1 %, que está dentro de los valores permitidos y no perjudiciales (la interferencia es permitida cuando es menor que el 1 % y se convierte en perjudicial cuando supera el 5 %).

Con respecto a la variable del área interferida, se puede determinar a partir de los resultados que esta es independiente del escenario, ya que los valores de los dos tipos de interferencia son similares y cercanos a 1.2 km<sup>2</sup>, lo cual corresponde a una distancia mínima de protección de 600 metros entre estaciones para evitar interferencias permitidas. Lo que realmente cambia es el tamaño del área interferida con respecto a las distancias de las



frecuencias centrales de los servicios (el escenario B es menos susceptible comparado con su contraparte). En la **Figura 45** se pueden observar estos detalles.

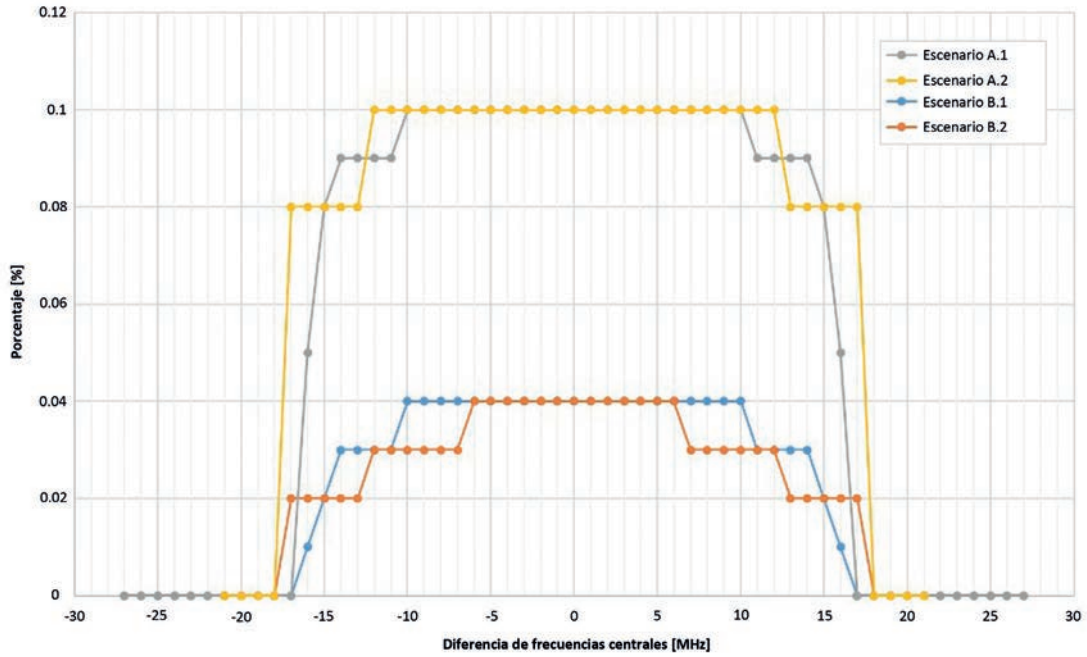


Figura 44. Porcentaje de interferencia para los escenarios A y B.

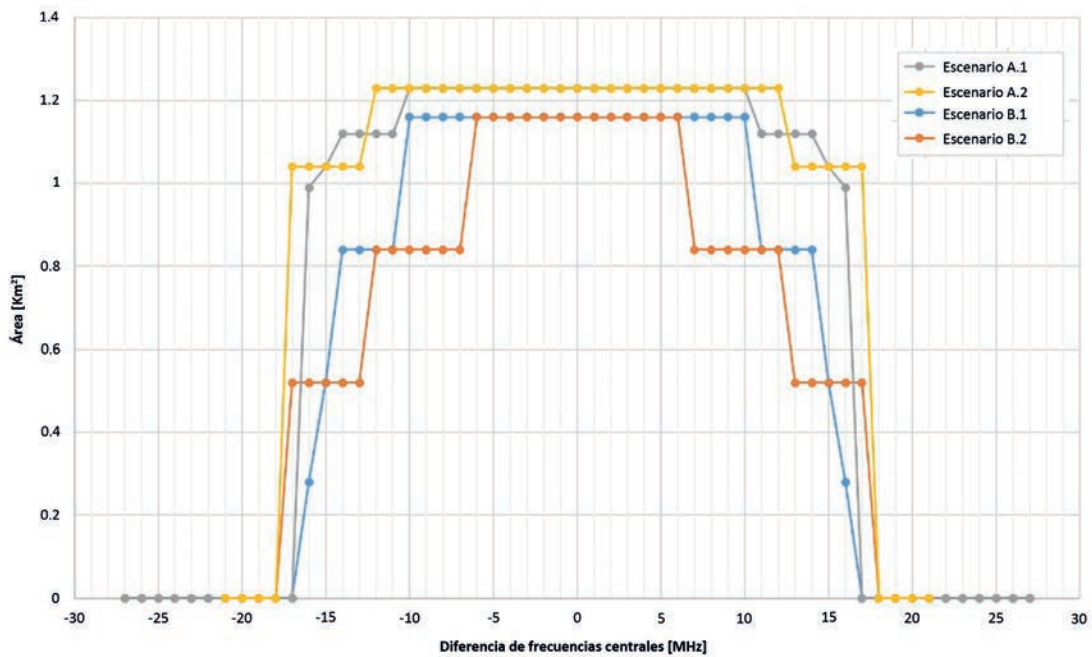
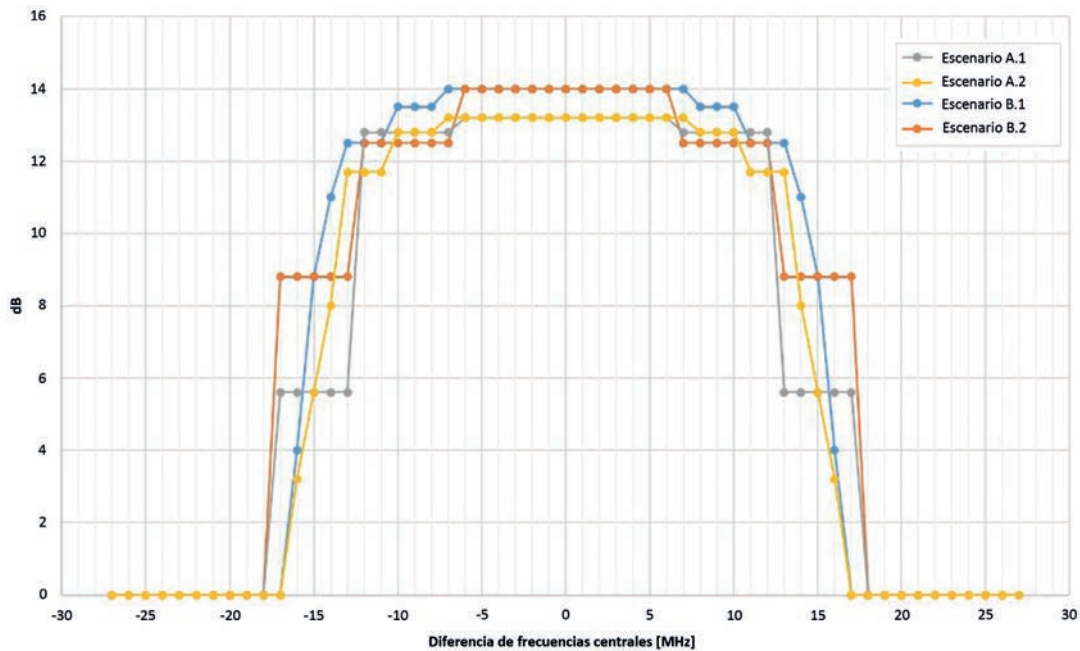


Figura 45. Área interferida para los escenarios A y B.



En la **Figura 46** se puede observar que la relación C/I requerida para los dos escenarios interferentes tiene el mismo comportamiento y no sobrepasa los 14 dB. Este es un valor aceptado, ya que según los estudios de convivencia descritos en el **Capítulo 4**, la relación portadora a interferencia debe ser menor que 18 dB. Esto indica que los servicios de TDT y LTE pueden convivir sin generar interferencia perjudicial entre ellos. Así mismo, se evidencia que esta relación depende exclusivamente de las frecuencias centrales de los servicios, lo cual es importante porque no se ve afectada por otros parámetros como la potencia de los transmisores y la distancia entre transmisor y receptor.



**Figura 46.** Relación C/I requerida para los escenarios A y B.

### Pruebas de laboratorio preliminares

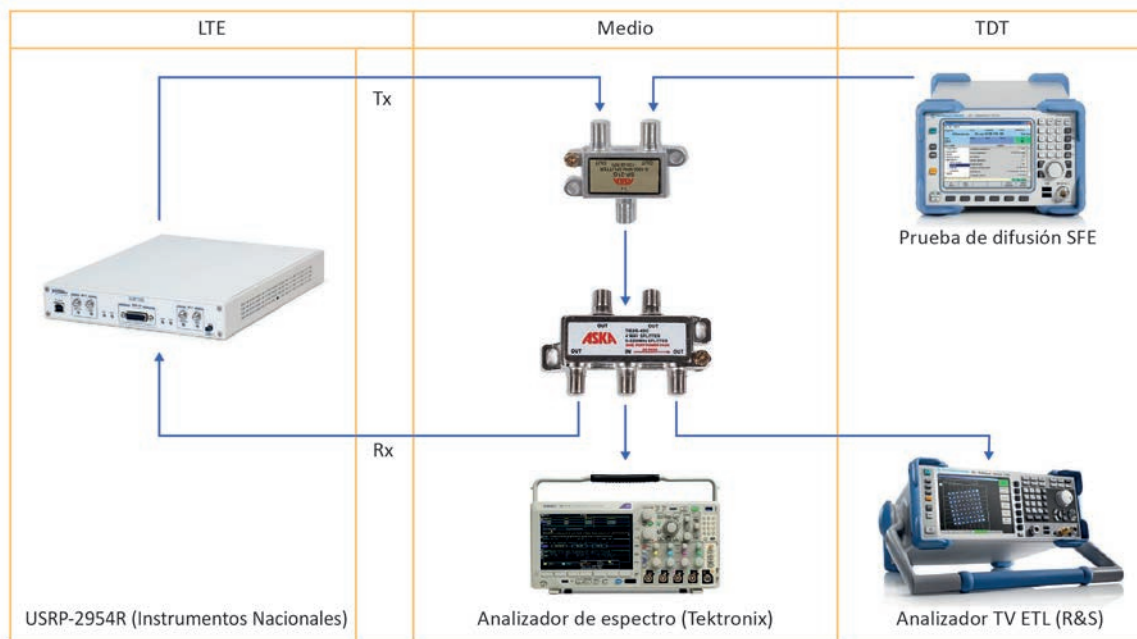
Con el fin de establecer los niveles de protección adecuados entre los servicios de LTE y TDT se definen los parámetros básicos de las pruebas de laboratorio realizadas en la Escuela y en el TecnoParque (Sena). En estas pruebas se realizaron mediciones enfocadas en determinar el impacto en las variables de cada uno de los sistemas cuando se le aplican los escenarios y casos de interferencia descritos.

Para la realización de las mediciones de interferencia se generó un esquema de conexiones en el que se presentan las dos tecnologías que se van a evaluar. La sección de LTE hizo uso del USRP-2954R de *National Instruments* (NI), el cual es capaz de generar y recibir señales LTE del *Release 10* en un formato de DL, donde la etapa transmisora emula un eNB y la etapa receptora un UE. La sección de TDT contiene los equipos del laboratorio TDT de TecnoParque, donde el *R&S SFE Broadcast Tester* emu-



ló la transmisión de DVB-T y el *R&S ETL TV Analyser* emuló un receptor DVB-T, gracias a lo cual se extrajeron diversas características de la calidad de la señal recibida. Las conexiones realizadas se implementaron mediante el uso de *splitters*, pues no se pudieron usar combinadores de RF debido a la dificultad de conseguirlos rápidamente en el mercado.

El la **Figura 47** se muestra el diagrama de conexiones realizadas en el laboratorio, donde el analizador de espectros *Tektronix* sirve para comprobar la información que está en el medio (canal) de comunicaciones. Los equipos usados para las mediciones se describen en el **Anexo 4**.



**Figura 47.** Conexión de equipos para medir la interferencia entre los sistemas LTE. Fuente: (eNB) y TDT (BS).

Debido a las características técnicas de los equipos de laboratorio usados, las pruebas se limitaron a las siguientes condiciones:

- **LTE:** enlace únicamente de DL con un bloque de 20 MHz.
- **TDT:** solo fue posible transmitir un canal (6 MHz) de DVB-T, ya que el estándar ISDB-T no está habilitado en dichos equipos.

Los resultados de las pruebas de laboratorio se enmarcaron en dos elementos receptores: el primero, que es el UE, donde se pudo evaluar el escenario de prueba A (TDT sobre LTE) a partir de las mediciones realizadas en el USRP (en la **Tabla 32** se definen los parámetros medidos en el USRP). Y el segundo elemento receptor de televisión es el *ETL TV Analyser*,



en el que se pudieron evaluar las variables de calidad de la televisión digital que son afectadas por la aplicación del escenario de prueba B. En la **Tabla 33** se ven los parámetros por medir en el ETL.

**Tabla 32.** Parámetros de medición para las pruebas de laboratorio.

Medición básica		Medición avanzada	
Valores de lectura	Unidad	Valores de lectura	Unidad
Potencia de recepción de RF en el UE	dBm	Ganancia aplicada para el UE	dB
Espectro de potencia del UE RX (gráfica)	Hz/dBm	PDCCH Constellation (gráfica)	I/Q
Constelación PDSCH (gráfica)	I/Q	Falla del UE/bloques de error	s/BLER
Wideband SINR	dB		
Throughput	Mbps		

**Tabla 33.** Parámetros de medición del ETL.

Sección	Valores de lectura	Unidades
Espectro	Espectro	
	Atenuación de hombro	dB
	C/N	MHz/dB
Overview	Overview (MER-BER)	dB
Análisis de modulación	Constelación	I/Q
	MER	dB

Los resultados obtenidos en el USRP muestran que la SINR disminuye cuando se tiene interferencia cocanal para el escenario B en un valor de 16 dB, lo cual es consecuente con los resultados de las simulaciones de la C/I requerida.

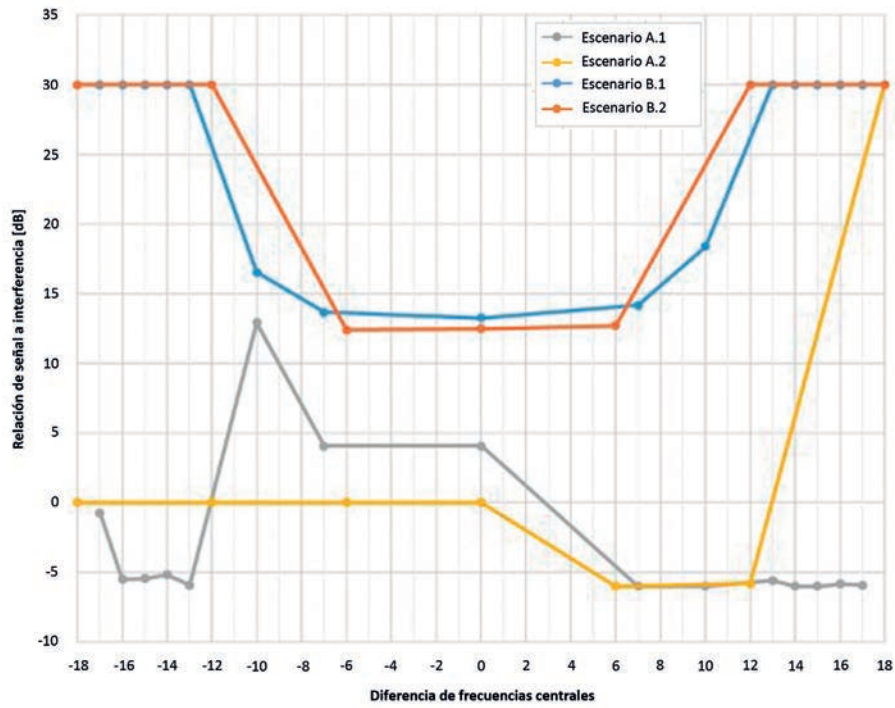
La **Figura 48A** muestra los resultados de este fenómeno en las líneas azul y naranja. Por su parte, el BLER muestra que el sistema LTE está completamente afectado en el escenario A, ya que este valor se encuentra en 100 % (este fenómeno se aprecia en la **Figura 48B**).

Adicionalmente, para el escenario A se puede observar cómo la interferencia impacta en las constelaciones del canal PDCCH. En la **Figura 49** se puede observar este fenómeno, fruto de los diferentes tipos de interferencias.

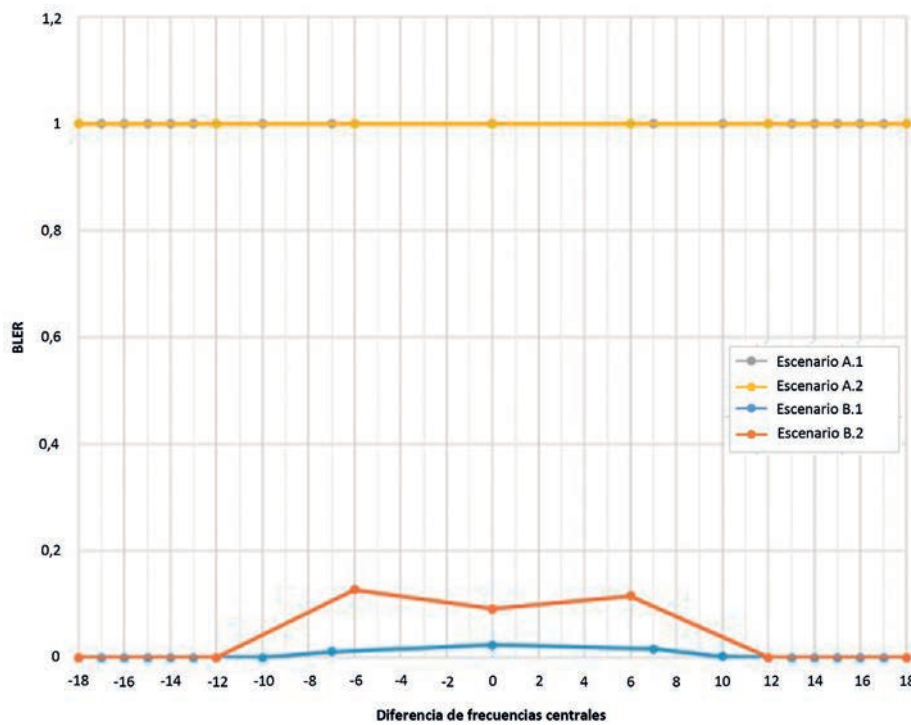
De otro lado, el canal estudiado con el analizador de espectros evidencia los diferentes niveles de señales y su impacto en el otro servicio. En la **Figura 50** se puede observar el resultado de una prueba, donde el canal de televisión tiene parte de su señal en el LTE y se aprecia cómo dicha señal se le suma espectralmente.







A. Signal to Interference Ratio (SINR)



B. Block Error Rate (BLER)

Figura 48. Mediciones de pruebas de laboratorio en el USRP.



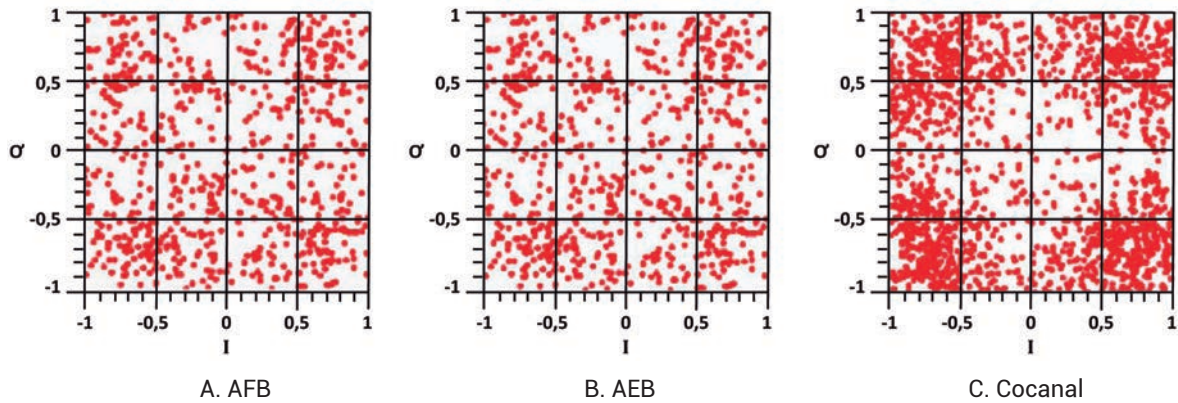


Figura 49. Impacto en la constelación del PDCCH debido a diversas interferencias.

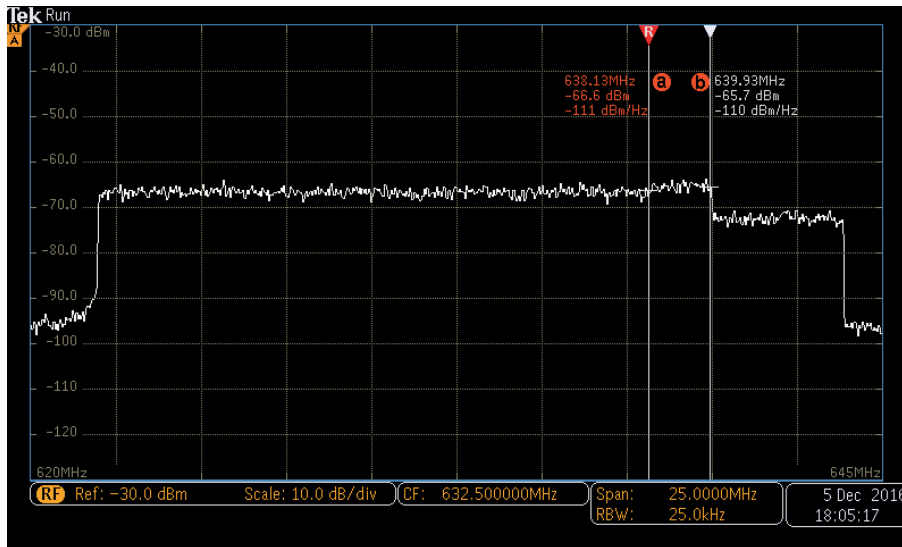


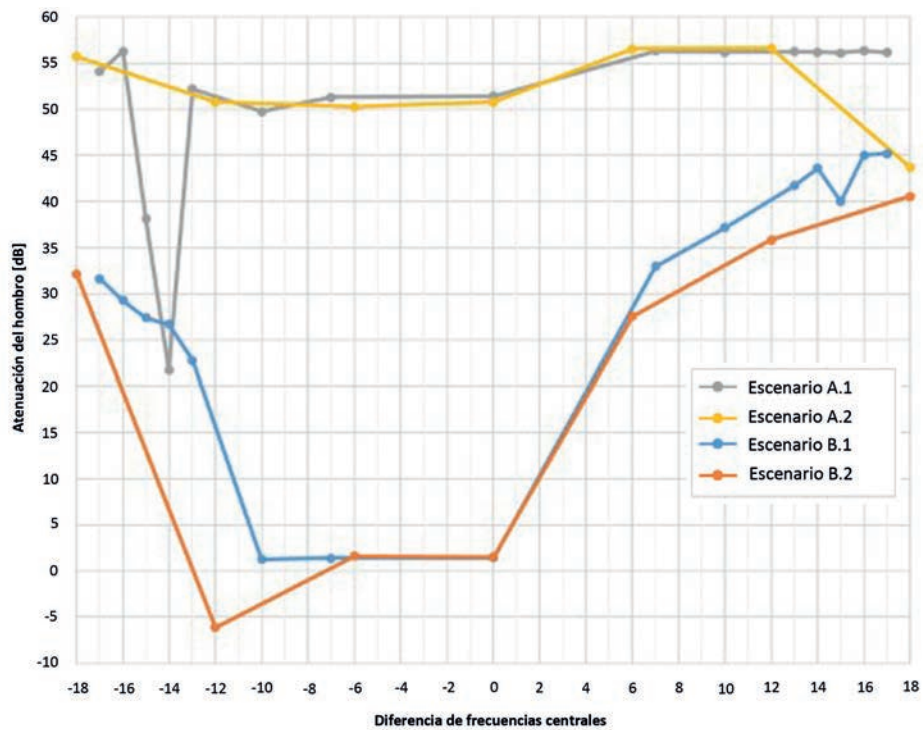
Figura 50. Ejemplo espectral de interferencia AEB.

El segundo grupo de resultados está asociado a las mediciones en el ETL para el escenario B, donde se pudo evaluar la incidencia en el receptor de televisión. Sin embargo, se encontró que los valores como el BER de TDT, en cualquiera de sus tres casos, y los valores de C/N son 0 o muy cercanos. Esto no concuerda con las simulaciones, en particular con el valor de C/N, por lo que se recomienda realizar un estudio más detallado sobre este aspecto.

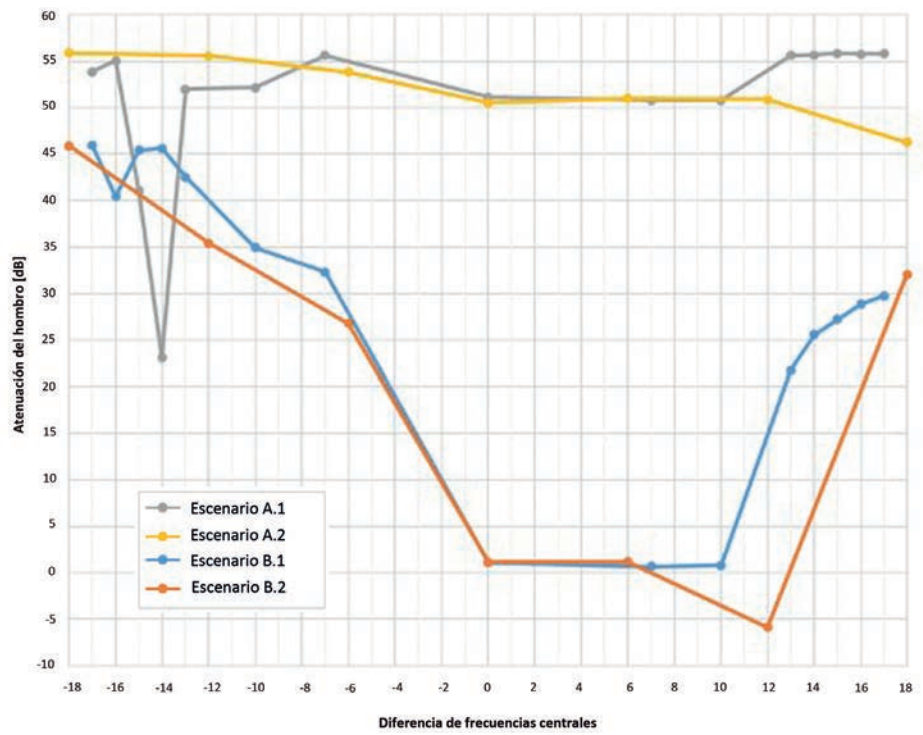
La Figura 51 muestra las implicaciones de la atenuación de hombros consecuencia de la interferencia y se evidencia que para el escenario B cambian según las bandas de guardas que se apliquen. Adicionalmente se observa que en los casos de interferencia de canal adyacente en banda es menor la atenuación presente en el sistema.

El detalle de todos los resultados obtenidos en estas pruebas preliminares de laboratorio se puede consultar en el Anexo 1.





A. Hombro inferior



B. Hombro superior

Figura 51. Atenuación de hombro en medidas del ETL.



## Capítulo 6. Simulaciones y mediciones de campo en la frontera colombo-brasilera



Con el fin de caracterizar la situación actual de los servicios y del modelo de propagación en la zona fronteriza de Colombia con Brasil, y su futura relación con la coexistencia de los sistemas TDT y LTE, se desarrolló una serie de simulaciones y mediciones de campo electromagnético en Leticia, Tabatinga y sus alrededores. Para las simulaciones se usó el *software* ICS Telecom y estas se enfocaron en comprobar la propagación y radiación de señales de televisión en dicha zona. Con las mediciones se recolectaron datos para evaluar la propagación de las señales de televisión y obtener la canalización de las señales existentes en la banda de 614-698 MHz. Los resultados de las mediciones realizadas en sendas comisiones de trabajo permitieron elaborar la propuesta de un modelo de propagación propio para la selva amazónica.

### Simulaciones de propagación

El *software* ICS Telecom, suministrado por la ANE para realizar las simulaciones de cobertura y propagación de los diferentes canales de televisión analógica que existen en la frontera Colombo-Brasilera, es una herramienta que permite diseñar y planear sistemas de radiocomunicaciones a gran escala considerando las condiciones geográficas de los terrenos. En el **Anexo 4** se presentan las características técnicas de este *software* especializado.

La definición del área de cobertura abarcó a Leticia y Tabatinga, incluyendo tanto la zona urbana como la zona rural. En el sistema se configuraron ocho servicios televisivos, incluyendo los canales públicos y privados de Colombia y los de Brasil, probados con tres modelos de propagación (Okumura-Hata, COST 231 y UIT 525). La ubicación de las antenas y los puntos de medición de las frecuencias de operación se describen en detalle en el **Anexo 2**.

**Resultados de las simulaciones de propagación.** El cálculo de la cobertura muestra el nivel de potencia en cada uno de los puntos del escenario de trabajo. Para los canales públicos, las simulaciones arrojaron que la cobertura de estos es mayor que la de los canales privados y que la de los brasileros. Esto se debe principalmente a las características de las antenas transmisoras en cuanto a que su altura y potencia de emisión son significativamente mayores. El canal que mostró una mayor cobertura fue el 8, seguido del 11. Asimismo, se observa que el rendimiento del modelo UIT 525 es mayor en aproximadamente 30 dBm que el de los modelos Okumura-Hata Rural y COST 231. En el **Anexo 2** se muestra una tabla resumen con los resultados obtenidos de las simulaciones para los canales públicos.

En la **Figura 52** se presenta una comparación de los modelos de propagación simulados, específicamente para el canal 8, se puede apreciar que la línea de tendencia del modelo UIT 525 presenta menores pérdidas que el Okumura-Hata o el COST 231, lo cual



se debe a que el modelo UIT 525 está basado en la propagación de espacio libre, mientras que los otros dos tienen en cuenta las pérdidas consecuencia de las características del terreno.

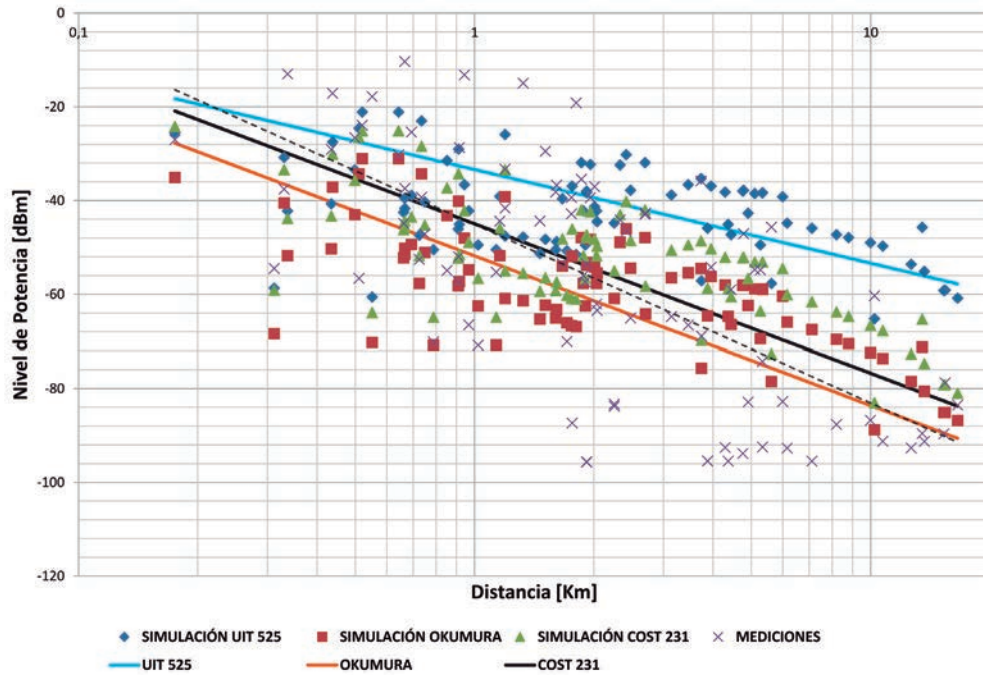
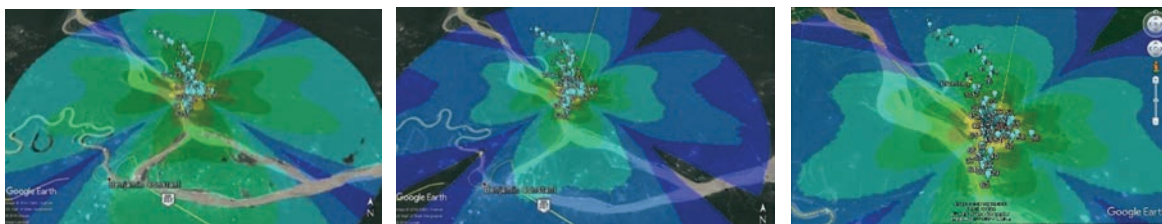


Figura 52. Comparación entre datos simulados y modelos de propagación para el canal 8.

La Figura 53 presenta de manera comparativa los patrones de propagación en la frontera, de acuerdo con los tres modelos simulados. Se aprecia que la cobertura del modelo Okumura-Hata y del COST 231 es menor que la del modelo UIT 525, lo cual es consistente con lo expuesto anteriormente.



A. Modelo UIT 525

B. Modelo Okumura-Hata

C. MC. Modelo COST231

Figura 53. Mapas de la cobertura para la simulación del canal 8 usando varios modelos.

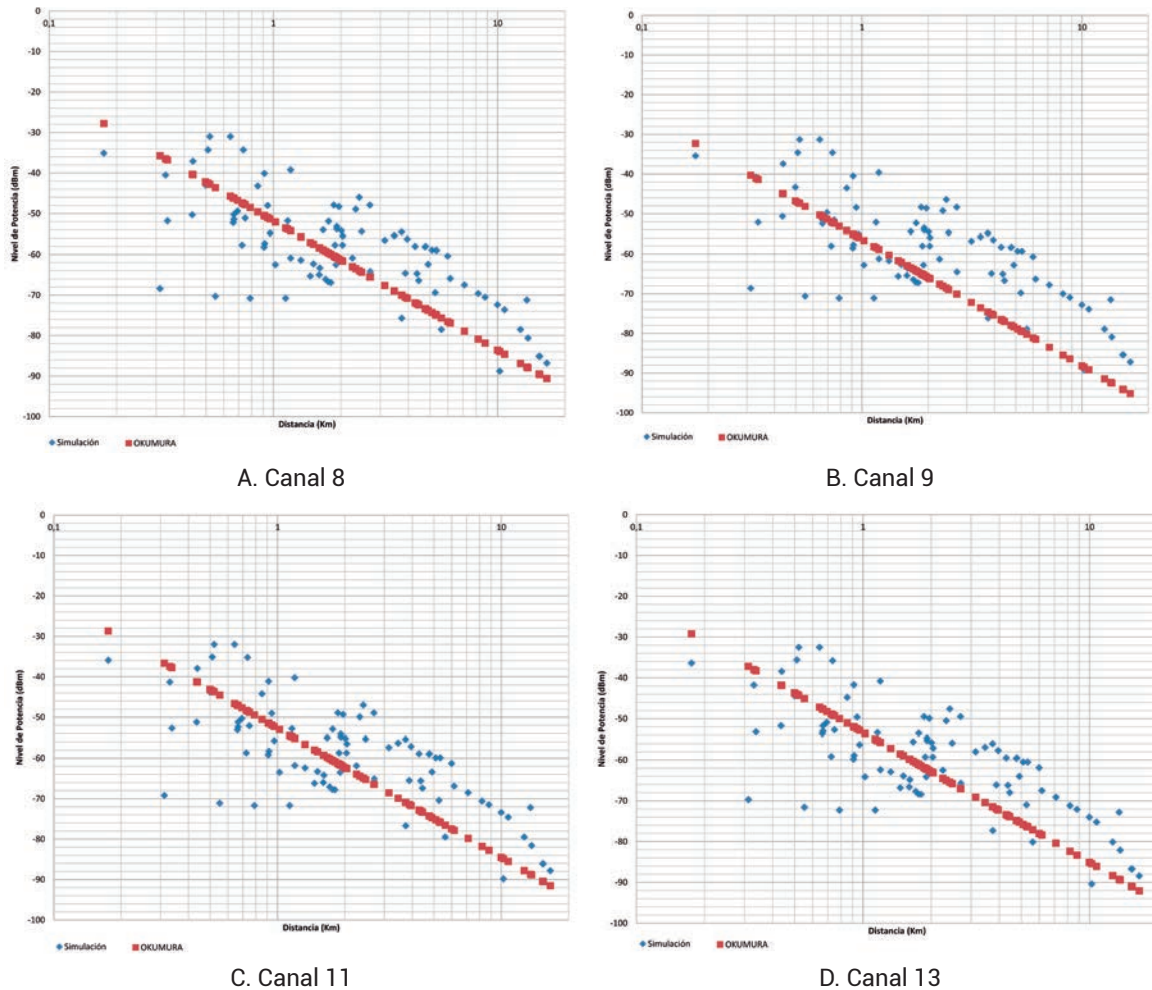
Un aspecto importante de las simulaciones es que no se presentaron cambios en la cobertura relacionados con el efecto del río Amazonas, por lo que se puede asumir que la cartografía usada no contiene dicho cuerpo de agua como parámetro fundamental. Para





el caso particular del canal 9, los puntos más alejados están por debajo del valor de -70 dBm debido a la baja ganancia de la antena del canal.

En la **Figura 54** se presenta una relación entre el modelo de propagación matemático Okumura-Hata Rural y el obtenido como resultado de las simulaciones para todos los canales públicos. Se evidencian puntos diferentes por los cambios en los ángulos de transmisión entre la antena de los canales públicos y el punto de recepción, el cual genera diferentes ganancias siguiendo el patrón de radiación, ya que en los modelos matemáticos se asume que las antenas de recepción son omnidireccionales.



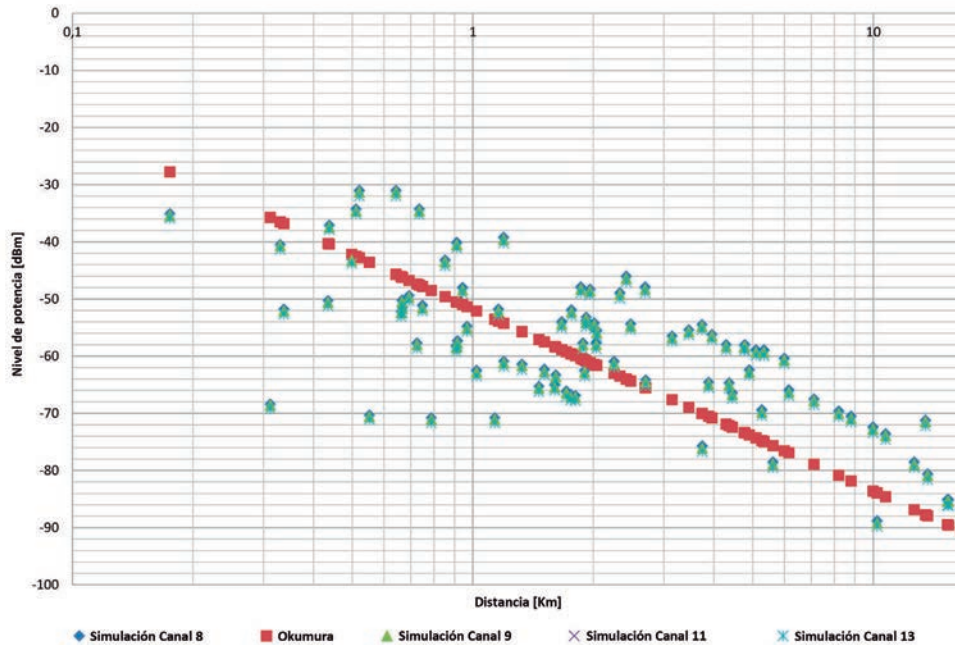
**Figura 54.** Comparación de simulaciones con Okumura-Hata para canales públicos.

Adicionalmente, para todos los canales la tendencia es similar, ya que utilizan el mismo modelo y las frecuencias de transmisión son cercanas; sin embargo, para el canal 9, que posee una ganancia de antena menor (6 dBd en lugar de 10 dBd de los otros), se puede observar que existe un decrecimiento en la potencia recibida.



La **Figura 55** muestra los resultados de las simulaciones de los canales públicos con el modelo Okumura-Hata; en este se evidencia la tendencia de los datos respecto al modelo de propagación. Por otro lado, también se evidencia que los valores de potencia recibida para cada modelo son muy similares, sin importar el canal, por cuanto las frecuencias son muy cercanas y su diferencia no afecta el valor simulado de la potencia recibida.

Para los canales privados las simulaciones arrojaron un nivel de receptividad inferior a los canales públicos. Las características de la antena transmisora afectan considerablemente los resultados porque transmiten la cuarta parte de la potencia, su altura es la tercera parte y la frecuencia es de más del doble en comparación con los canales públicos. El canal que mostró una mayor cobertura fue el 27. La **Figura 56** presenta los modelos de simulación de una manera comparativa y evidencia la similitud entre el Okumura-Hata y el COST 231.

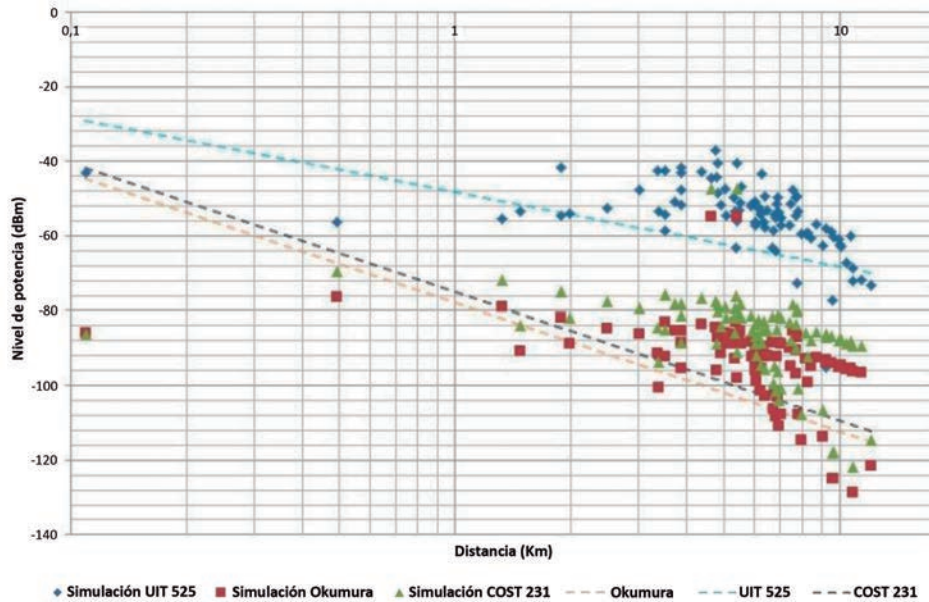


**Figura 55.** Resultado de las simulaciones de los canales públicos usando Okumura-Hata rural.

Para los canales brasileños, las simulaciones muestran una cobertura menor que la de los canales públicos, pero mayor que la de los canales privados de Colombia. El canal con mayor cobertura fue el 4. Los resultados muestran que el patrón de radiación de la antena cubre casi de manera omnidireccional toda la zona de Tabatinga y gran parte de la zona urbana de Leticia.



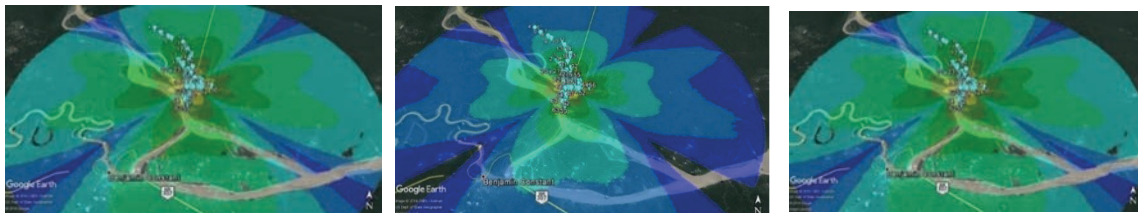




**Figura 56.** Comparación entre datos simulados y modelos de propagación para el canal 27.

**Observaciones de las simulaciones.** Las simulaciones realizadas muestran que las señales de televisión analógica para los canales públicos colombianos tienen una cobertura grande debido a que transmiten con niveles de potencia superiores. Para los canales privados se observa que la cobertura es menor. La zona que cubre esta antena corresponde a la parte urbana de Leticia, a diferencia de los canales públicos, que logran abarcar parte de Tabatinga y del Perú. Y para los canales brasileiros la cobertura que se observa abarca principalmente la zona de Tabatinga. Esto se debe a los parámetros establecidos en la configuración del arreglo de antenas.

Con respecto a las diferencias encontradas entre los modelos de propagación, en la **Figura 57** se evidencia que el que tiene mejor receptividad es el UIT 525, seguido del COST 231, y que el de menor desempeño es el Okumura-Hata Rural. Sin embargo, comparando los resultados de las simulaciones con los modelos matemáticos se evidencia que el modelo que mejor se ajusta a los resultados es el Okumura-Hata.



A. Modelo UIT 525

B. Modelo Okumura-Hata

C. Modelo COST 231

**Figura 57.** Cobertura para cada modelo de simulación.



### Mediciones de campo

En esta sección se hace un resumen de las mediciones de campo realizadas en las dos comisiones de trabajo programadas para explorar la frontera colombo-brasilera. La primera, realizada en el mes de septiembre de 2016, se enfocó en realizar mediciones preliminares para determinar el ajuste requerido para el modelo de propagación de la selva colombo-brasilera. Mientras que la segunda, realizada en noviembre, tuvo como objetivo determinar una línea base de la cobertura y de los servicios de telefonía móvil celular en la zona fronteriza y la toma de más datos para afinar los parámetros del modelo de propagación propuesto.

**Mediciones de cobertura de televisión en la frontera.** En la primera comisión, con una duración de siete días, se realizaron mediciones en 90 puntos considerando las señales de las tres antenas de televisión analógica en la zona (dos colombianas y una brasilera). Para la segunda comisión, desarrollada en cuatro días, se realizaron 50 mediciones y se trabajó tomando en consideración solo la antena de los canales públicos colombianos, con una ruta optimizada que permitió minimizar los problemas presentados en los datos de la primera comisión de trabajo relacionados con la forma de medición y los ángulos relativos respecto a las antenas de transmisión. El protocolo de mediciones y la ubicación de los puntos receptores de ambas comisiones se encuentran en los **Anexos 2 y 3**.



A. Primera comisión



B. Segunda comisión

**Figura 58.** Montaje para la toma de medidas para cada una de las comisiones de trabajo.



Como instrumentos de medida se utilizaron, inicialmente, un analizador de espectros marca *Tektronix*, modelo MDO-3000, y un analizador de TV HD *Ranger 2*, y como antena receptora se usó una Yagi-Uda (UHF y VHF) con una ganancia máxima de 11.4 dBi (la caracterización de dicha antena está incluida en el [Anexo 2](#)). Debido a los problemas relacionados con la medición en zonas de difícil acceso, para la segunda visita se optó por usar un analizador de espectros y de televisión portable marca *Anritsu*, modelo *Site Master S332*, y una nueva antena descrita en el [Anexo 3](#). En la [Figura 58](#) se muestra el montaje realizado en la primera y segunda comisión, y como elementos adicionales se contó con un GPS para registrar las coordenadas de cada punto y un computador portátil para documentar la información necesaria según el protocolo. Las variables definidas para el protocolo de medición se muestran en la [Tabla 34](#).

**Tabla 34.** Variables del protocolo de medición.

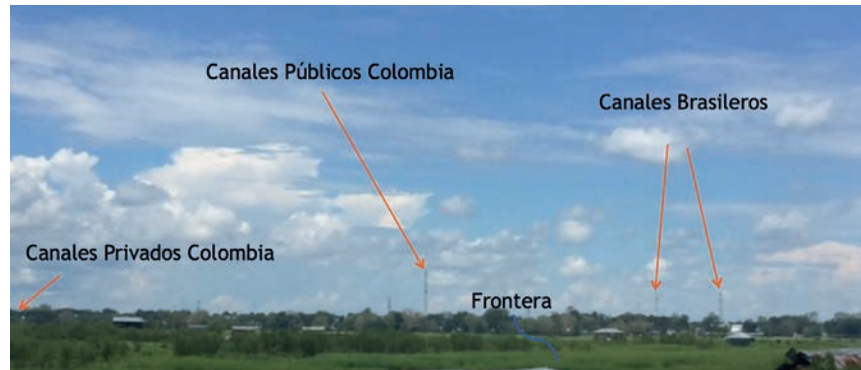
Variable	Unidad
Sensibilidad	dBm
Nivel de potencia de canal (portadora de video)	dBm
Nivel de potencia de canal (portadora de sonido)	dBm
Potencia total de banda	dBm
Relación C/N	dB

En la primera comisión se identificaron tres antenas transmisoras: una para los canales públicos colombianos, una para los privados y otra para los brasileros. En la [Figura 59](#) se muestra una fotografía panorámica de cada una de ellas. De igual forma se definió una ruta hacia el norte de Leticia, donde se exploró la zona urbana y se llegó hasta el kilómetro 18 de la zona rural hacia el noroccidente. Para el área de Tabatinga, se cubrió también la zona urbana y en la zona rural se llegó hasta el kilómetro 7 hacia el suroriente y hasta el kilómetro 17 hacia el nororiente. Para la segunda visita se especificó una ruta en el eje NE-SW que contuviera los puntos dentro de un máximo de  $\pm 5^\circ$  del lóbulo principal de las antenas de televisión.

La ubicación geográfica de todos los puntos explorados se muestra en los [Anexos 2](#) y [3](#), mientras que en la [Figura 60](#) se presentan las rutas que se siguieron para la toma de medidas en ambas visitas. Cabe aclarar que en territorio colombiano las carreteras disponibles para realizar mediciones solo van hasta el kilómetro 18 hacia el norte y dos rutas más con 5 km de distancia, lo cual restringió la toma de mediciones dentro de la selva y en zonas boscosas.

Siguiendo el protocolo de canalización se identificaron ocho canales de televisión analógica bajo el estándar NTSC, de los cuales, seis son colombianos y dos brasileros. De los colombianos se sintonizaron dos privados y cuatro públicos. Con relación a la televisión digital, no se registró ninguna señal.





A. Panorámica desde Perú

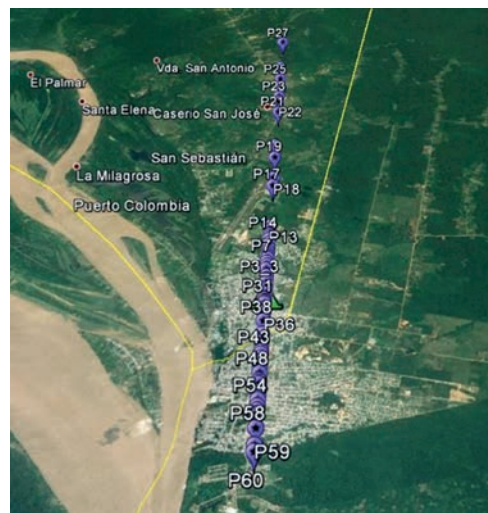


B. Vistas desde Google Earth

Figura 59. Ubicación de las antenas transmisoras de Leticia y Tabatinga.



A. Primera comisión



B. Segunda comisión

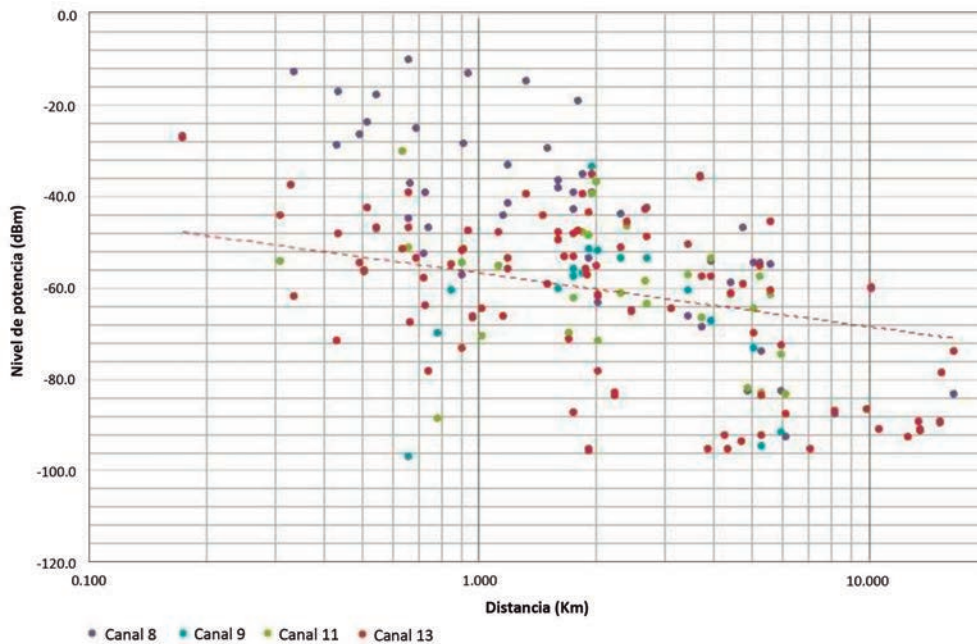
Figura 60. Rutas recorridas para las mediciones de campo.

**Resultados y análisis de las mediciones de campo.** Una vez realizado el análisis de los datos recolectados en las dos comisiones de trabajo se hizo una comparación con los resultados de los datos teóricos de propagación, como se describe a continuación.





En la **Figura 61** se muestran las medidas para los cuatro canales públicos; se puede evidenciar que el canal 8 tiene mayor cobertura que los otros, debido a que es el de menor frecuencia y mayor distancia de propagación. Asimismo, se observa que todos los canales tienen una buena señal entre 1 y 5 km de la antena transmisora, ya que las potencias recibidas están por encima de los -70 dBm. La línea de tendencia muestra que los resultados se comportan de manera logarítmica inversa, que es lo esperado para este tipo de mediciones de potencia.

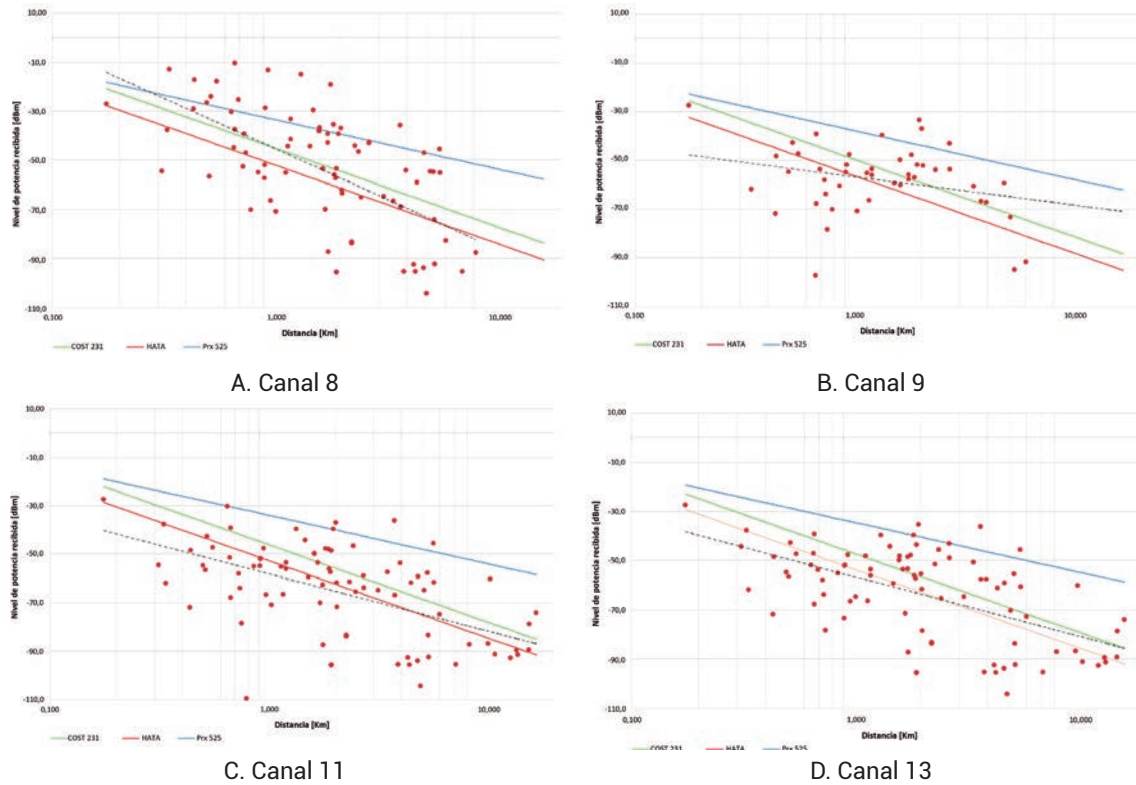


**Figura 61.** Mediciones para los canales públicos.

En todos los casos se observan variaciones de hasta  $\pm 28$  dBm que pueden ser atribuidas a las variaciones en la ganancia de la antena transmisora (debido a su ángulo y lóbulos), como se evidencia en el kilómetro 2, donde hay puntos con -35 dBm y -96 dBm. Adicionalmente, en puntos cercanos a la orilla del río se puede observar que se alcanzan valores inferiores a los -30 dBm, lo cual muestra la influencia que tienen los grandes cuerpos de agua en la propagación de las señales radioeléctricas.

En la **Figura 62** se muestran los modelos de propagación existentes para la señal de televisión analógica de los canales públicos, comparados con los resultados de las mediciones y sus líneas de tendencia. Se puede evidenciar que dentro de los modelos empíricos el que más se ajusta a las mediciones es el Okumura-Hata Rural, ya que el UIT 525 está hasta 20 dB por encima de las líneas de tendencia y del COST 231 entre unos 5 dB y 15 dB. Adicionalmente, es importante rescatar que las líneas de tendencia, particularmente para los canales 11 y 13, tienen una pendiente similar al UIT 525, lo cual llevaría a pensar que el modelo de pérdidas en espacio libre puede ser adecuado para las mediciones.





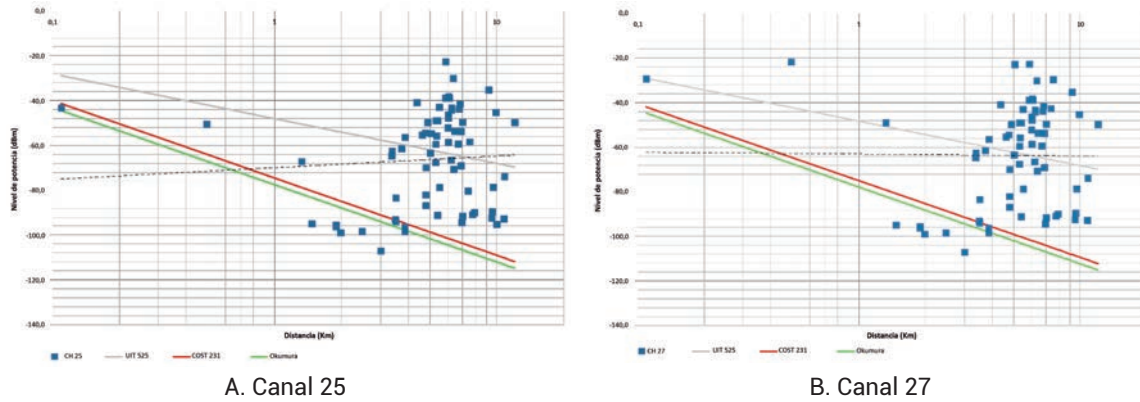
**Figura 62.** Comparación de mediciones con los modelos COST 231, UIT 525 y Okumura-Hata Rural para canales públicos.

En la **Figura 63** se muestran las mediciones para los canales privados. Debido a que la ubicación de la antena está bastante al norte, la mayoría de las mediciones están por encima de los 3 km de distancia, a diferencia de los canales públicos, cuya gran mayoría está por debajo de los 4 km. Esto se debe a que cerca de la antena solo existe una carretera y no hubo forma de realizar mediciones con menores distancias en la primera comisión. Adicionalmente se evidencia que, a diferencia de los canales públicos, la cobertura de los privados es mucho menor, puesto que existe una considerable cantidad de puntos con niveles por debajo de los -70 dBm. También se observa que en puntos ubicados a más de 10 km no se registra señal, pues sus valores estaban por debajo de la sensibilidad del equipo. Las líneas de tendencia descritas en ambas figuras no entregan información fiable debido a la poca cantidad de datos con valores de distancia inferiores a los 2 km, lo cual lleva a que se tengan pendientes positivas o una pendiente muy leve para los canales 25 y 27, respectivamente.

En la **Figura 63** se muestra la comparación de los modelos de propagación existentes para la señal de televisión analógica de los canales privados. Se puede evidenciar que dentro de los modelos empíricos el que más se ajusta a las mediciones es el Okumura-Hata Rural. A diferencia del análisis descrito para los canales privados, en este caso las líneas de



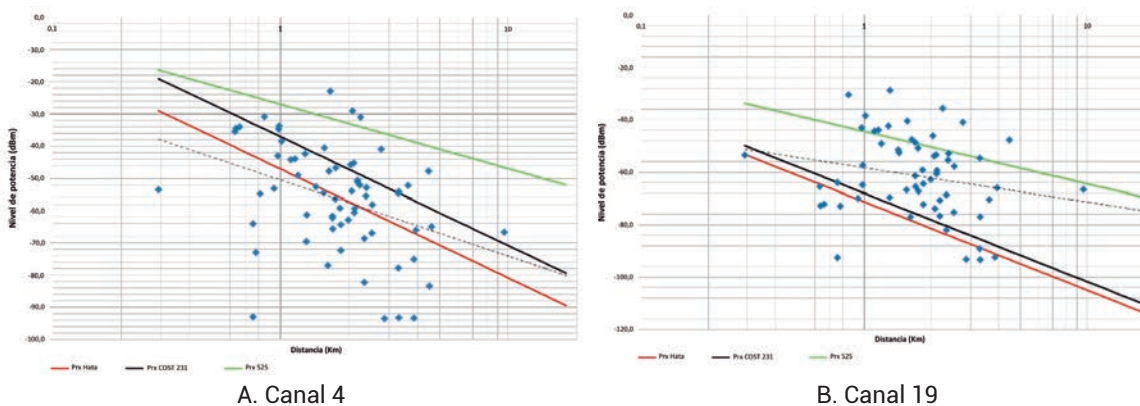
tendencia aportan muy poco a los modelos de propagación utilizados y se evidencia que sus tendencias no siguen ningún modelo en particular.



**Figura 63.** Comparación de mediciones con los modelos COST 231, UIT 525 y Okumura-Hata Rural para canales privados.

Por su parte, según los datos de los canales brasileños de la **Figura 64**, es claro que estos tienen parámetros de propagación muy diferentes, debido al rango de frecuencias de trabajo (67.25 y 501.25 MHz). Sin embargo, los resultados de las tendencias de cada canal, presentados en la **Figura 64**, indican que el canal 19 tiene una pérdida superior a la del canal 4; por el contrario, la tendencia de esta conserva una pendiente mayor. Esto se puede atribuir a la baja cantidad de puntos tomados para dichos canales, que no contribuyen a que las líneas de tendencia sean las adecuadas.

En la **Figura 64** se muestra la comparación de los modelos de propagación existentes para la señal de televisión analógica de los canales brasileños. Se puede evidenciar que, dentro de los modelos empíricos, el que más se ajusta a las mediciones es el Okumura-Hata Rural.

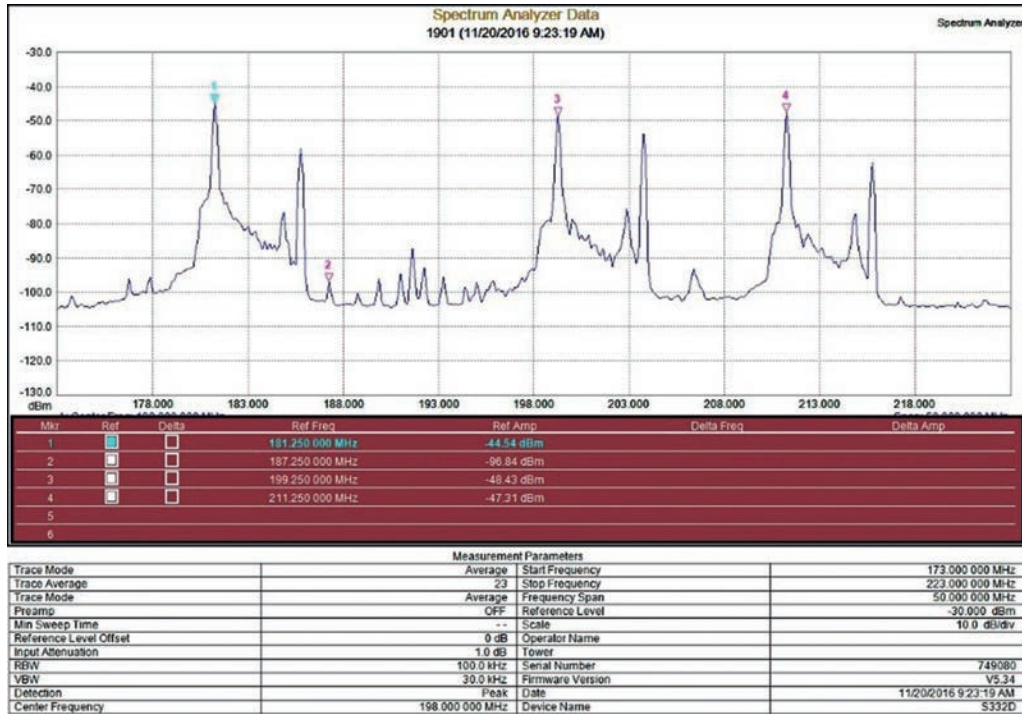


**Figura 64.** Comparación de mediciones con los modelos COST 231, UIT 525 y Okumura-Hata Rural para canales brasileños.





En la **Figura 65** se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con el analizador *Anritsu* y se pueden observar los cuatro canales públicos.



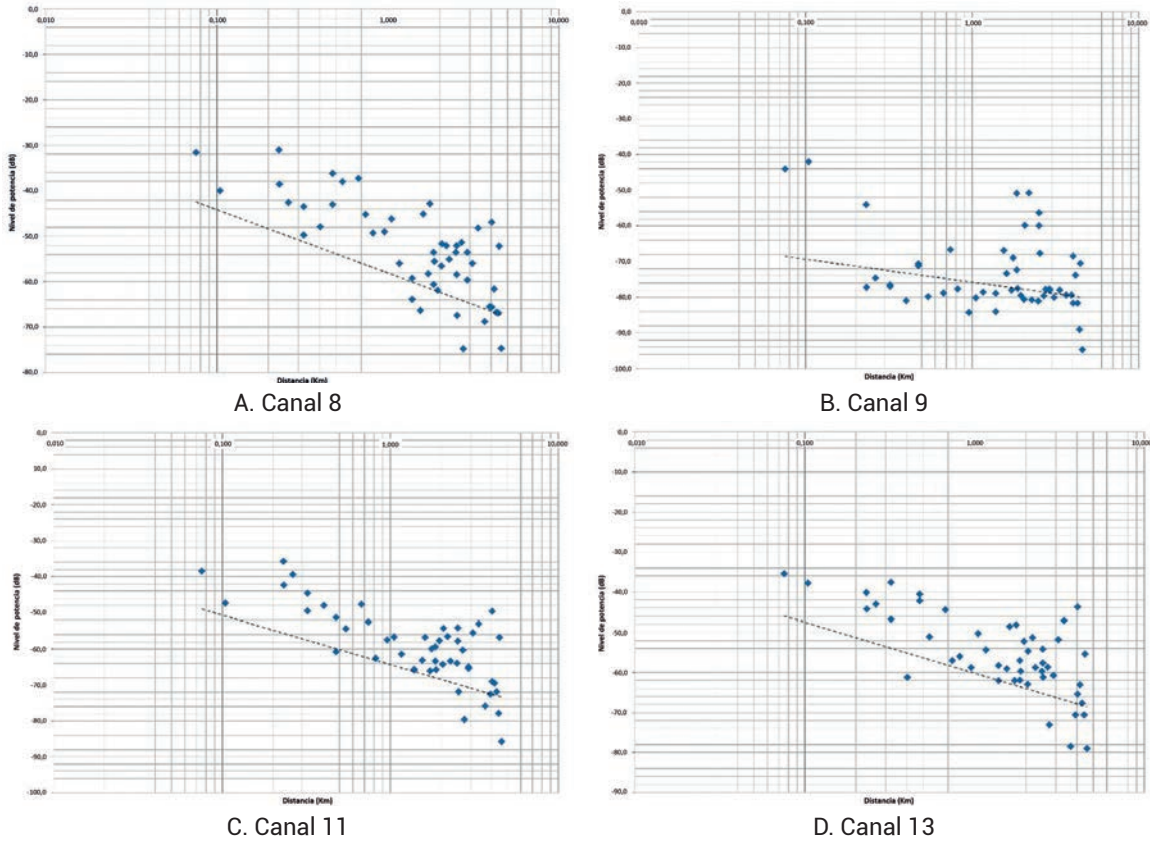
**Figura 65.** Resultados observados en el analizador *Anritsu*.

En la **Figura 66A**, que muestra las mediciones para el canal 8, se evidencia que el nivel de potencia de la señal está dentro de los valores admisibles, ya que la mayoría de los puntos registran en promedio valores entre -30 y -70 dBm. Asimismo se observa que en puntos ubicados a más de 4 km el nivel de potencia de la señal empieza a disminuir. Es importante destacar que entre estos puntos y la antena hay una gran zona boscosa y selvática, lo cual explica el porqué de estos valores. En la **Figura 66B** se muestran las mediciones para el canal 9. Debido a la ganancia del arreglo de antenas, para este canal se registró que los niveles de potencia son más bajos. Se puede observar, además, que gran parte de los puntos tienen un valor de potencia de la señal por debajo de los -70 dBm. También se evidencia que los niveles más altos se obtuvieron en lugares cercanos a la antena. Sin embargo, los mejores niveles de potencia no superan los -40 dBm.

En la **Figura 66C** se muestran las mediciones para el canal 11. Se evidencia un comportamiento similar al del canal 8 y se observa que el nivel de potencia de la señal está dentro de los valores admisibles, ya que la mayoría de los puntos registran en promedio valores entre -30 y -70 dBm. También se evidencia que los niveles más altos de potencia se registran en puntos cercanos a la antena gracias a la línea de visión directa con esta. En los puntos rodeados por la zona boscosa se pueden observar niveles de potencia ba-



jos, mientras que en los puntos cercanos a la orilla del río los valores están por el orden de los -60 dBm. En la **Figura 66D** se muestran las mediciones para el canal 13. Este canal también presenta un comportamiento con niveles de potencia altos. Sus valores están dentro de los valores admisibles, por cuanto la mayoría de los puntos registran entre -30 y -65 dBm.



**Figura 66.** Resultados de las mediciones de la segunda comisión.

**Comparación entre mediciones y simulaciones.** Realizar una comparación de los datos medidos con los resultados de las simulaciones a la luz de los diferentes modelos de propagación (y la caracterización de los mismos para la zona fronteriza colombo-brasilera) es de suma importancia para la formulación de un modelo ajustado, que será un elemento fundamental de la metodología. Por las razones expuestas anteriormente, para el análisis comparativo se decidió utilizar los resultados de los canales públicos colombianos.

En la **Figura 67** se muestra la comparación entre los datos medidos y los simulados con los modelos de propagación para todos los canales públicos; se puede observar que al igual que el análisis de las simulaciones, el modelo de propagación que más se ajusta a los cuatro canales es el Okumura-Hata.



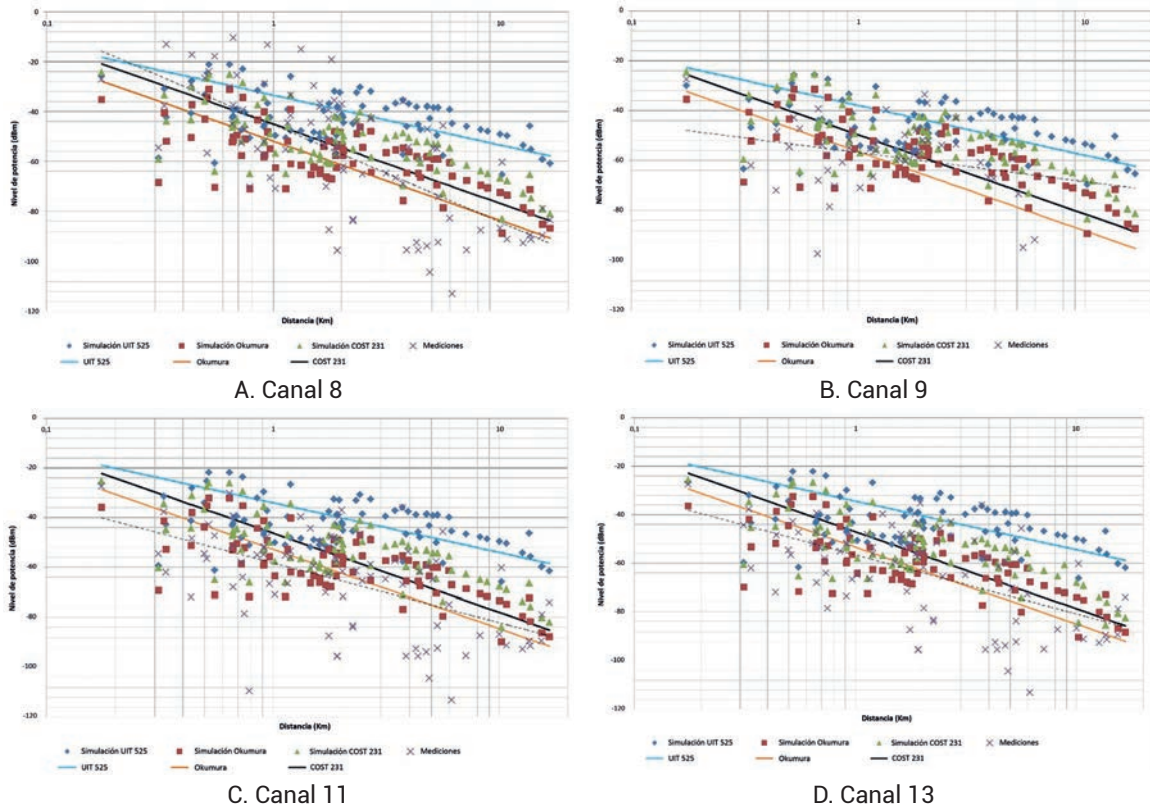


Figura 67. Comparación entre simulaciones y mediciones para los canales públicos.

En la **Figura 68** se muestra la comparación entre los datos medidos y los simulados con los modelos de propagación Okumura-Hata y su modelo teórico para el canal 8 (sin tener en cuenta la topografía). En esta imagen se evidencia la relación entre los puntos simulados (cuadros rojos) y los valores medidos en campo (cruces azules), y sus respectivas líneas de tendencia.

En la gráfica, la relación presentada entre los datos medidos y los simulados evidencia el impacto de las condiciones selváticas en la señal medida, pues dichos valores caen por debajo de los valores simulados. Estas diferencias pueden deberse tanto a las características geográficas y topográficas de la zona como a los parámetros de la antena de transmisión (ganancia de los lóbulos), así como a aspectos propios de la propagación que no tiene en cuenta el simulador utilizado, como los cuerpos de agua (río Amazonas), los tamaños reales de los árboles, su follaje particular y los fenómenos reflexión, difracción y dispersión, que no son considerados en el nivel micro.

Del mismo modo, en la **Figura 69** se evidencia que la diferencia entre los valores simulados y medidos alcanza hasta los  $\pm 50$  dB, con una desviación estándar de 20 dB. También se puede observar que a medida que aumenta la distancia, las diferencias cambian de valores positivos a valores negativos, indicando que la pendiente de la curva de propagación del modelo debe ser igualmente ajustada.



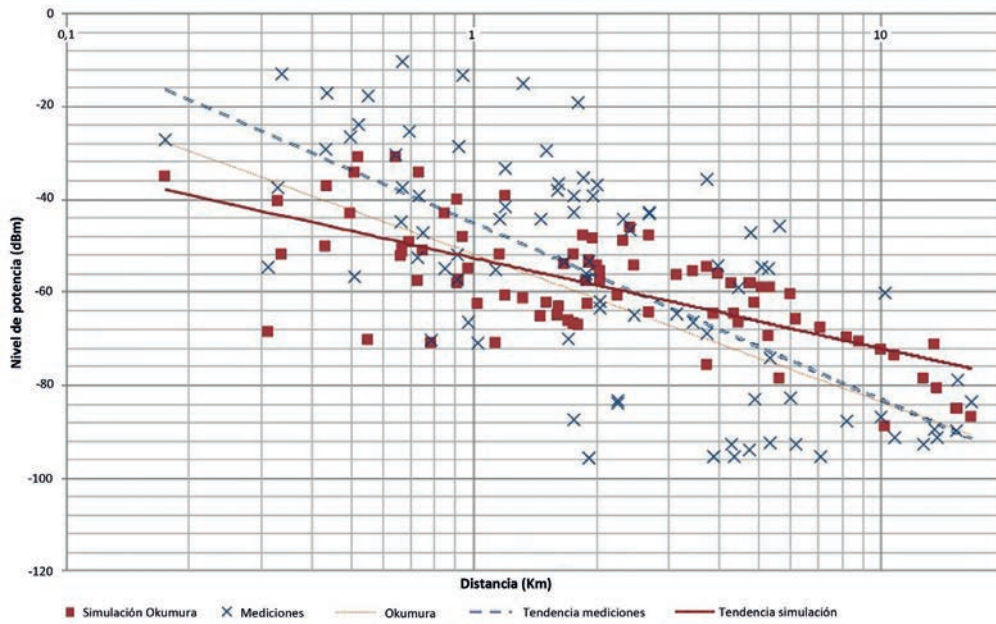


Figura 68. Comparación entre datos medidos y simulados para el canal 8 con Okumura.

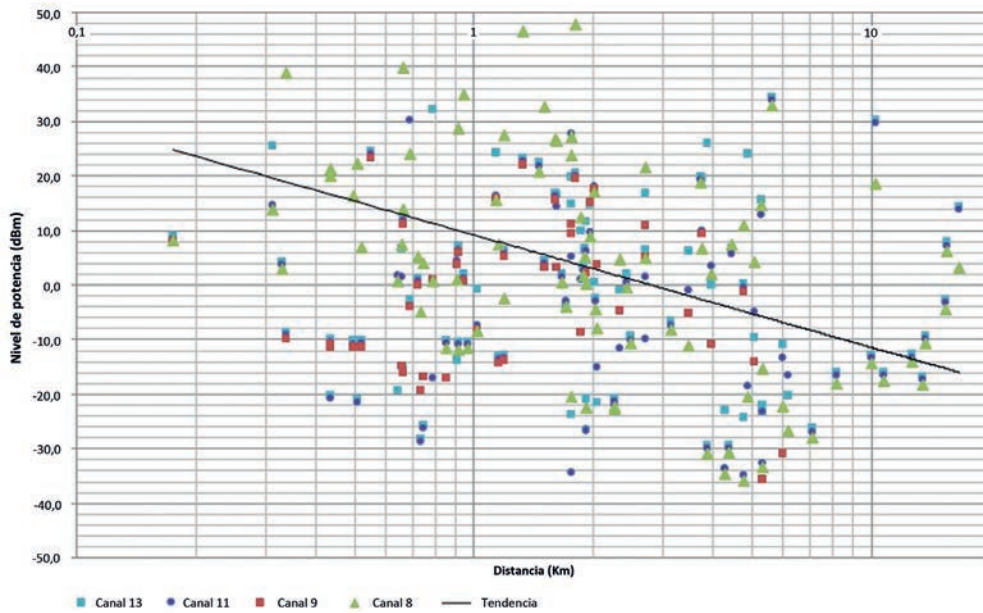


Figura 69. Diferencias entre datos simulados y medidos para los canales públicos.

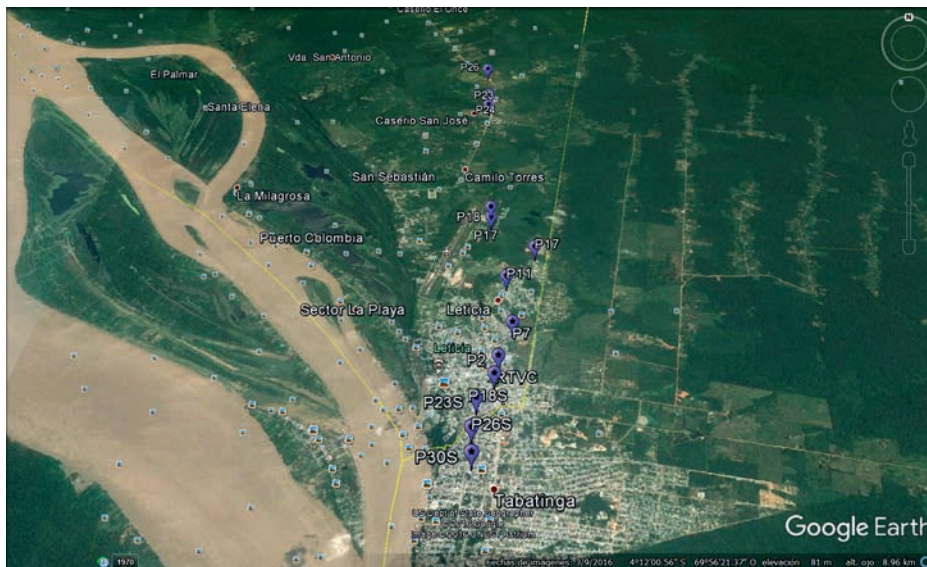
Todo lo anterior lleva a la necesidad de proponer un modelo de propagación específico para la zona de frontera con ambientes de selva y bosques tropicales, ya que en las simulaciones no se incluyó la influencia de dichos fenómenos descritos previamente.





**Mediciones de telefonía en la frontera.** Para el análisis de las señales de telefonía móvil que se encuentran en la banda de 850, 900 y 1900 MHz en Leticia, Tabatinga y sus alrededores se planteó un protocolo encaminado a analizar la ubicación de las antenas colombianas, el plan de canalización y propagación. Los instrumentos usados para el desarrollo de las mediciones fueron el analizador de espectros *Tektronix MDO-3000* y el *Anritsu S332D*, con antenas apropiadas para las bandas de 800 y 1900 MHz.

El protocolo desarrollado se incluye en el **Anexo 3** y fue aplicado para los 12 puntos de medición en Leticia y Tabatinga que siguen la trayectoria mostrada en la **Figura 70**. Se tomaron varias medidas de la ubicación de antenas, nivel de potencia para las tres bandas, ángulo y azimut de las antenas en cada punto, según lo definido en el protocolo.



**Figura 70.** Puntos definidos para la toma de mediciones de telefonía móvil. Fuente: Google Earth.

En estudios previos a la visita se identificó que los operadores colombianos que tienen actualmente cobertura de GSM (2G) y UMTS (3G) en Leticia son Claro, Movistar, Virgin Mobile; y Tigo, ETB y Uff. Mientras que los operadores brasileños que tienen cobertura de GSM (2G) son Claro, Oi, Vivo y Tim. Sin embargo, no se encontró información que indicara la existencia del servicio LTE (4G) en ningún operador de Colombia o Brasil. Las frecuencias asignadas en ambos países para cada operador se muestran en las **Tabla 35** y **36**, respectivamente.

Como resultado del proceso exploratorio realizado en la segunda comisión se lograron detectar nueve torres de telefonía móvil; sin embargo, no fue posible la identificación del servicio que presta cada una de ellas debido a que los equipos usados no lo permitían. Las características de las antenas encontradas se muestran en la **Tabla 37**.



**Tabla 35.** Frecuencia de operadores en Colombia.

Operador	850 UL	850 DL	1900 UL	1900 DL
Movistar	835.0-845.0 846.5-849.0	880.0-890.0 891.5-894.0	1867-1877	1885-1890
Claro	824.0-835.0 845.0-846.5	869.0-880.0 890.0-891.5	1852-1855 1860-1865	1877-1885
Tigo	-	-	1850-1852 1855-1860	1890-1909

**Tabla 36.** Operadores de telefonía móvil en Tabatinga.

Operador	Frecuencia
Oi	GSM 900 y 1800 MHz
Claro	GSM 1800 MHz
Tím	GSM 1800 MHz
Vivo	GSM 850 MHz

**Tabla 37.** Características de la antena transmisora de telefonía móvil en Leticia y Tabatinga.

Antena	Ubicación		Altura (m)	Ángulo (°)	N.º sectores
	LAT-N (WGS84)	LONG-W (WGS84)			
1	4°12'59" S	69°56'13" W	30	120	3
2	4°12'14" S	69°56'23" W	25	120	3
3	4°12'15" S	69°56'27" W	25	90	4
4	4°12'51" S	69°56'31" W	25	90	4, pero solo 3 habilitados
5	4°13'15" S	69°56'32" W	30	90	4
6	4°13'13" S	69°56'35" W	25	120	3
7	4°13'1" S	69°56'28" W	25	90	3
8	4°06'49" S	69°57'26" W	25	120	3

Algunos de los resultados de las mediciones se muestran en la **Figura 71**. En la **Figura 71A** se pueden observar los UL y DL de los diferentes operadores que funcionan en la banda de 850 MHz; se reconoce un ancho de banda en DL de 24.5 MHz. Por otro lado, la **Figura 71B** muestra los resultados obtenidos en la banda de 900 MHz. Finalmente, en la **Figura 71C** se puede observar el UL y DL de los diferentes operadores que funcionan en la banda de 1900 MHz. Para el UL, el valor más alto se registra en 1945 MHz con -76.20 dBm.







## Capítulo 7. Modelo de propagación para zonas fronterizas colombianas



El análisis y ajuste de un modelo de propagación para la zona fronteriza debe ser una prioridad en la metodología debido a que este es un elemento de suma importancia en el cálculo y predicción de los valores de interferencia medidos en un *software* de simulación que permita determinar con anticipación si se puede o no instalar un servicio o un transmisor en la frontera, teniendo en cuenta que es un parámetro muy particular para las condiciones de esta.

La caracterización del modelo se realizó tomando en cuenta las mediciones de potencia recibida en la zona de Leticia, Tabatinga y sus alrededores durante la primera comisión y se ajustó con los nuevos datos de la segunda comisión (noviembre de 2016); las mediciones pusieron en evidencia las implicaciones de los bosques y de los grandes cuerpos de agua (como el río Amazonas) frente a la cobertura y amplitud de señal recibida.

### Metodología de la caracterización

Para realizar la caracterización del modelo de propagación se partió del análisis de los resultados de las mediciones de campo electromagnético presentadas en la sección anterior. Estos resultados fueron comparados con algunos modelos de propagación empíricos, ya sean tradicionales para propagación en ambientes suburbanos o rurales (Okumura-Hata, el COST 231 y el UIT 525), o con modelos específicos que consideran las implicaciones de la propagación a través de la vegetación (Weissberger, UIT y el Nanyang); dichos modelos están basados en el modelo de propagación de plano tierra (PE), más una atenuación debida al tránsito transversal de las ondas electromagnéticas a través de los árboles. Cabe anotar que ambos grupos de modelos están concebidos en enfoques diferentes y por ende las ecuaciones relacionadas con cada uno de ellos funcionan de manera diferente.

Posteriormente, se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante un ajuste de curvas aplicando las ecuaciones relacionadas en cada metodología de los modelos de propagación descritos. Para este análisis se usó el *Curve Fitting Toolbox* de MATLAB, el cual permite ajustar las curvas con base en ecuaciones definidas por el usuario. Este *Toolbox* también permite realizar un análisis regresivo de datos empíricos con modelos de solución parametrizables con el fin de mejorar el ajuste de las curvas y sus ecuaciones. Como resultado se tiene la ecuación de pérdidas por propagación, ajustada a modelos de propagación de la selva amazónica y a los errores asociados a los datos medidos en campo.

### Comparación de los modelos de propagación

El modelo de propagación UIT-R P525 se puede considerar como un modelo de propagación optimista debido a que no incluye las pérdidas que son consecuencia del terreno y



de otros aspectos que sí son incluidos en los modelos de propagación empíricos. Por su parte, los modelos de propagación tradicionales que se presentan para ambientes suburbanos y rurales, como los modelos Okumura-Hata y COST 231, se caracterizan por basarse en la fórmula de la **Ecuación 36**.

$$L(dB) = A + B * \log(f_c) - C * \log(h_{tx}) - f(h_{rx}) + D * \log(d)$$

**Ecuación 36.**

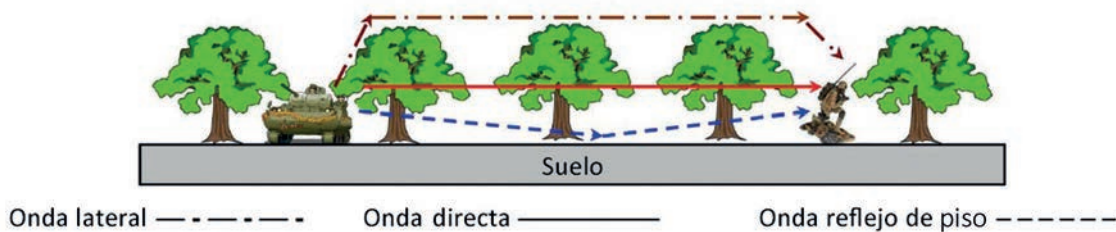
Donde A es un factor de compensación de la fórmula empírica de modelos Okumura-Hata, dependiendo del tipo de terreno, B es un factor de compensación del impacto de la frecuencia y de la topografía en el modelo de propagación, y C se relaciona con la altura de la antena y su impacto en el modelo  $f(h_{rx})$  es una función determinada por la altura de la antena receptora, por el tipo de terreno y por el tamaño de la ciudad en la que se implementa el modelo. Y, finalmente, D es un factor de compensación de la distancia.

Las diferencias entre el modelo Okumura-Hata y el COST 231 se tienen solamente en los términos A y B, ya que los valores C y D son comunes en ambos modelos, como se muestra en la **Tabla 38**.

**Tabla 38.** Valores de compensación de Okumura-Hata y COST 231.

Modelo	A	B	C	D
Hata	69.55	26.16	13.28	44.9-6.55*Log(H <sub>tx</sub> )
COST 231	46.30	33.90	13.28	44.9-6.55*Log(H <sub>tx</sub> )

Para el caso de los ambientes donde se incluyen zonas boscosas se definen en principio tres metodologías de propagación. La primera está asociada a la propagación por el techo de los árboles o por el borde lateral del bosque y se llama onda lateral; la segunda está relacionada con el paso transversal de las señales electromagnéticas entre los árboles del bosque y se denomina onda directa; y la tercera es la que se desarrolló entre la parte inferior de las copas de los árboles y el suelo y se denomina onda de reflejo de piso. La **Figura 72** muestra los tres métodos de propagación descritos.



**Figura 72.** Mecanismos de propagación a través de la vegetación.  
Fuente: Song Meng, Hui Lee y Chong Ng (2009).



Los modelos más aceptados para la propagación de señales radioeléctricas a través de zonas boscosas están basados en la metodología de onda de reflejo de piso, donde la señal matemáticamente está descrita mediante el modelo PE, que asume que las antenas de transmisión y recepción están por debajo de la copa de los árboles y que la señal viaja dentro de un "túnel" entre el piso del bosque y la parte inferior de la copa de los árboles. De esta manera es relevante describir la ecuación de plano de tierra que tiene en cuenta las alturas de las antenas transmisoras y receptoras, tal como se muestra en la **Ecuación 37**, en la que todos los valores están definidos en metros.

$$L_{PE}(dB) = 40 * \log(d) - 20 \log(h_{tx}) - 20 \log(h_{rx})$$

**Ecuación 37.**

Como se puede ver en la **Ecuación 37**, no se tienen en cuenta las implicaciones de la frecuencia en el modelo de propagación, mientras que está variable si se tiene en cuenta en los modelos Okumura-Hata y COST 231. De modo que en las propuestas del modelo de pérdidas por propagación con afección de la vegetación se deben sumar, al modelo de pérdidas de PE, valores adicionales que están determinados por el tamaño promedio de las hojas, el tamaño medio de los troncos de los árboles y el espaciamiento entre los mismos.

Song Meng, Hui Lee y Chong Ng (2009) concluyen que los modelos de pérdidas son de la forma que se muestra en la **Ecuación 38** y definen que los parámetros A, B y C se determinan de manera empírica basados en las características de cada bosque. Para este caso,  $d$  es la distancia que debe atravesar la señal en el bosque y  $f$ , la frecuencia de operación. Los modelos desarrollados a partir de esta ecuación son diversos y están descritos en el **Capítulo 3**.

$$L_{Bosque}(dB) = A * f^B * d^C$$

**Ecuación 38.**

La **Figura 73** presenta un paralelo de los modelos de propagación tradicionales y de los basados en vegetación comparados con las mediciones de televisión análoga del canal 13 realizadas en Leticia y Tabatinga. En ella se pueden visualizar claramente dos tendencias: 1) para los modelos tradicionales representados en líneas continuas, los datos medidos están por debajo de cada uno de los tres modelos. 2) por su parte, para los modelos basados en vegetación identificados con las líneas punteadas, la tendencia de la pendiente de los puntos medidos (en línea doble) es menos pronunciada que la pendiente de los modelos. De lo anterior podemos concluir que los datos medidos no siguen estrictamente un tipo de modelo de propagación; por ende, se debe realizar un estudio comparativo de los datos medidos contra los modelos de propagación en el que se evalúen los parámetros de ajuste de curvas.



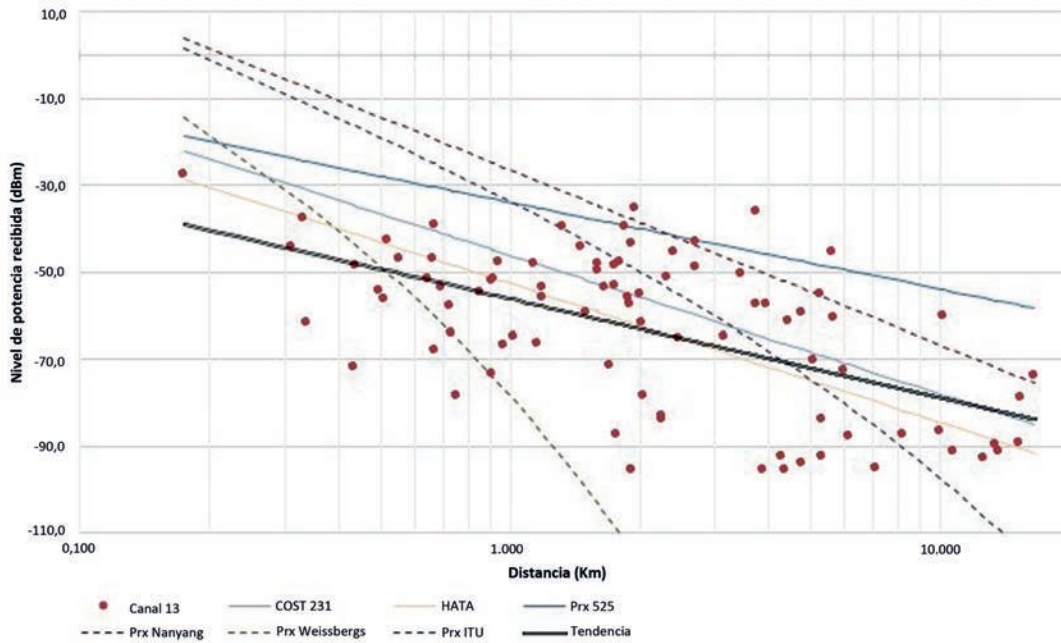


Figura 73. Comparación de datos medidos y modelos de propagación para el canal 13.

### Ajuste de curvas

Para realizar el ajuste de los datos medidos, estos se comparan con el ajuste de los modelos de propagación empíricos tradicionales y con implicaciones de la vegetación con el fin de hallar los errores mínimos. Posteriormente se realizan los ajustes de las curvas de datos y se comparan sus coeficientes y las estadísticas de ajuste que se describen a continuación.

Este proceso se realiza con el *Curve Fitting Toolbox* de MATLAB, el cual permite ajustar datos, tanto de curvas como de superficies de datos. Para este proyecto solo se evalúan las superficies de datos, ya que se calculan las pérdidas de propagación ( $L$ ) en función de la distancia y de la frecuencia de los diversos canales de televisión. Valores como altura de antenas, altura de edificios, bosques u otros elementos adicionales quedan por fuera del análisis en la presente investigación.

Para evaluar la validez del ajuste de una curva se pueden explorar diversas estadísticas. El *Toolbox* de MATLAB proporciona cuatro métodos, a saber: i) suma de los cuadrados debido al error (SSE), ii) *R-Square* iii) Ajuste del *R-Square* y iv) raíz media del cuadrado del error (RMSE) (MathWorks, 2016). Sin embargo, solo se usarán los siguientes métodos:

1. **R-Square:** mide qué tan exitoso es el ajuste de la curva a la hora de validar las variaciones de los datos medidos contra dicho ajuste; este es definido como la relación entre la suma total de los cuadrados de la regresión sobre la suma total de los cuadrados. Debido a que *R-Square* es una relación, sus valores están entre 0 y 1. Para dar un ejemplo,



un valor de 0.8234 significa que el ajuste valida el 82.34 % del total de las variaciones de los datos respecto al promedio; por lo tanto, entre más cercano a 1, mejor el ajuste. La **Ecuación 39** describe dicha relación.

$$R_{square} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2}$$

**Ecuación 39.**

**2. Raíz media del cuadrado del error (RMSE):** calcula la desviación estándar del error de los datos y compensa con los valores de libertad del método anterior, donde  $n$  es el número de datos ajustados y  $m$  es el número de coeficientes ajustados estimados de los datos ajustados. Entre menor sea el valor del RMSE, mejor será el ajuste de la curva. La **Ecuación 40** muestra esta desviación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n w_i (y_i - \bar{y})^2}{n-m}}$$

**Ecuación 40.**

La **Tabla 39** presenta los errores de los modelos de propagación usados con el fin de tener una *línea base de error* para el ajuste.

**Tabla 39.** Validación de parámetros de ajuste de los modelos de propagación.

Tipo	Modelo de propagación	R-Square	RMSE
Empíricos tradicionales	HATA	-0.6296	22.24
	ITU 525	-40.605.	114.14
	COST 231	-0.7975	25.61
Vegetación	Lateral ITU	-65.691	144.51
	<i>Fitted</i> ITU	-65.502	144.31
	Weissberg	-38.699	111.51

### Modelos de propagación propuestos para la frontera colombo-brasilera

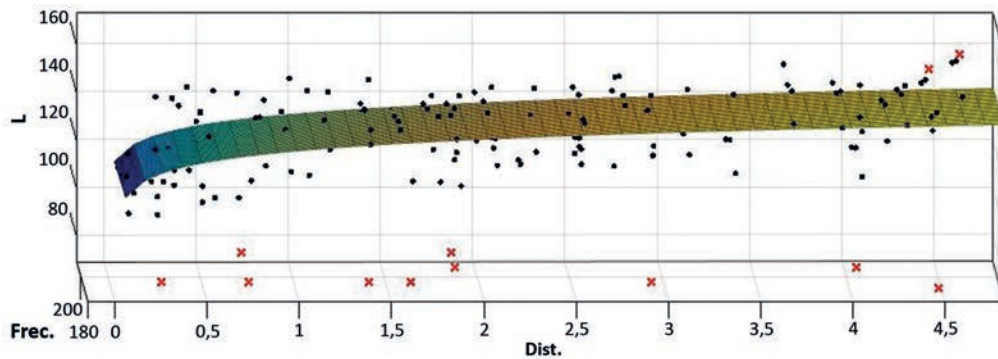
Esta sección presenta el desarrollo del modelo de propagación propuesto para la frontera colombo-brasilera, extrapolable a otras situaciones fronterizas en las que predominen ambientes de selva y bosques tropicales. Teniendo en cuenta que el análisis realizado en la sección *Comparación entre Mediciones y Simulaciones* (sección 6.2.3) consideró dos tipos de modelos de propagación (modelos empíricos tradicionales y modelos modificados según la vegetación), se puede realizar una combinación de dichos modelos para tener un mejor ajuste a los resultados de las mediciones de campo.



**Propuesta de modelo basado en modelos empíricos.** Aplicando la ecuación básica de los modelos empíricos descrita en la **Ecuación 41** y corriendo el modelo en el *Curve Fitting Toolbox* con los resultados de las mediciones en campo y sin ningún tipo de restricciones, los valores encontrados de los coeficientes se presentan en la **Figura 74** y en la **Tabla 40**.

$$L(dB) = A + B * \log(f_c) - C * \log(h_{tx}) - E + D * \log(d)$$

**Ecuación 41.**



**Figura 74.** Resultado del ajuste de curva para modelos empíricos.

**Tabla 40.** Resultados de coeficientes de ajuste basado en modelos empíricos.

Parámetro	Valor	Rango de evaluación
A	83.7	-4.575e + 15, 4.575e + 15
B	-28.47	-55.13, -1.812
C	-44.16	-9.935e + 14, 9.935e + 14
D	6.836	5.266, 8.406
E	5.785	-2.367e + 07, 2.367e + 07

Para este caso se tiene que los parámetros de *R-Square* y *RMSE* son de 0.2508 y 14.891, respectivamente. Estos valores son mucho mejores que los encontrados en la línea base que se estableció previamente.

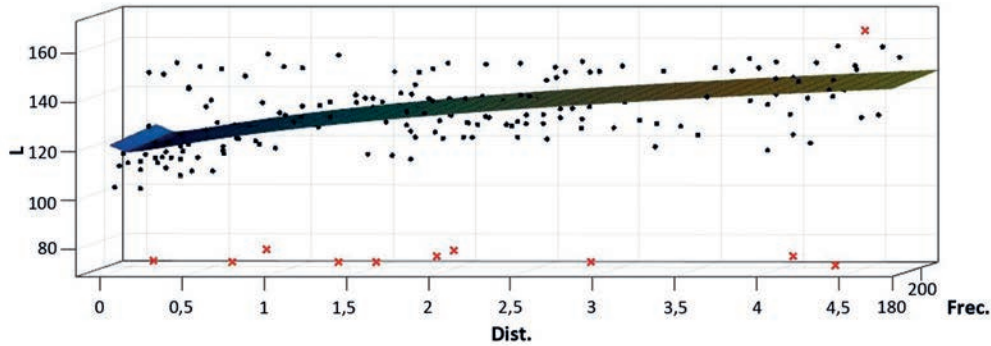
**Propuesta de modelo considerando el impacto de la vegetación.** Continuando con la metodología del modelo empírico de la sección anterior, se corrió el modelo de pérdidas basado en la **Ecuación 42**.

$$L(dB) = L_{PE} + A * f^B * d^C$$

**Ecuación 42.**



En la **Figura 75** y en la **Tabla 41** se muestran los resultados del ajuste de curvas basados en el modelo de impacto de la vegetación. Adicionalmente, se encontró que los parámetros de *R-Square* y RMSE son de 0.0003 y 16.637, y representan un ajuste de la curva comparativamente mejor que el ajuste de los modelos empíricos.



**Figura 75.** Resultado de ajuste de curva para modelo de vegetación.

**Tabla 41.** Resultados de coeficientes de ajuste basado en modelos de vegetación.

Parámetro	Valor	Rango de evaluación
A	99.7	34.81, 165.2
B	0.1681	-0.2411, 0.209911
C	0.13	-0.136, -0.2241

**Propuesta de un modelo combinado.** Como se mencionó anteriormente, los modelos empíricos y los basados en impacto de vegetación no siguen completamente los datos medidos en el sistema; por ende, se propone un modelo que los combine a los dos, ya que el de impacto de la vegetación es en realidad una suma del modelo de pérdidas de tierra y una función de la trayectoria de la señal a través de un bosque. Esta propuesta se evaluó en la **Ecuación 43**.

$$L(dB) = A + B * \log(f_c) - C * \log(h_{tx}) - E + D * \log(I_{uv} * d) + F * f_c^G * ((1 - I_{uv}) * d * 1000)^H$$

**Ecuación 43.**

En esta propuesta se introduce el índice  $I_{uv}$  (Índice Urbano-Vegetación), que es la relación entre las distancias de la señal propagada dentro de las zonas urbanas o suburbanas y la distancia de la porción de propagación dentro de la selva. En específico, si el índice es de 1, toda la propagación se hace por fuera del bosque, y si el índice es de 0, la propagación en su totalidad se realiza a través del bosque. Adicionalmente, se hace importante clarificar que la distancia de los modelos empíricos se da en kilómetros, mientras que en los

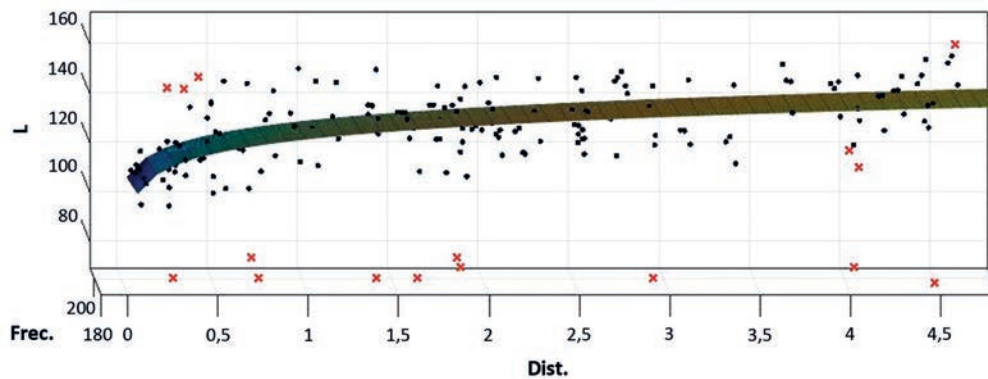




de vegetación se da en metros; por ende, la propuesta maneja la distancia en kilómetros y hace la conversión por mil en la sección del modelo basado en vegetación.

Para el análisis realizado en la zona de estudio se usó un índice  $I_{uv} = 0.8$ . Este valor se ajustó de manera porcentual respecto a la distancia entre la antena transmisora y el punto receptor en zona urbana y en zona rural con selva. Basado en la segunda toma de mediciones, se tomó 80 % de zona urbana y 20 % de zona rural. Además se completó el análisis asumiendo un área circular, donde el área urbana entre Leticia y Tabatinga es de 13 km<sup>2</sup>, lo cual da un radio de 2.03 km. Para calcular el área de cobertura, que incluye tanto la zona rural como la urbana, se tomó la distancia mínima de cobertura donde la sensibilidad del sistema fuera superior o igual a -70 dBm (esto corresponde a un radio de 2.52 km). El porcentaje de área urbana sale de la relación entre estos dos radios, lo cual da 80 %; por lo tanto, el porcentaje de área rural selvática será del 20 %.

Los resultados obtenidos son presentados en la **Figura 76** y en la **Tabla 42**; para este caso los resultados de los parámetros de evaluación son  $R\text{-Square} = 0.3056$  y  $RMSE = 14.596$ , lo que muestra una leve mejora en el ajuste del modelo.



**Figura 76.** Resultado de ajuste de curva para modelo combinado.

**Tabla 42.** Resultados de coeficientes de ajuste basado en el modelo combinado.

Parámetro	Valor	Rango de evaluación
A	45.96	-2.346e + 30, 2.346e + 30
B	33.56	-2.273e + 04, 2.263e + 04
C	15.5	-5.653e + 30, 5.653e + 30
D	9.18	-6623, 6623
E	1.40	-3.459e + 05, 3.463e + 05
F	0.5	-81.43, 81.64
G	0.01	-24, 24.06
H	0.5084	-2.838e + 31, 2.838e + 31



**Comparación y análisis de propuestas con modelo combinado.** Una vez realizadas las propuestas de ajustes de los modelos empíricos tradicionales, con impacto de la vegetación y una propuesta de modelo combinado, se encontró que el mejor ajuste se presenta, precisamente, en este último. El valor de *R-Square* de 0.3056 (el 30.56 % de los datos se ajustan a la ecuación) es el más alto de los tres y luego está el de impacto de la vegetación. Resultados similares se observan para el parámetro RMSE en la **Tabla 43**.

**Tabla 43.** Comparación de parámetros de evaluación de los modelos ajustados.

Modelo	<i>R-Square</i>	RMSE
Empírico	0.2508	14.891
Vegetación	0.0003	16.637
Combinado	0.3056	14.596

Los valores finales se muestran más robustos que los encontrados en la primera comisión al haber mejorado aspectos tales como la calidad de las antenas, la directividad y ganancia de las mismas, y la puesta en marcha de más mediciones en cada punto con una menor distancia entre ellos.

Se puede concluir que la porción de la ecuación del modelo combinado que contiene la parte empírica es más influyente en el modelo que la porción por impacto de vegetación. Esto podría deberse a la topología de la zona donde se realizaron las mediciones, pues en Leticia y Tabatinga las antenas de televisión están en ambientes urbanos, dentro de los pueblos, y la gran mayoría de los puntos de medición se realizaron dentro de zonas urbanas en ambas ciudades; por ende, el impacto de la propagación entre el bosque o la selva solo se puede observar en aquellos puntos que están muy alejados (**Figura 77**), lo cual en la metodología de ajuste de curva presenta un reto para el proceso de ajuste de curvas, así como para la determinación de la relación entre propagación en selva y propagación sobre zona suburbana. De tal manera se presenta el modelo de pérdidas que se describe en la **Ecuación 44**.

Todo lo anterior explicaría las variaciones de los datos obtenidos en la frontera y las diferencias con los datos simulados o los modelos de propagación usados. Esto impone limitaciones al ajuste del modelo y explica en parte los valores obtenidos de evaluación de parámetros, tanto de *R-Square* como de RMSE.

La verificación del modelo de propagación propuesto se realizó con los datos recolectados en el segundo viaje a la frontera colombo-brasilera. Como se mencionó anteriormente, en este estudio de campo se consideraron únicamente los datos de los canales 8, 9, 11 y 13 en el eje norte-sur de la antena de los canales públicos colombianos.





**Figura 77.** Implicaciones de la selva en un modelo ajustado combinado. Fuente: Google Earth.

$$\begin{aligned}
 L_{propuesto}(dB) &= 45.96 + 33.56 \log(f_c) - 15.5 \log(h_{Tx}) - 1.40 + 9.18 \log(I_{uv} * d) \\
 &+ 0.5 * f^{0.01} * ((1 - I_{uv}) * d * 1000)^{0.5084}
 \end{aligned}$$

**Ecuación 44.**

En la **Figura 78** los datos recolectados en la segunda visita son comparados con los tres modelos de propagación evaluados previamente, incluyendo el modelo de plano de tierra, que sirve como un límite inferior a todos los modelos. Adicionalmente se presenta la línea de tendencia de los datos medidos con el fin de comparar los modelos; la **Figura 78** muestra que el comportamiento del modelo de propagación vegetal incrementa sus pérdidas de manera significativa en comparación con los otros. Sin embargo, no se pudieron hacer predicciones para distancias inferiores a los 800 metros debido a que se encuentran desviaciones superiores a los 50 dB.

Por su parte, el modelo empírico de larga distancia presenta un comportamiento más cercano a los datos en comparación con el de vegetación y su pendiente es menor que la del plano tierra, por lo que a distancias superiores a 8 km, los valores predichos tendrían menos pérdidas, lo cual no sería congruente.

El modelo combinado propuesto se ajusta mucho más que los otros a los datos recolectados, específicamente en distancias entre los 400 y 10000 metros. Esto se puede apreciar en la comparación del modelo con la línea de tendencia de los datos medidos. Adicionalmente, el combinado presenta un incremento leve de las pérdidas a medida que se evalúa la distancia dentro de la zona boscosa, mostrando así que los valores de onda lateral predominan sobre los otros componentes de propagación, tal y como se esperaba, pero sin ser el único componente de pérdidas.



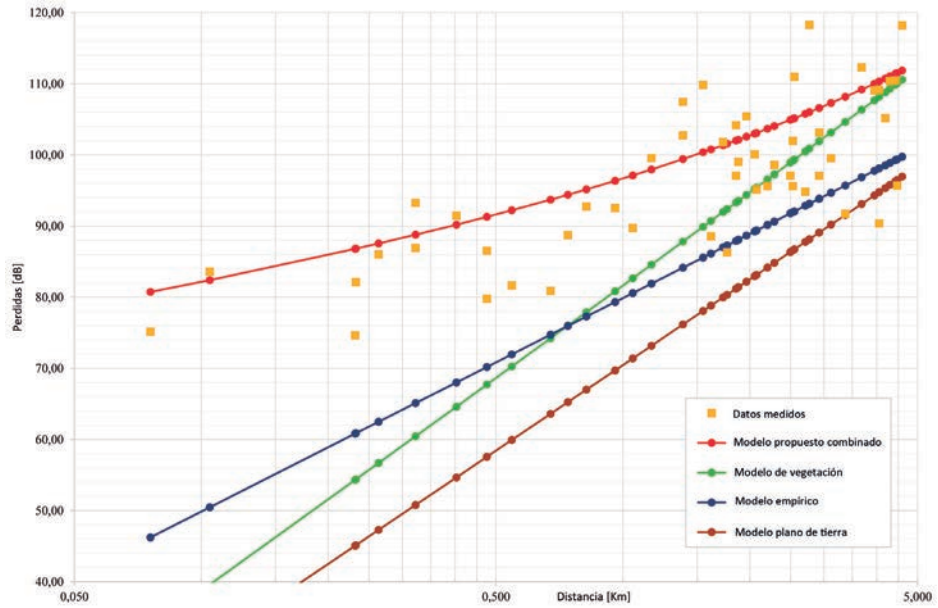


Figura 78. Comparación de modelos propuestos con los datos medidos.

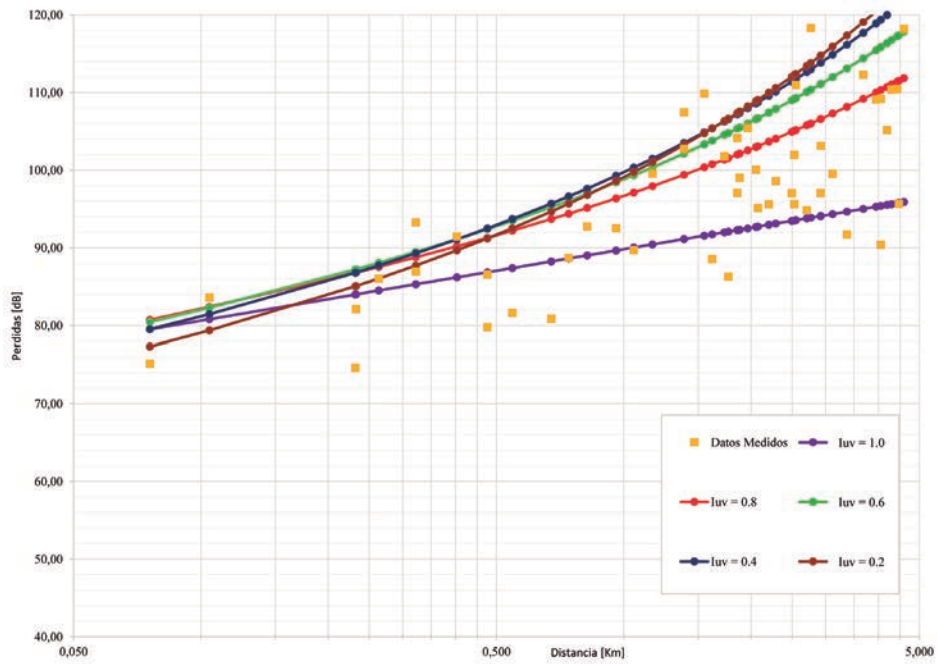


Figura 79. Evaluación del Índice Urban-Vegetation ( $I_{UV}$ ).



Finalmente, en la **Figura 79** se compara la relación del índice  $I_{uv} = 1$ , donde no se consideran las implicaciones del bosque y su valor es muy similar a los encontrados en el modelo empírico. Este valor determina el límite inferior de las pérdidas, así como la predicción de valores en cortas distancias o zonas no selváticas. A medida que el índice decrece, es decir, cuando más selva es considerada en el análisis, las pérdidas se incrementan sustancialmente para distancias superiores a los 2 km. Para el caso de  $I_{uv} = 0.2$ , la tendencia para distancias mayores que 2 km es similar al comportamiento encontrado en el modelo de vegetación y por lo tanto mantiene coherencia con los datos medidos.



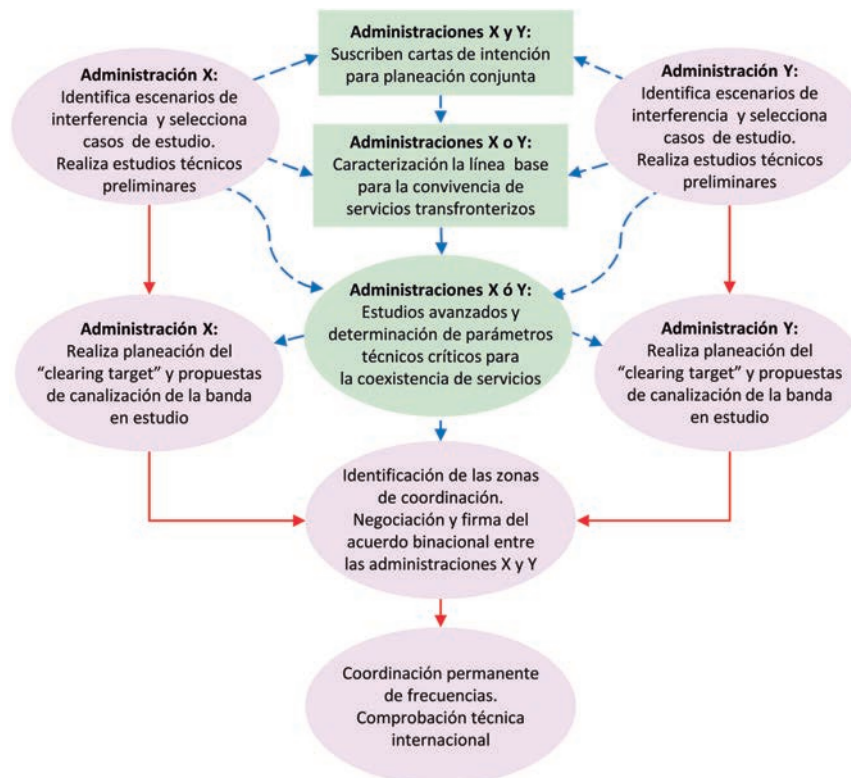
## Capítulo 8. Modelo metodológico para la coexistencia de señales TDT/LTE en ambientes transfronterizos



En cumplimiento del objetivo general del proyecto, la elaboración del modelo metodológico representa el principal producto de esta investigación este le servirá de “hoja de ruta” al Estado colombiano para afrontar la problemática binacional Colombia-Brasil en la banda de 614 a 698 MHz, así como para abordar otros casos similares.

### Proceso de coordinación y comprobación binacional de la coexistencia de servicios transfronterizos

El tema de la coordinación de frecuencias entre países está regulado en términos generales en el RR y ha sido tratado ampliamente en algunos documentos de la CITEL. El **Anexo 1** del *Manual de comprobación técnica del espectro* contiene el acuerdo de cooperación directa entre las administraciones de Francia, Alemania y Suiza, suscrito en 1993. A partir de estos referentes e incluyendo las buenas prácticas de las administraciones de Estados Unidos, Canadá y México en la planeación y la limpieza de la banda en estudio, se definió el proceso de coordinación y planeación binacional para el estudio de la coexistencia de servicios en las zona fronteras, tal como se muestra en la **Figura 80**.



**Figura 80.** Proceso de coordinación y comprobación binacional de frecuencias.





En la **Figura 80** podemos identificar dos flujos importantes: 1) la práctica tradicional de las administraciones de realizar los estudios técnicos, la planeación y la canalización de frecuencias en una banda determinada de forma independiente (y en tiempos diferentes), para luego tratar de negociar los acuerdos; y 2) una práctica novedosa que involucra la firma de cartas de intención para realizar dichas actividades en forma consensuada y en tiempos relativamente simultáneos. Esto último, en el marco de una relación gana-gana entre países que garantizaría una optimización de recursos y una disminución de tiempos en la firma de los acuerdos bilaterales.

### Componentes y desarrollo del modelo metodológico

A partir de la estructura general concebida para el macroproyecto planteado desde la formulación de la propuesta sección *Problemática actual* (sección 1.1), y teniendo como eje central el proceso de coordinación y comprobación binacional definido en la sección anterior, y garantizando la adopción de las mejores prácticas sobre metodologías para el tratamiento de las interferencias y el análisis de los estudios de coexistencia de servicios en la banda inferior a 1 GHz escrito en las secciones *Análisis de recomendaciones, metodologías y buenas prácticas para el estudio de la coexistencia de servicios* y *Análisis de los estudios sobre interferencia de TDT y LTE en bandas inferiores a 1 GHz*, se logró identificar tres fases y siete módulos como partes constitutivas del modelo. Las fases son las siguientes: 1) fase preliminar, la cual responde exactamente al cumplimiento del objetivo general de este proyecto de investigación y que representa el insumo fundamental para abordar la siguiente fase; 2) fase de estudio y planeación, que involucra diversos proyectos técnicos y administrativos con un horizonte temporal de aproximadamente 18 meses; 3) fase de desarrollo y coordinación del acuerdo, que deberá ser asumida por el MinTIC, la Cancillería colombiana y los organismos técnicos consultivos y de soporte, como la ANE, la ANTV y la CRC.

La **Figura 81** presenta el diagrama general de la metodología para el estudio y coordinación de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos para la banda de 614-698 MHz. Los componentes o módulos de cada una de las fases se relacionan a continuación, mientras que la descripción y justificación se presentan en las secciones *Estudios técnicos, planeación y coordinación; Puesta en marcha del acuerdo binacional y coordinación permanente*.

**Fase preliminar (2016).** Esta fase comprende los siguientes módulos:

- **Módulo 1.** Recomendaciones de los organismos de normalización y regulación internacional, regional y local, y adopción de las mejores prácticas:
  - Revisión y análisis de recomendaciones y documentos de la UIT, ETSI, 3GPP, CITELE, IEEE, ANE, etc.
  - Revisión y análisis de las mejores prácticas en metodologías de coexistencia y estudios de interferencia en la banda inferior a 1 GHz.



- **Módulo 2.** Parámetros técnicos de interferencia:
  - Definición de escenarios y casos de interferencia para la banda de 614-698 MHz.
  - Definición preliminar de parámetros técnicos para el análisis de interferencia.
  - Simulaciones, mediciones y pruebas preliminares.
- **Módulo 3.** Modelo de propagación:
  - Caracterización y ajuste del modelo de propagación para zonas de frontera colombiana (zona tropical con selva y bosques).

**Fase de estudio y planeación (2017-2018).** Esta fase comprende los siguientes módulos:

- **Módulo 4.** Estudios técnicos y canalización:
  - Caracterización de la "línea base" de los servicios de TDT y LTE.
  - Realización de simulaciones exhaustivas y pruebas de laboratorio a escala.
  - Determinación de parámetros críticos para la coexistencia de servicios TDT y LTE en la frontera colombiana.
  - Realización de pruebas reales en la frontera colombiana.
  - Propuestas de canalización para la banda de 614-698 MHz.
- **Módulo 5.** Coordinación binacional:
  - Suscripción de cartas de intención de Colombia con las administraciones vecinas.
  - Planeación coordinada de la banda de 614-698 MHz (Colombia-Brasil).
  - Coordinación del *clearing target* para la banda de 614-698 MHz (Colombia-Brasil).
  - Definición de zonas de coordinación de frecuencias (Colombia-Brasil).
  - Propuesta y negociación del acuerdo bilateral entre Colombia y Brasil.

**Fase de desarrollo y coordinación (2019...).** Esta fase comprende los siguientes módulos:

- **Módulo 6.** Coordinación de frecuencias:
  - Implementación del acuerdo bilateral (Colombia-Brasil).
  - Procedimiento de coordinación de frecuencias.
  - Procedimiento de evaluación.
- **Módulo 7.** Comprobación técnica:
  - Procedimiento de comprobación técnica.
  - Procedimiento de solución de controversias.
  - Automatización de procesos.

### Estudios preliminares

Como ya se mencionó, esta fase comprende el objetivo general, las actividades y el alcance del proyecto de investigación realizado en el marco del Convenio ANE-Escuela 057.



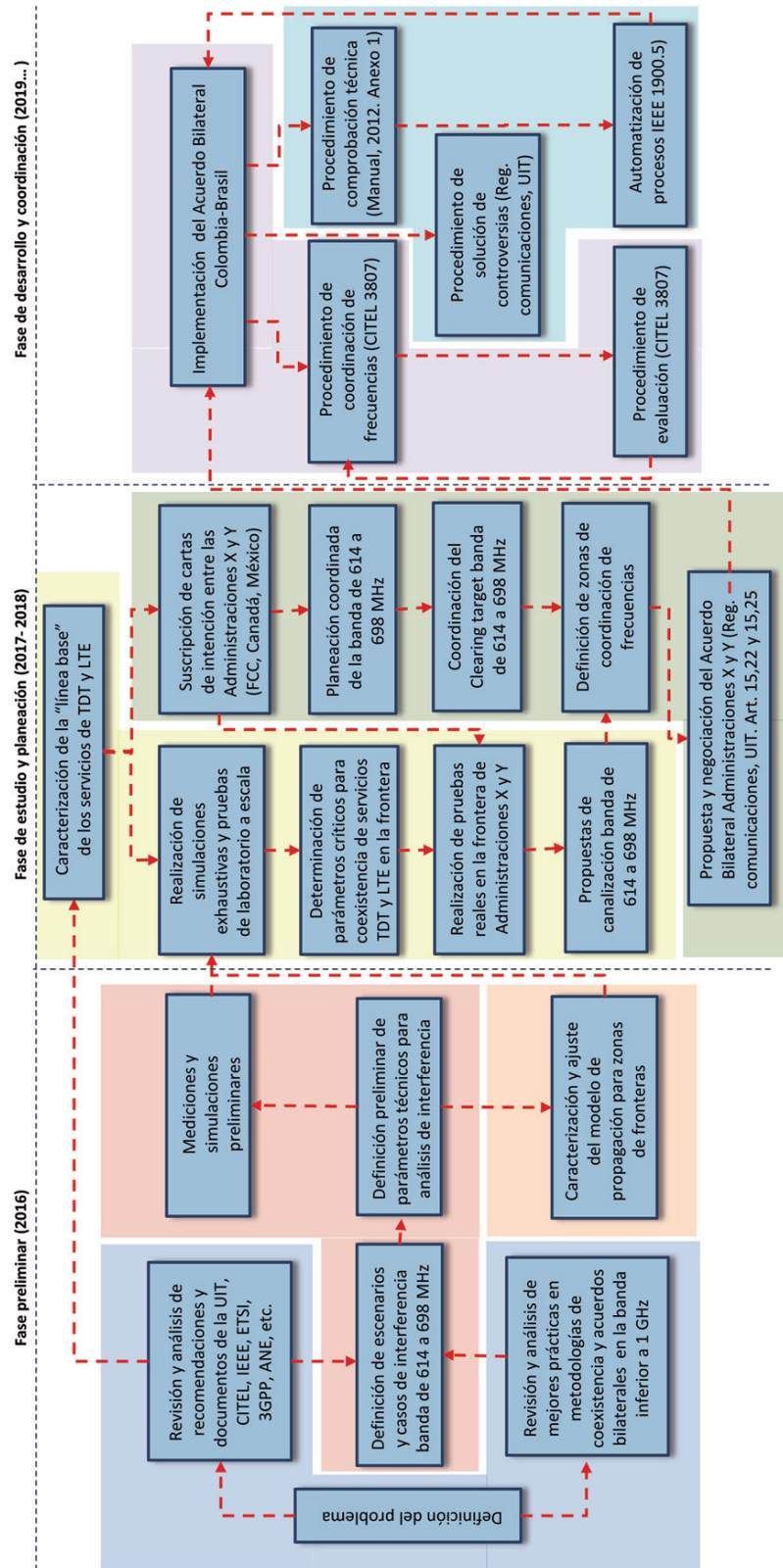


Figura 81. Metodología para el estudio/coordinación de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos.

**Recomendaciones de los organismos internacionales y análisis de estudios sobre interferencia de TDT y LTE.** Este módulo abordó el análisis realizado a partir de la revisión de la normativa internacional, regional y local sobre los temas de interferencia y convivencia de los servicios TDT y LTE, así como el análisis de las metodologías y estudios recientes sobre dichos temas; se resaltan los modelos de cartas de intención suscritos por la FCC con *Industry Canada* y el IFT de México, respectivamente (sección *Análisis de recomendaciones, metodologías y buenas prácticas para el estudio de la coexistencia de servicios*). Los documentos y recomendaciones destacados son los siguientes: la Recomendación UIT-R SM 1049-1, que define un modelo facilitador para la asignación de frecuencias en las zonas fronterizas, y los documentos 3807 y 3597 de la CITEI, que definen los lineamientos para el establecimiento y actualización de acuerdos orientados a facilitar la comprobación técnica para el uso del espectro en zonas de coordinación y las directrices para la armonización de los procedimientos de medición de dicha comprobación técnica, respectivamente.

Se resalta la importancia de los diferentes estudios realizados sobre interferencia y convivencia de los servicios TDT y LTE en las bandas de 800 y 700 MHz en la definición de pruebas y la determinación de parámetros críticos de interferencia de señales y convivencia de TDT y LTE (sección *Análisis de los estudios sobre interferencia de TDT y LTE en bandas inferiores a 1 GHz*). Los resultados de estos estudios se centran en la limitación de potencias de emisión, en el uso de filtros tanto para emisión como para recepción y el uso de polarización ortogonal entre servicios.

Con relación a las buenas prácticas para planear y coordinar la banda de 600 MHz se encontró en la Región 2 (Américas) que Estados Unidos, México y Canadá han avanzado considerablemente en este tema. Para el caso de México y Canadá con Estados Unidos, se suscribieron cartas de intención para la planificación ordenada de la banda de 600 MHz para el uso de nuevos servicios de telecomunicaciones y para reconfigurar el uso del espectro en las bandas UHF entre los servicios de televisión y los servicios móviles, respectivamente.

**Escenarios y parámetros técnicos relacionados con la interferencia en la banda de 614-698 MHz.** La interferencia es un proceso indeseado en el cual la señal de un servicio particular se ve afectada por otros tipos de señales también indeseadas. La cantidad de señal y los parámetros relacionados con esa señal indeseada varían dependiendo del tipo de servicio, así como del servicio interferente. Para el caso de la interferencia entre LTE y TDT en la frontera se deben concretar no solo los escenarios de interferencia en zonas transfronterizas, sino también los parámetros técnicos relevantes.

Como se mencionó en la sección *Escenarios y casos de interferencia en la banda de 614-698 MHz en zonas fronterizas (Tabla 29)*, los escenarios de coexistencia para los servicios TDT y LTE definidos en conjunto con la ANE fueron 18, divididos en tres grupos, a saber: a) interferencia entre estaciones, b) interferencia entre estaciones y usuarios, e c) interferencia entre usuarios. Se pueden identificar casos de interferencia de canal adyacente o cocanal que incrementan de forma significativa el tipo de análisis y estudio de interferencia para cada uno de los escenarios presentados.



Los parámetros técnicos que serán evaluados para efectos de coordinación en las fronteras deben ser descritos entre las administraciones involucradas siguiendo recomendaciones de los organismos internacionales como la UIT, CITELE e IEEE, entre otros. En el **Anexo 5** se presenta una descripción de los parámetros técnicos más relevantes relacionados con los servicios de televisión digital e internet móvil y con la coexistencia entre ellos en zona de frontera; además, se presentan agrupados en secciones dependiendo del tipo de variable: primero, los parámetros de frecuencia y espectro; luego, los elementos de propagación y las variables de localización y espaciales; y, finalmente, los directamente relacionados con interferencia y coexistencia.

**Simulaciones, mediciones y pruebas de laboratorio preliminares.** Las simulaciones y las pruebas de laboratorio desarrolladas buscan encontrar diversos parámetros de la interferencia en escenarios transfronterizos de Colombia y Brasil. Las simulaciones preliminares fueron realizadas con el *software* ICS Telecom, de propiedad de la ANE, previo a las mediciones de campo hechas para conocer el escenario real del entorno. Y, finalmente, las pruebas de laboratorio entregaron resultados de la implicación de bandas de guarda, potencias y diversos escenarios que permitían identificar, de forma preliminar, variables técnicas de la coexistencia de servicios TDT y LTE. Los resultados de las simulaciones, las mediciones en campo y las pruebas de laboratorio preliminares fueron presentados y analizados en las secciones *Simulaciones de propagación* y *Mediciones de campo*; sin embargo, se hará un breve resumen en los siguientes ítems:

- **Simulaciones en ICS Telecom:** en este *software* se desarrollaron dos grupos de simulaciones: uno para analizar los modelos de propagación y el segundo para evaluar algunos parámetros de interferencia y coexistencia. El primer grupo de simulaciones estuvo enfocado en la definición de la propagación en ambientes transfronterizos y en la evaluación y comparación de los modelos empíricos tradicionales con modelos que incluían el efecto de vegetación o de grandes cuerpos de agua.

El segundo grupo de simulaciones estuvo enfocado en identificar los parámetros de interferencia en la frontera colombo-brasilera (Leticia y Tabatinga), con base en la infraestructura y los servicios de TDT sobre LTE y viceversa. Los parámetros medidos son la C/I, el porcentaje de interferencia y el área interferida en kilómetros cuadrados. El porcentaje de interferencia está directamente relacionado con la probabilidad de interferencia medida sobre todos los eventos del simulador. Finalmente, el área interferida representa el espacio donde se encuentran eventos de interferencia en el simulador.

- **Mediciones de campo:** en la frontera colombo-brasilera se realizaron dos comisiones de trabajo (septiembre y noviembre del 2016). La primera de ellas estuvo enfocada en realizar un estudio de los servicios de televisión de la región, tanto colombianos como brasileros, y en realizar mediciones de campo para caracterizar el modelo de propagación de dicha zona fronteriza. La segunda visita estuvo enfocada en dos objetivos:



a) identificar los servicios móviles de la zona mediante un levantamiento de información de la ubicación de las antenas y estaciones base; b) realizar nuevas mediciones de campo para lograr un ajuste fino del modelo de propagación propuesto.

Las mediciones de campo corroboraron el desarrollo de las simulaciones de los modelos de propagación en la frontera y fueron el primer paso para definir las características más importantes de la zona y de las variables reales que modificaban los modelos de propagación.

- **Pruebas de laboratorio:** fueron el espacio para definir los parámetros iniciales de protección adecuados entre los servicios de LTE y TDT. Dichas pruebas se diseñaron a partir de una metodología que permitió evaluar las dos tecnologías relacionadas en este proyecto, tal como quedó documentado en la sección *Pruebas de laboratorio preliminares*. Como resultado se obtuvieron parámetros iniciales, tales como: bandas de guarda, distancias y relaciones de potencia, con el fin de minimizar la interferencia entre estos servicios a partir de tres tipos de interferencia: i) adyacente fuera de banda (AFB), en la cual no existe solapamiento en frecuencia, pero las bandas se encuentran lo suficientemente cerca para generar interferencia. ii) Adyacente en banda (AEB), en la cual la frecuencia central de las dos es diferente y se caracteriza por que el hombro de una de las señales se encuentra fuera de la otra señal. iii) Cocanal (CoCa), en la cual las dos señales se encuentran en el mismo canal espectral y una de las dos no sobrepasa espectralmente a la otra.

**Modelo de propagación para las zonas fronterizas colombianas.** En el **Capítulo 7** se presenta el desarrollo del modelo de propagación propuesto para la frontera colombo-brasilera, extrapolable a otras situaciones fronterizas en las que predominen ambientes de selva y bosques tropicales. Teniendo en cuenta que el análisis realizado consideró dos tipos de modelos de propagación (modelos empíricos tradicionales y modelos modificados según la vegetación), se realizó una combinación de ambos para tener un mejor ajuste a los resultados de las mediciones de campo.

Un ajuste definitivo del modelo de propagación propuesto para la banda de 614-698 MHz deberá involucrar la realización de mediciones exhaustivas de campo en las que se ubiquen transmisores TDT o LTE en dicha banda, siguiendo recomendaciones que incluyan el número de puntos muestreados, el tipo de antenas y la altura de las antenas receptoras, con el fin de obtener un modelo de propagación ajustado.

### Estudios técnicos, planeación y coordinación

La fase 2 (estudio y planeación) de la metodología propuesta se compone de un módulo técnico y otro administrativo que deben ser desarrollados simultáneamente a partir de la determinación de la "línea base", para concluir en la propuesta del modelo de acuerdo binacional; para ello se presenta en este capítulo una serie de recomendaciones y referentes que permitirán estructurar los proyectos técnicos y administrativos requeridos. En tanto que la fase 3 (desarrollo y coordinación del modelo propuesto) configura una serie





de macroactividades que deberán ser asumidas por los organismos responsables de la implementación y desarrollo del acuerdo (MinTIC y Cancillería colombiana) con el apoyo permanente de los organismos técnicos consultivos y de soporte (ANE, ANTV y CRC).

**Estudios técnicos y canalización.** Los estudios asociados a la definición técnica con fines de la elaboración de la propuesta y negociación del acuerdo bilateral deben iniciar con la caracterización de la situación actual o “línea base” de los servicios y con la identificación real de la canalización de la banda de 614-698 MHz. Una vez determinada la “línea base” se deben poner a prueba los escenarios ya definidos para las simulaciones y pruebas de laboratorio exhaustivas, así como algunas pruebas de campo (preferiblemente un *trail* que involucre a fabricantes y operadores reconocidos). A continuación se describen dichas etapas y procesos.

**Definición de la línea base de servicios TDT y LTE transfronterizos:** una “línea base” que refleje el uso de la banda 614-698 MHz en la zona fronteriza de Colombia y Brasil debe estudiar en principio los servicios actuales de televisión analógica y digital que se están emitiendo en dichas frecuencias. Como parte de los estudios preliminares consignamos a continuación la prospectiva de canalización realizada para los países mencionados en los departamentos y estados fronterizos.

Para el caso colombiano se estudiaron, luego del apagón analógico, únicamente los departamentos de Amazonas, Guainía, Nariño, Putumayo y Vaupés, basados en el anexo de la Resolución 405 de 2016 (ANE, 2016), el Plan Técnico de Televisión en Colombia (PTTV) y el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF). Su principal diferencia radica en que la resolución está enfocada en el estado de los MUX de transmisión una vez realizado el apagón y el PTTV se centra en la asignación de canales considerando si es público, privado o regional. Se aclara que la información tomada del CNABF corresponde a la asignación de los servicios de radiodifusión, específicamente de televisión. Como resultado se encontró que luego de la Resolución 405 no existe ninguna planeación del uso de los canales 38 al 51 en la totalidad del territorio colombiano.

El análisis para el caso brasileño fue un poco diferente pues se realizó en los municipios de Japurá, San Antônio do Içá, Tabatinga, Benjamin Constant y Atalaia do Norte, ya que se encuentran próximos a la frontera con Colombia.

De acuerdo con el Cuadro de Atribución de Frecuencias brasileño del 2015 (*Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil*) para la banda UHF de análisis (470 a 698 MHz) se tienen asignados los siguientes servicios:

- **Banda 470 a 608 MHz:** canales de televisión de 14 a 36.
- **Banda 608 a 614 MHz:** radioastronomía.
- **Banda 614 a 698 MHz:** canales de televisión de 38 a 51 y telefonía fija.

El resultado muestra que particularmente para el municipio de Tabatinga los canales 42 y 46 están asignados a operadores de televisión, como se muestra en la **Tabla 44**.

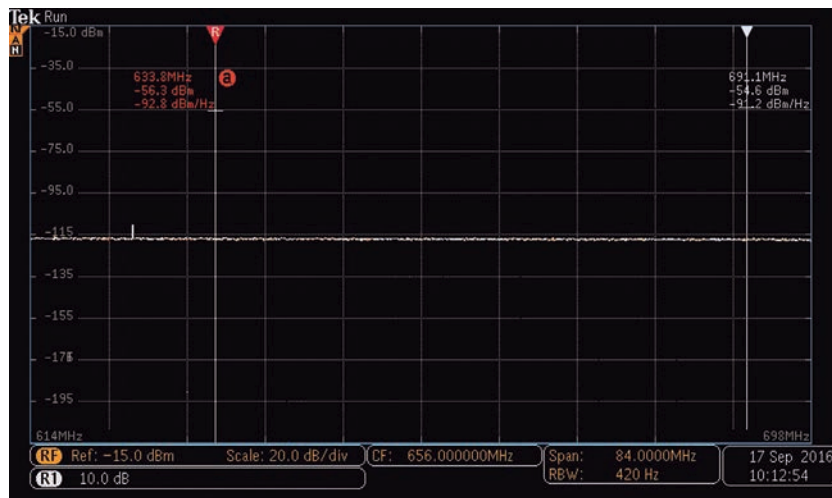


Uno de los aspectos definidos por el protocolo de mediciones de campo fue obtener la canalización actual de la banda de 614 a 698 MHz. La **Figura 82** muestra que para esta banda no existe señal alguna dentro de estos rangos de frecuencia, solo se observa una pequeña señal espuria cerca de los 624 MHz.

Para definir una "Línea Base" confiable, en su momento se deberá determinar la ubicación de todas las estaciones en la frontera, revisar sus frecuencias de operación y comprobarlas respecto a los cuadros de asignación de frecuencia de cada país. Posteriormente se deberían estudiar otros servicios que estén operando en dicha banda.

**Tabla 44.** Asignación de canales en municipios fronterizos brasileños en la banda 614-698 MHz.

Banda	Canal	Rango de frecuencias (MHz)	Municipio	Operador
UHF	38	614-620		
UHF	39	620-626		
UHF	40	626-632		
UHF	41	632-638		
UHF	42	638-644	Tabatinga	Empresa brasileira de comunicação
UHF	43	644-650		
UHF	44	650-656		
UHF	45	656-662		
UHF	46	662-668	Tabatinga	Amazonia Cabo Ltda.
UHF	47	668-674		
UHF	48	674-680		
UHF	49	680-686		
UHF	50	686-692		
UHF	51	692-698		



**Figura 82.** Medición de la banda de 614 a 698 MHz.



**Simulaciones y pruebas de laboratorio exhaustivas para la determinación de los parámetros críticos:** el proceso para la determinación de los parámetros críticos debe estar basado en el desarrollo de las simulaciones, mediciones de laboratorio y pruebas de campo exhaustivas.

Las pruebas de laboratorio deberán ser una extensión de las pruebas preliminares desarrolladas en este proyecto, para lo cual es menester diseñar pruebas para cada uno de los 18 escenarios de interferencia descritos previamente para evaluar aspectos tales como distancia, potencia y márgenes de protección teniendo en cuenta los resultados de los parámetros técnicos descritos para cada una de las tecnologías y analizando aspectos de la calidad de las señales TDT y LTE, así como los parámetros de interferencia y umbrales de protección de ambas señales.

Por otro lado, se deben programar las pruebas de campo definitivas, las cuales deberán hacerse en la frontera con los siguientes objetivos: i) realizar el ajuste final del modelo de propagación propuesto. ii) Determinar si los elementos de protección de interferencia diseñados cumplen con los valores presupuestados. iii) Evidenciar el impacto de los diferentes tipos de interferencia en la calidad de los servicios de TDT y LTE. El resultado del proceso anterior definirá todos los elementos técnicos que se deben tener en cuenta en la descripción técnica del acuerdo bilateral, donde se presentarán los márgenes de protección, bandas de guarda y filtros, potencias máximas que generen interferencia perjudicial y recomendaciones para tener en cuenta a la hora de desplegar un servicio en la frontera.

**Propuesta de canalización:** uno de los procesos más relevantes previos a la puesta en marcha y despliegue de servicios de telefonía móvil en la banda de 614-698 MHz es la definición y adopción de una canalización. Esta propuesta, en la banda inferior, debe considerar en detalle su interacción con el servicio RAS, no solo para el caso de la zona fronteriza, sino para todo el territorio nacional. Debido a esto, para definir la canalización se deberán desarrollar pruebas y mediciones de la banda de guarda entre el canal 37 de RAS y la banda inferior de los servicios móviles.

Para la parte superior se debe tener en cuenta la relación con las bandas de 700 MHz, en particular en la banda 12 de UTRA, donde la asignación de frecuencias comienza en los 698 MHz. Por otro lado, y de manera diferente a la gran mayoría de bandas, las bandas 13 y 14 de UTRA tienen un espaciamiento inverso, esto es, que el DL está en frecuencias inferiores y el UL en superiores. Estos aspectos se muestran en la **Tabla 45**.

La banda de 614-698 MHz proporcionaría un total de 84 MHz que deben ser reasignados para servicios de LTE teniendo en cuenta diversos aspectos como el gap de frecuencias entre el UL y el DL, que debe ser mayor que 10 MHz, ya que espaciamientos más próximos hacen difícil el diseño de filtros que prevengan que el transmisor tenga fugas espectrales reconstructivas dentro de su sección de recepción y produzcan *Self-Blocking* (Rumney, 2012). Adicionalmente, la banda de guarda que posiblemente



podría usarse entre RAS y el servicio en la banda de 600 MHz es de 3 MHz, lo que dejaría libre solo 71 MHz.

**Tabla 45.** Extracto de las bandas UTRA en la banda de 700 MHz.

Banda E-UTRA	Nombre común	Modo de duplexación	Frecuencia	Uplink (UL) (MHz)	Downlink (DL) (MHz)	Espaciamiento duplexado (MHz)	BW de canal (MHz)
12	Lower SMH blocks A/B/C	FDD	700	698-716	728-746	30	1.4, 3, 5, 10
13	Upper SMH block C	FDD	700	777-787	746-756	-31	5, 10
14	Upper SMH block D	FDD	700	788-798	758-768	-30	5, 10

Fuente: Rumney (2012).

La propuesta de reuso de la banda de 600 MHz por parte de *Industry Canada*, que se mostró en la **Figura 27**, describe que el espaciamiento entre RAS y los servicios móviles es de 3 MHz; adicionalmente, con el fin de completar los 84 MHz, se usan siete pares de bloques de 5 MHz cada uno, más un gap de 11 MHz (*Industry Canada*, 2015). Otras asignaciones, teniendo en cuenta las diferencias de los anchos de banda aceptados en LTE de 1.4, 3, 5, 10 y 20 MHz, pueden tener influencia en la forma como se canaliza la banda, con el fin de optimizar el espectro disponible.

**Coordinación administrativa binacional.** Para el desarrollo de este módulo administrativo del modelo metodológico propuesto se recomienda iniciar con la suscripción de una carta de intención entre Colombia y Brasil, tomando como base los elementos de las cartas de intención suscritas por la FCC con los organismos de Canadá y México, descritas en la sección *Análisis de recomendaciones, metodologías y buenas prácticas para el estudio de la coexistencia de servicios*, para sincronizar los procesos de limpieza, planeación y canalización de la banda de 614-698 MHz en la frontera colombo-brasilera.

**Definición de las zonas de coordinación:** una vez realizados los estudios técnicos exhaustivos planteados en la sección *Estudios técnicos y canalización*, así como la planeación coordinada de la banda de 614-698 MHz con Brasil, se recomienda que Colombia inicie la negociación de las zonas de coordinación de frecuencia en dicha frontera, para lo cual debe tener en cuenta los aspectos de coordinación recomendados por la UIT y exigidos por el RR, tal como esboza a continuación:



- **Necesidad y solicitud de coordinación (RR-subsección IIA):**

*“9.6 Antes de notificar a la Oficina o poner en servicio una asignación de frecuencia en cualquiera de los casos seguidamente enumerados, la administración interesada deberá efectuar, en su caso, la coordinación con las otras administraciones identificadas de acuerdo con el número 9.27 (CMR-03):*

*9.21 p) para cualquier estación de un servicio con respecto al cual se estipula el requisito de buscar el acuerdo de otras administraciones en una nota del Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias que haga referencia a esta disposición (CMR-2000).*

*9.27 Las asignaciones de frecuencia que han de tenerse en cuenta al efectuar la coordinación se identifican utilizando el Apéndice 5”.*

- **Zona de coordinación.**

*“En un servicio, una zona de coordinación más pequeña puede permitir a una administración coordinar un número menor de asignaciones al planificar la explotación del servicio, manteniendo a un nivel aceptable el riesgo de interferencia. El perfeccionamiento del mapa de perímetro de coordinación exigiría a las administraciones establecer acuerdos más complejos para regular el funcionamiento del propio acuerdo y obtener una mayor precisión en la determinación de los niveles de interferencia. Para perfeccionar dicho mapa y minimizar la zona de coordinación puede estimarse el perímetro de coordinación aplicando métodos de predicción de la propagación. Estos métodos pueden variar en complejidad y precisan la aplicación de las condiciones climatológicas y del terreno real. Fundamentalmente, el objetivo es mejorar el método de ‘línea sencilla’ utilizando métodos de predicción para estimar las pérdidas en exceso causadas por los obstáculos del terreno y otras características similares y para evaluar el grado de riesgo que las condiciones de propagación anómalas reducirán frente a estas pérdidas en exceso. También puede que sea necesario llegar a acuerdos sobre estrategias de medición para verificar la precisión y aplicación de los métodos o modelos de predicción” (UIT, 1995).*

De igual forma, para la determinación de las distancias y contornos de coordinación en las zonas fronterizas (tropicales y selváticas) se deberán tener en cuenta los “métodos para determinar la zona de coordinación alrededor de una estación terrena en las bandas de frecuencias entre 100 MHz y 105 GHz”, descritos en el RR-apéndice 7 (Rev. CMR-15); específicamente, el método de ajuste para el modo de propagación 1 en las frecuencias entre 100 y 790 MHz, descrito a su vez en el **Anexo 1** de dicho apéndice, en contraste con el modelo de propagación propuesto en este estudio para dichas zonas.

**Propuesta de acuerdo binacional:** el ejemplo 3 de la Rec. UIT-R SM.1049-1, que contiene el “Acuerdo de Viena (versión del 3 de diciembre de 1993) sobre la coordinación de frecuencias entre 29.7 y 960 MHz para los servicios fijo y móvil terrestre”, es un referente



importante para los equipos técnicos, administrativos y legales que tengan la misión de elaborar y negociar el acuerdo bilateral entre Colombia y Brasil. El Acuerdo de Viena presenta la estructura que se muestra en la **Tabla 46**.

**Tabla 46.** Estructura del Acuerdo de Viena 1993.

Índice
Preámbulo
1 Definiciones
2 Generalidades
3 Disposiciones técnicas
4 Procedimientos
5 Informe de interferencia perjudicial
6 Revisión del Acuerdo
7 Adhesión al Acuerdo
8 Retiro del Acuerdo
9 Estatuto de las coordinaciones anteriores
10 Idiomas del Acuerdo
11 Entrada en vigor del Acuerdo
12 Revocación del Acuerdo del 24 de enero de 1986
13 Disposiciones provisionales
14 Notificación al secretario general de la UIT
Anexos
Addendum

En el **Anexo 1** de dicho documento se presentan las “máximas intensidades de campo interferente admisibles y alcances transfronterizos máximos de la interferencia perjudicial para las frecuencias que requieren coordinación”. A modo de ejemplo se tiene que:

*...el alcance transfronterizo de la interferencia perjudicial causada por estaciones transmisoras que se han de coordinar depende de la gama de frecuencias y no rebasará los valores indicados en la columna 3 de la **Tabla 47**. Los valores indicados en la columna 2 se utilizarán como límites de la intensidad de campo interferente admisible a las distancias con respecto a la frontera, especificadas en la columna 3. Los valores corresponden a una altura de 10 metros por encima del nivel del suelo.*

Así mismo, la protección de los receptores solo puede reclamarse si un transmisor de referencia, situado en el lugar y a la altura del receptor de que se trate, genera una intensidad de campo que no rebasa los valores especificados en la columna 2 de la **Tabla 47** a una altura de 10 metros por encima del nivel del suelo y una distancia, con respecto a la frontera, especificada en la columna 3, mientras que la p.r.a. del transmisor de referencia depende de la gama de frecuencias indicada en la columna 4 de la misma tabla.





**Tabla 47.** Parámetros técnicos relacionados con la interferencia.

Gama de frecuencias (MHz)	Intensidad de campo interferente admisible (relativa a 1uV/m) (dB)	Alcance transfronterizo máximo de la interferencia perjudicial (km)	p.r.a del transmisor de referencia (dbW)
29.7-47.0	0	100	3
68.0-74.8	+6	100	9
75.2-87.5	+6	100	9
146.0-149.9	+12	80	12
150.0-174.0	+12	80	12
406.1-430.0	+20	50	16
440.0-470.0	+20	50	16
862.0-960.0	+26	30	13

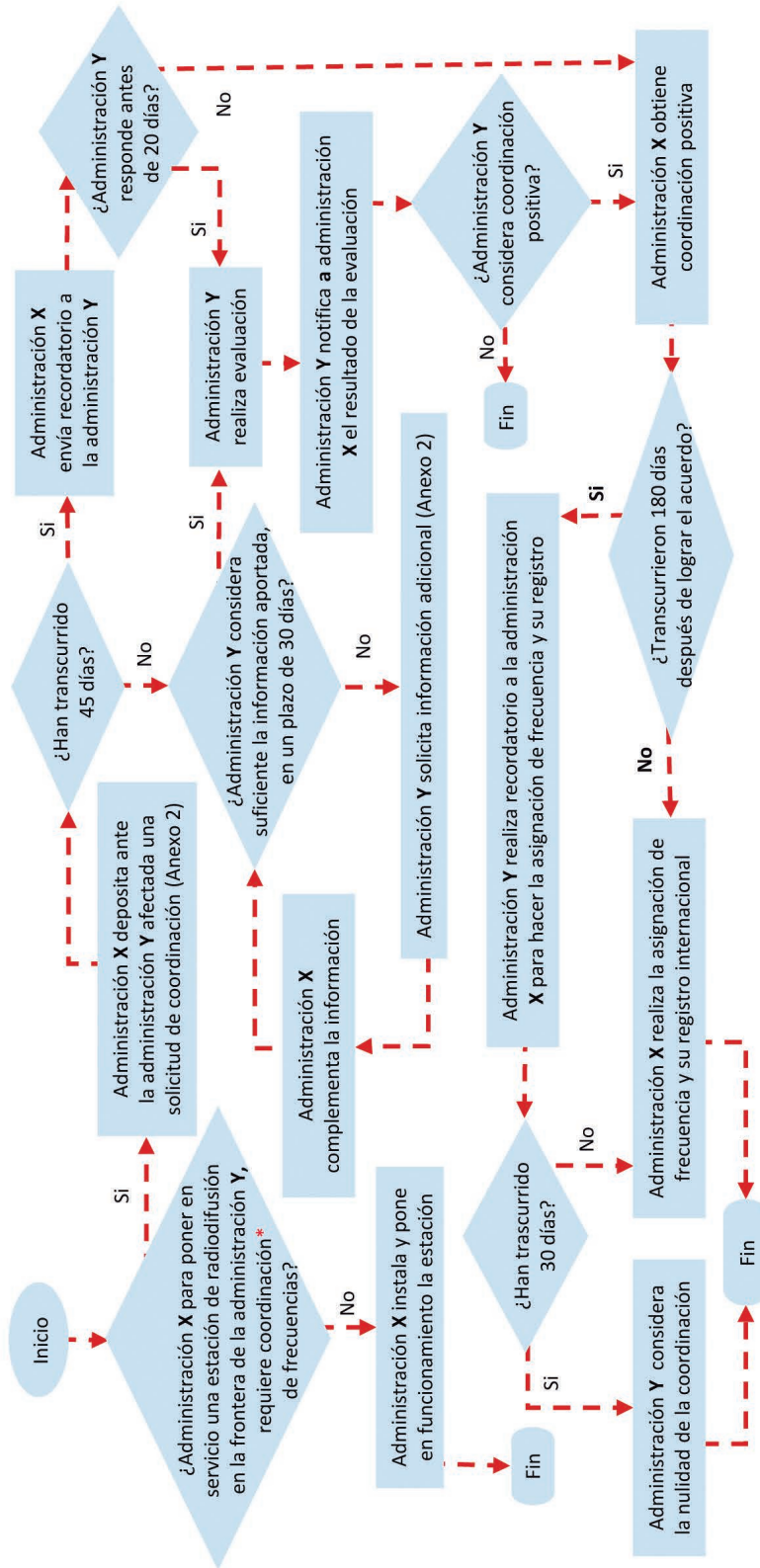
### Puesta en marcha del acuerdo binacional y coordinación permanente

Si bien es cierto que el desarrollo y seguimiento del acuerdo suscrito deberán estar especificados en el mismo texto del documento, hay que recomendar que en lo estrictamente técnico se adopten las mejores prácticas avaladas por los organismos internacionales y regionales. En particular, el procedimiento de coordinación de frecuencias de la CITEL y el procedimiento de comprobación técnica del *Manual de comunicaciones* del 2012, que se resumen a continuación:

**Procedimientos de coordinación y evaluación de frecuencias de la CITEL.** Del documento de la CITEL 3087 del 2015 sobre "lineamientos para el establecimiento y actualización de acuerdos orientados a facilitar la coordinación del uso del espectro en zonas de coordinación" rescatamos las definiciones recopiladas en el **Anexo 1**. Se recomienda seguir las "directrices para la armonización de los procedimientos de medición en la comprobación técnica del uso del espectro para coordinación en zonas de frontera", presentadas en el Documento 3597 de la CITEL del 2014. Tomando en cuenta el **Anexo 1** del 3087, consideramos de suma importancia aportar a esta investigación la elaboración de los flujogramas correspondientes a los procedimientos para las "frecuencias que requieren coordinación" (**Figura 83**) y la "evaluación de solicitudes de coordinación" (**Figura 84**).

**Procedimientos de comprobación técnica y solución de controversias.** De acuerdo con el RR de la UIT, los Sistemas de Gestión Nacionales del Espectro (*Nacional Spectrum Management System* - NSMS) deberían tener la estructura que se muestra en la **Figura 85**, donde aplicaría para la comprobación técnica internacional (UIT, 2012).





\*Si el transmisor de la Administración X produce en la frontera del país de la Administración Y una intensidad de campo tal que, a una altura de 10 m, la intensidad de campo interferente rebasa al valor máximo definido en el estudio (valor máximo entre 20dB y 26 dB, relativo a 1 uv/m).

Figura 83. Diagrama de coordinación de frecuencias basado en CITEL 3807.

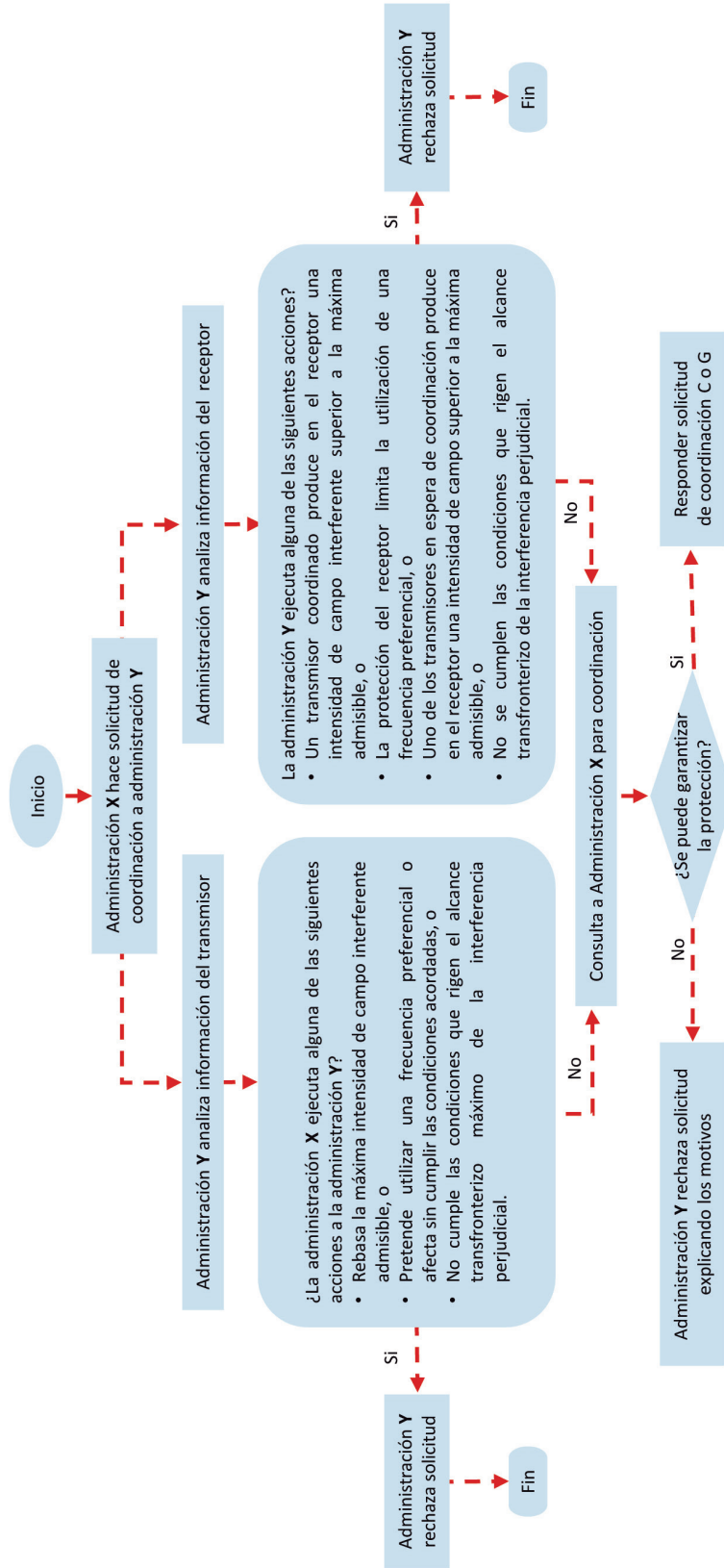
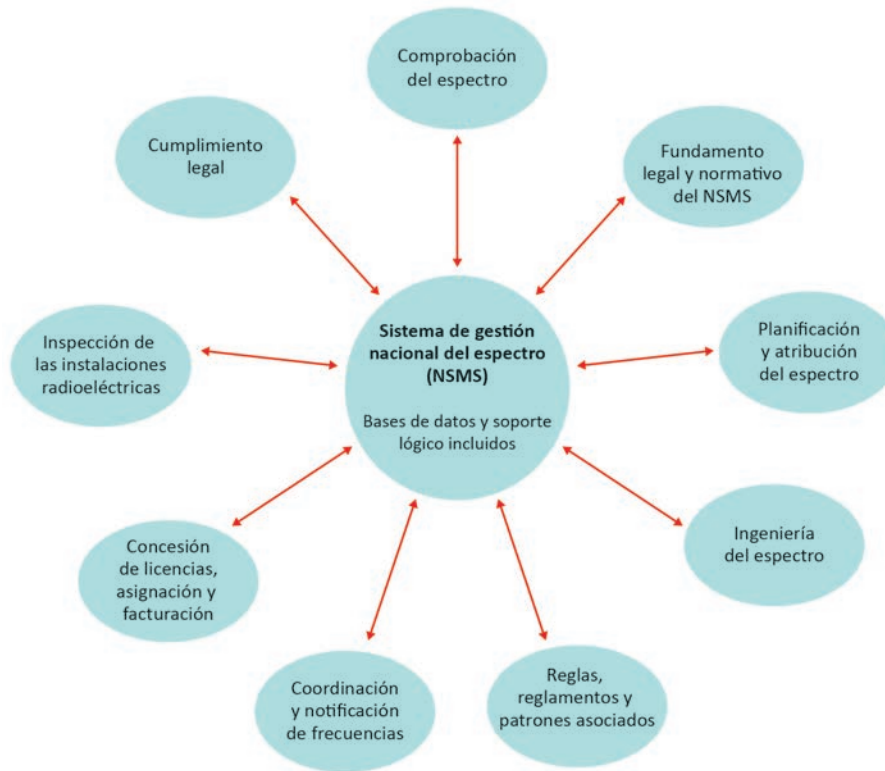


Figura 84. Diagrama de evaluación de las solicitudes de coordinación basado en CITEL 3807.



**Figura 85.** Sistema simplificado de gestión nacional del espectro. Fuente: (UIT, 2012).

Cada país debe utilizar las instalaciones de comprobación técnica como instrumentos esenciales para garantizar una eficaz gestión del espectro a nivel nacional. Por otra parte, dado que los objetivos de la UIT incluyen el asegurar una utilización eficaz y económica del espectro de frecuencias y ayudar a eliminar rápidamente la interferencia perjudicial, las administraciones han decidido cooperar al desarrollo y explotación de un sistema de comprobación técnica internacional y, para este fin, han adoptado las disposiciones apropiadas en materia de reglamentación. El Artículo 16 del RR contiene las disposiciones que rigen el establecimiento y explotación del sistema de comprobación técnica internacional (UIT, 2011).

**Sistema de comprobación técnica internacional:** en el 2000 se firmó un acuerdo de cooperación para establecer un procedimiento de medición para identificar interferencias perjudiciales entre estaciones de regiones fronterizas (UIT, 2011). Los parámetros para la comprobación técnica se agrupan en asignaciones interferentes e interferidas, tipos y datos de la medición y resultados de la medición. El detalle de estos parámetros se presenta en el **Anexo 6**.

Se recomienda, además, revisar el **Anexo 1** del *Manual de comprobación técnica del espectro*, que contiene el “acuerdo entre las administraciones de Francia, Alemania y Suiza, sobre la cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica” y



el protocolo “relativo al acuerdo de 1993 entre las administraciones de Alemania, Suiza y Francia sobre la cooperación directa entre las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica” (**Anexo 5**).

**Misión coordinadora de la oficina de radiocomunicaciones:** si bien es cierto que el texto del acuerdo bilateral debe contener los protocolos necesarios para resolver las situaciones de excepción que se presenten en el desarrollo normal de las operaciones en las zonas de coordinación y definir claramente los procedimientos, recursos y organismos de comprobación técnica autorizados para realizar las mediciones correspondientes y el intercambio de información respectivo, se debe tener en cuenta que la Oficina de Coordinación de la UIT ofrece escenarios públicos y expeditos para apoyar dichos procesos.

*El sistema de comprobación técnica internacional de las emisiones es un medio para coordinar las actividades de comprobación técnica con miras a satisfacer las necesidades internacionales relativas a la recopilación, intercambio y publicación de información. Las actividades de comprobación técnica dentro del sistema se realizan en respuesta a una petición, ya sea de administraciones o de la Oficina. La Oficina desempeña un papel esencial en la explotación del sistema coordinando la organización de programas de comprobación técnica regulares o especiales, cotejando y estudiando los resultados y tomando las disposiciones necesarias para comunicarlos a las administraciones. Desde 1999, la Oficina publica los informes sobre datos de comprobación técnica recibidos de las administraciones en el sitio web de la UIT (<http://www.itu.int/brtpr/monitoring/index.html>) y los correspondientes ficheros electrónicos pueden telecargarse gratuitamente. La Oficina organiza diferentes tipos de programas de comprobación técnica de ámbito mundial o regional, así como programas limitados confinados a unas pocas administraciones (UIT, 2011).*

**Automatización de procesos en acuerdos bilaterales:** una de las características más relevantes en los procesos de implementación de los acuerdos es la demora en los tiempos necesarios para generar respuestas oportunas a las solicitudes de las administraciones involucradas. La automatización de procesos posterior a la implementación del acuerdo bilateral busca dar pronta respuesta a las solicitudes de los operadores o entes involucrados en cada administración. Siguiendo las recomendaciones del RR y los lineamientos de la radio cognitiva, la implementación de sistemas de información compartidos entre las administraciones donde estén definidas las zonas de coordinación reducirá significativamente el tiempo de las solicitudes y ayudará a los interesados a poner en operación una estación nueva o a revisar la información más relevante para evaluar la viabilidad de una nueva implementación.

En particular, el estándar IEEE 1900.2 presenta un modelo de agrupamiento de variables técnicas y de desempeño de la red que afectan la coexistencia de servicios de radiocomunicaciones en la definición de los sistemas de información que buscan detectar si un servicio es viable o no desde el punto de vista de la coexistencia. En ella se presentan dos



grandes grupos: a) los del dominio de radiofrecuencias y b) los del dominio lógico de la red. En el primer grupo se pueden encontrar las variables relacionadas con i) la frecuencia y el espectro, ii) la potencia y la propagación, iii) el tiempo y iv) el espacio y la localización. Y en el segundo grupo se encuentran las variables relacionadas con i) la administración del sistema y de la calidad, ii) la red, iii) las funciones cognitivas y iv) las políticas de administración de la red. La **Tabla 48** presenta las variables descritas en el estándar (IEEE, 2008).

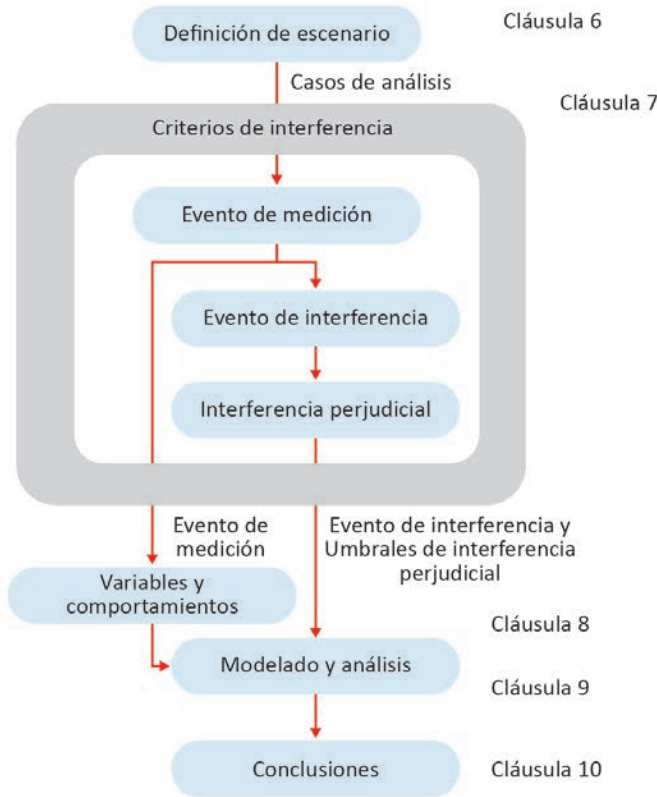
**Tabla 48.** Variables de las definiciones técnicas basadas en el IEEE 1900.2.

Dominio de RF	Dominio lógico
<b>Variables de frecuencia y espectro</b>	<b>Variables de admin. del sistema y de la calidad</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencia.</li> <li>• Rango de frecuencias.</li> <li>• FDD.</li> <li>• Ancho de banda de emisión.</li> <li>• Emisiones no intencionales.</li> <li>• Técnicas de modulación.</li> <li>• Plan de canalización.</li> <li>• Plan de reúso de frecuencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FEC.</li> <li>• Técnicas de compresión.</li> <li>• Estructura de paquetes.</li> <li>• Capacidad del sistema.</li> <li>• Tiempo de vida de la batería.</li> <li>• Eficiencia espectral usada.</li> <li>• Crecimiento del sistema y expansión.</li> <li>• Pruebas y verificaciones del sistema.</li> <li>• Monitoreo de desempeño.</li> </ul>
<b>Variables de potencia</b>	<b>Variables de red</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia transmitida y PIRE.</li> <li>• DFP.</li> <li>• Ganancia de transmisión.</li> <li>• <i>Link Budget</i> y potencia recibida.</li> <li>• Control de potencia.</li> <li>• Potencia pico o promedio.</li> <li>• Densidad espectral de potencia transmitida.</li> <li>• Sensitividad.</li> <li>• Respuesta a los espurios.</li> <li>• Rango dinámico.</li> <li>• Intermodulación y distorsión de señal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protocolo de transporte.</li> <li>• Selección de frecuencias.</li> <li>• Enrutamiento de red y direccional.</li> <li>• QoS.</li> <li>• Accesos prioritarios.</li> <li>• Integración sistemas-servicios.</li> <li>• Protocolos para el manejo de la interferencia.</li> <li>• Detección y manejo de colisiones.</li> <li>• Mitigación de la interferencia.</li> </ul>
<b>Variables de tiempo</b>	<b>Variables de funciones cognitivas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• TDD.</li> <li>• Ciclo útil de transmisión.</li> <li>• Tolerancia al multicamino.</li> <li>• Manejo del intervalo de tiempo.</li> <li>• <i>Delay</i>.</li> <li>• Tiempo de respuesta al DSA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conciencia geográfica.</li> <li>• Conciencia del ambiente.</li> <li>• Sensado espectral.</li> <li>• Capacidad de identificación de servicios.</li> <li>• Compartir información y cooperación.</li> </ul>
<b>Variables de espacio y localización</b>	<b>Variables de políticas de administración</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Directividad de antena.</li> <li>• Propagación y sus modelos.</li> <li>• Antenas adaptativas.</li> <li>• Polarización.</li> <li>• Ubicación de antenas y torres.</li> <li>• Características del terreno (topografía y cartografía).</li> <li>• Movilidad.</li> <li>• Rango.</li> <li>• Cobertura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensitividad y discriminación de la sensórica.</li> <li>• Habilidad en medición de armónicos.</li> <li>• Información georreferenciada.</li> <li>• Calidad y disponibilidad de la información.</li> <li>• Capacidad de actualización de las políticas.</li> <li>• Restricciones.</li> <li>• Prioridades de usuarios.</li> </ul>





La **Figura 86** muestra el proceso analítico del estudio de la automatización de un proceso de interferencia y coexistencia basado en el IEEE 1900.2 (IEEE, 2008). El proceso muestra la definición de un escenario y de un criterio de interferencia que especifica los eventos de medida y de interferencia, y evalúa si esta es perjudicial o no. Y dependiendo de los resultados de la evaluación se toman medidas respecto a la viabilidad de la implementación o solicitud de un nuevo radio-enlace.



**Figura 86.** Resumen del proceso analítico de interferencia y coexistencia basado en el IEEE 1900. Fuente: (IEEE, 2008).

Por su parte, la implementación de las políticas definidas en el acuerdo debería seguir los lineamientos de la arquitectura IEEE 1900.5. En la **Figura 87** se ilustra dicha arquitectura especificando las bases de datos (*Radio Information and RF Environment*), las estrategias de administración y razonamiento (SCCRC) y los puntos de políticas, los cuales deben estar asociados con los reglamentos y parámetros descritos en el acuerdo binacional. Estas políticas son: el punto de administración de políticas (PMP), el repositorio de políticas, el razonador de políticas (PCR) y el ejecutor de políticas (PE) (IEEE, 2011). Mayores detalles sobre los estándares IEEE 1900.2 y 1900.5 se pueden consultar en el **Anexo 7**.



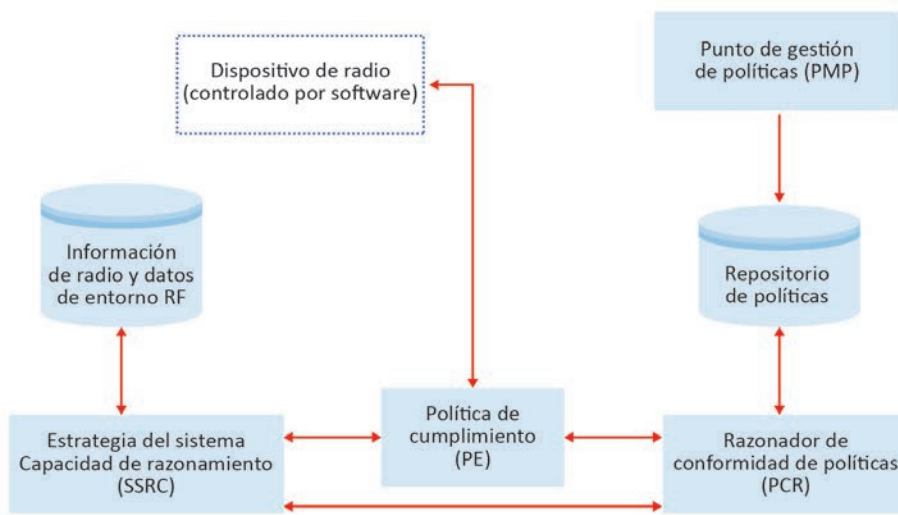


Figura 87. Arquitectura del estándar IEEE 1900.5



## Conclusiones y recomendaciones



La Escuela Colombiana, fiel a sus principios misionales y guiada por su inquebrantable vocación de generar conocimiento que pueda contribuir a las soluciones que requiere el país para avanzar y posicionarse en el contexto regional e internacional, y la ANE, con su liderazgo regional y local, han consolidado un espacio de cooperación entre la universidad y el Estado que ha generado sinergias de recursos humanos, físicos, técnicos y de conocimientos para desarrollar con éxito este proyecto y alcanzar resultados pertinentes y de calidad en un tiempo realmente corto.

En desarrollo de los estudios teóricos se revisó a profundidad la normatividad de la gestión del espectro para los servicios TDT y LTE, incluyendo los planes de transición para el segundo "dividendo digital" tanto en Colombia como en Brasil. Se realizó el análisis de las características espectrales de ambos servicios, incluyendo: densidad espectral, relaciones de protección, caída de los hombros de las máscaras y filtros en diversos escenarios. De igual forma, se incluyeron las mejores prácticas para la coexistencia de estos servicios en bandas de menos de 1 GHz de organismos como la CITEL (Américas), la FCC (EE. UU.), el IFT (México), la ITU (global) y el ETSI (Europa), entre otros.

Los estudios técnicos realizados incluyeron la definición de los escenarios de interferencia (18 en total), la realización de simulaciones y pruebas de laboratorio preliminares, así como las visitas de campo correspondientes; gracias a todo esto se logró la caracterización de un modelo de propagación particular para la zona fronteriza amazónica de Colombia y Brasil a partir del análisis de los resultados de las mediciones de campo realizadas en Leticia (Colombia) y Tabatinga (Brasil), e incluyendo las implicaciones de los bosques tropicales frente a la cobertura y amplitud de la señal recibida.

El modelo metodológico propuesto, denominado "Metodología para el estudio y coordinación de la coexistencia de las señales TDT y LTE en ambientes transfronterizos, para la banda de 614-698 MHz", comprende tres fases: 1) la preliminar, que se enfocó en el desarrollo de los estudios teóricos y los estudios técnicos preliminares; 2) la de estudio y planeación, que aborda la definición puntual de los parámetros técnicos asociados a la coexistencia de los servicios TDT y LTE en la frontera colombo-brasilera, y el inicio del proceso de negociación binacional a partir de la firma de cartas de intención y de la definición de zonas de coordinación que permitan realizar una limpieza, planeación y canalización sincronizada en cada uno de los países; y 3) la de desarrollo y coordinación, que contempla la implementación del acuerdo binacional suscrito entre las dos administraciones con sus módulos pertinentes de coordinación de frecuencias, solución de controversias y automatización de procesos.

Los estudios técnicos preliminares también permitieron extraer una serie de recomendaciones, entre las que resaltamos la necesidad de realizar mediciones y pruebas exhaustivas para definir los parámetros críticos de interferencia y coexistencia de los



servicios TDT y LTE en la frontera de Colombia y Brasil, tales como las bandas de guarda, las potencias límite, los filtros de protección, entre otros, que permitan la adecuada mitigación de la interferencia en dichos servicios. Para las simulaciones se deberán incluir no solamente diferentes distancias entre frecuencias centrales, sino potencias y distancias diferentes entre los elementos víctimas e interferentes. De igual forma, se deberá buscar una relación entre las bandas de guarda y las distancias de protección entre los sistemas para un valor determinado de interferencia.

Adicionalmente, se recomienda realizar una recolección de un número mayor de datos para obtener un ajuste más fino del modelo de propagación propuesto para esta zona tropical boscosa y selvática, en el que se puedan incluir aspectos como la altura de antenas y una validación explícita para la banda de frecuencias en estudio.

Para la caracterización de la "línea base" al inicio de la fase de planeación y desarrollo se debería contar con un sistema que registre la información de las estaciones y los operadores que prestan servicio en la zona fronteriza, las licencias asignadas y las características técnicas de propagación para cada uno de los servicios en estudio. Simultáneamente, se deberá firmar una carta de intención en la que las administraciones interesadas (Colombia y Brasil) suscriban un compromiso que permita abrir una discusión técnica coherente que beneficie el desarrollo de las telecomunicaciones en ambos países y que se enfoque hacia la realización de una planeación coordinada de la banda 614-698 MHz. Dicho documento debería incorporar las buenas prácticas norteamericanas de subasta de incentivos y *clearing target*, con el fin de limpiar la banda y definir una canalización que funcione a la medida de las necesidades de mediano y largo plazo de cada una de las administraciones.

Se sugiere, además, realizar pruebas reales en la frontera a través de un *trail* desarrollado por un consorcio de fabricantes o de operadores de los servicios de TDT y LTE, en el que se ubiquen equipos con potencias y distancias reales en dicha zona para validar los diferentes parámetros críticos obtenidos con las simulaciones y las pruebas de laboratorio.

Para la fase de desarrollo y coordinación, la cual deberá estar a cargo de ambas administraciones, se recomienda que las distancias y contornos de coordinación tengan como referente fundamental los "métodos para determinar la zona de coordinación alrededor de una estación terrena en las bandas de frecuencias entre 100 MHz y 105 GHz", descritos en el RR-apéndice 7 (Rev. CMR-15); específicamente, el método de ajuste para el modo de propagación (1) en las frecuencias entre 100 y 790 MHz, descrito a su vez en el **Anexo 1** de dicho apéndice; estas ecuaciones contrastan con el modelo de propagación propuesto en este estudio para zonas tropicales boscosas y selváticas.

De igual forma, se recomienda que para la zona de coordinación establecida se tengan claramente definidos los procedimientos de comprobación técnica y de solución de controversias con una metodología unificada, de tal suerte que todas las mediciones sean realizadas de la misma manera y que los resultados puedan ser validados por ambas administraciones para determinar en cada caso si hubo o no un evento de interferencia.

Finalmente, para disminuir los tiempos de operación de los procesos descritos se recomienda acordar la automatización de procesos que estén basados en tecnologías y estándares suficientemente desarrollados como el IEEE 1900.5.



## Bibliografía



- 4G Americas. (2013). *Mobile Broadband Explosión: The 3GPP Wireless Evolution*. Washington.
- Al-Nuamimi, M., & Stephens, R. (1998). Measurements and prediction model optimization for signal attenuation in vegetation media at centimetre wave frequencies. *Proceeding in Electrical Engineering and Microwave Antenna Propagation.*, 145, 201-206.
- ANATEL. (2013). *Resolução nº 625, de 11 de novembro de 2013*. Brasil: ANATEL.
- Ancans, G., Stankevicius, E., & Bobrovs, J. (2015). Assessment of DVB-T Compatibility with LTE in Adjacent Channels in 700 MHz Band. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 73-77.
- ANE. (2010). *Conceptos del Espectro Radioeléctrico - Cartilla nro. 1*. Bogotá: Universidad ICESI - Agencia Nacional del Espectro.
- ANE. (2014). *Plan Técnico de Televisión (PTTV) Colombia*. Bogotá: Agencia Nacional del Espectro.
- ANE. (2014). *Resolución 419 de 2014*. Bogotá: ANE.
- ANE. (2016). *Resolución 405 de 2016*. Bogotá: ANE.
- ARIB. (2014). *ARIB STD-B31. Transmission system for digital terrestrial television broadcasting*. Association of Radio Industries and Businesses.
- ATDI. (2014). *Report for GSMA on the Coexistence of ISDB-T and LTE - W1306L4205*. The Beehive: ATDI.
- Basnet, S., Gunawardana, U., Biyanwilage, S., & Liyanapathirana, R. (2014). Interference analysis in digital TV reception with LTE systems in adjacent bands in Australian Context., (pp. 82-87). Sindy.
- Beltran, J., Fermín, J., & Hernández, M. (2012). Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil. *Multiciencias*, 305-310.
- Betancur, L., & Sierra, J. (2015). *Manual básico de aprendizaje ICS Telecom - ATDI*. Medellín, Colombia.
- Bordón López, R., Quintana, R., & Montejo Sánchez, S. (2012). Evaluación de modelos de propagación de canal inalámbrico. *Revista Cubana de Ingeniería*, 53-62.
- Canada, F. &. (2015). *Statement of interest between the federal communication commission of the United States of America and the Department of Industry of Canada related to the reconfiguration of the spectrum use in the UHF band for over-the-air television broadcasting and mobile broadband services*. FCC & Industry Canada.
- Celedonio, M., Masullo, P., Pulcini, L., & Vaser, M. (2015). Measured Interference of LTE Uplink Signals on DVB-T Channels. *Journal of telecommunications and information technology*, 74-85.
- CEPT & ECC. (2016, abril). *SEAMCAT Handbook*. Copenhagen, Denmark: ECC.
- CITEL. (2013). *Cooperación y convergencia entre servicios de radiodifusión y servicios móviles usando redes LTE*. Washington D.C.: CITEL.



- CITELE. (2014). *Doc.3597 rev. 1 - Informe Final de XXIII Reunión del Comité Consultivo Permanente II: Radiocomunicaciones*. Cartagena.
- CITELE. (2014). *Estudios de convivencia entre el sistema brasileño de TV digital y LTE en la banda de 700 MHz*. Mérida: CITELE.
- CITELE. (2015). *Lineamientos para establecer y actualizar acuerdos orientados a facilitar la coordinación del uso del espectro por los servicios fijos y móviles terrestres en zonas de coordinación*. Medellín, Colombia.
- Comes, A. R. (2010). *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España.
- COST. (1996). *COST 235 - Radio propagation effects on next generation fixed services terrestrial telecommunications systems*. Luxemburgo.
- CRC. (2013). Resolución 4337. Por la cual se actualizan y complementan las especificaciones técnicas aplicables a la red de Televisión Digital Terrestre – TDT establecidas en la Resolución CRC 4047 de 2012. Bogotá, Colombia: CRC.
- Cuevas, G. I. (2009). *Modelo de propagación electromagnética en una red UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- DVB Project Office. (2016, Agosto). *DVB.ORG*. Retrieved Noviembre 2015, from [https://www.dvb.org/resources/public/factsheets/dvb-t2\\_factsheet.pdf](https://www.dvb.org/resources/public/factsheets/dvb-t2_factsheet.pdf)
- EBU. (2014). *TECH 3348: Aspectos de frecuencia y planeación de red para DVB-T2*. Genova.
- ETSI. (2009). *ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*. Francia: European Telecommunication Standard Institute.
- ETSI. (2010). *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)*. Francia: European Telecommunications Standards Institute.
- ETSI. (2010). *ETSI TS 102 992 V1.1.1 Digital Video Broadcasting (DVB): Structure and Modulation of optional transmitter signature (T2-TX-SIG) for use with the DVB-T2 second generation digital terrestrial television broadcasting system*. Sophia Antipolis Cedex: ETSI.
- ETSI. (2011). *ETSI TR 101 190. Digital Video Broadcasting (DVB): Implementation Guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspect*. Sophia Antipolis Cedex.
- ETSI. (2012). *ETSI TS 102 773 V1.3.1 (2013), Digital Video Broadcasting (DVB); Modulator Interface (T2-MI) for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. Sophia Antipolis Cedex: ETSI.
- FCC. (2015). *Acuerdo de reconfiguración del espectro*. Estado Unidos.
- FCC. (2015). *Incentive auction task force releases initial clearing target optimization simulations*. FCC. Washington, D.C.: Federal communications Commission.
- FCC. (2016). *Clearing Target of 114 Megahertz set for Stage 2 of the Broadcast Television Spectrum Incentive Auction; Stage 2 Bidding in the Reverse Auction Will Start on September 13, 2016*. FCC. Washington, D.C: Federal Communications Commission .
- Fuentes, M. (2013). *Coexistencia entre servicios TDT y 4G en la banda de 700 MHz*. España: Universidad de Valencia.





- Garro, E. (2013). *Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gebner, C. (2011). *Long Term Evolution: A concise introduction to LTE and its measurement requirements*.
- GSMA LA. (2015). *Análisis de la situación actual y estudio de coexistencia de sistemas de radiodifusión y servicios LTE en la banda de 700 MHz en Perú*. Cataluña: GSMA LA.
- Gómez-Barquero, D., López-Sánchez, J., Martínez, G., Ribadeneira-Ramírez, J., & Garro, E. (2014). Frequency and Network Planning and Optimization of the Digital Terrestrial Television DVB-T2 Networks in Colombia. Valencia, España: iTEAM, Universitat Politècnica de València.
- Hong, H., Son, H., & Chong, Y. (2014). Protection Ratio between DVB-T2 and LTE System. *IEEE ICTC*, 792-793.
- IEEE. (2008). *1900.2. IEEE Recommended practice for the analysis of in-band and adjacent band interference and coexistence between radio systems*. New York: IEEE.
- IEEE. (2011). *1900.5. Standar for policy language requirements and system architectures for dynamic spectrum access systems*. New York: IEEE.
- Industry Canada. (2015). *Decision on repurposing the 600 MHz (SLPB-004-15)*.
- Ivo, R., & Queiroz, R. (2008). *Sistemas de radiodifusión digital terrestre*. Kathrein.
- MathWorks. (2016, 10 02). *Least-Squares Fitting*. Retrieved 10 02, 2016, from <http://www.mathworks.com/help/curvefit/least-squares-fitting.html>
- MinTIC - ANE. (2016). *Manual de gestión nacional del espectro radioeléctrico. - Ingeniería del Espectro Radioeléctrico. Título II*. Bogotá, Colombia.
- MINTIC. (2015). *Acuerdo Modificatorio*. Medellín, Colombia.
- Mohan, C. C. (2016). *Spectrum Consumption Model Builder: A software tool to enhance spectrum sharing*. WlmmComm.
- Moura, F. (2014). Pruebas de SET revelan interferencia. *Revista Da SET*, 44-54.
- Parker, I., & Munday, S. (2011). *Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interference into DTT Receivers*. ERA Technology, RF & EMC Group, Leatherhead.
- Pedraza, L. B. (2010). *Estudio de modelos de propagación en el entorno de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Bogotá: Visión Investigadora.
- Phillips, C., Sicher, D., & Grunwald, D. (2013). "A survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods". *IEEE Communications & Tutorials*, 15(1), 255-270.
- Promax. (2016). *HD Ranger 2: Manual de instrucciones*.
- R&S. (2012). *R&S ETL TV Analyser First Steps*. Muehldorfstr: Rohde & Schwarz.
- Rábanos, J. M. (1995). *Transmisión por radio*. España: Centro de Estudios Ramon Areces.
- Rappaport, T. (2002). *Wireless communications principles and practice*. Estados Unidos: Prentice-Hall.
- Rumney, M. (2012). 3GPP LTE Standars Update. Release 11, 12 and Beyond.
- Sendrei, L., Felix, M., Oravej, J., & Marchevsky, S. (2015). Coexistence simulation of DVB-T/T2 and LTE800 in Seamcat. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 32-38.



- Song Meng, Y., Hui Lee, Y., & Chong Ng, B. (2009, May). Empirical Near Ground Path Loss Modeling in a Forest at VHF and UHF Bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(5), 1461-1468.
- Tektronix. (2015). *MDO 3000 series datasheet*.
- Tomasi, W. (1996). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas* (2ª ed.). El Conde, México: Prentice Hall.
- Torico, S., Bertoni, H., & Lang, R. (1998). Modeling Tree Effects on Path Loss in a Residential Environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 46(6), 872-880.
- UIT. (1995). *UIT-R SM 1049. Método de gestión del espectro destinado a facilitar el proceso de asignación de frecuencias a estaciones de servicios terrenales en zonas fronterizas*. UIT.
- UIT. (2008). *Background on IMT-Advanced*. Ginebra: ITU.
- UIT. (2011). *Manual de comprobación técnica del espectro*. Retrieved 6 2, 2015, from UIT: [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-S.pdf)
- UIT. (2012). *Frequency arrangement for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunication (IMT) in the bands identified for IMT in the Radio Regulations (RR)*. Ginebra: ITU.
- UIT. (2013). *UIT-R BT 2033: Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, para la segunda generación de los sistemas de radiodifusión de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas*. Ginebra: UIT.
- UIT. (2014). *Co-channel sharing and compatibility studies between digital terrestrial television broadcasting and international mobile telecommunication in the frequency band 694-790 MHz in the GE06 planning area*.
- UIT. (2014). *UIT-R BT 1368-12 Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas UHF/VHF*. Genova.
- UIT. (2015). *UIT-R BT 1306. Métodos de corrección de errores, de configuración de trama de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal*. Ginebra: UIT.
- UIT. (2016). *Reglamento de Radiocomunicaciones - Artículos*.
- UIT. (2016). *UIT-R BT 2215-6 Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers*. Génova.
- UIT. (2016). *UIT-R Recomendación P.833-9 Atenuación en la Vegetación*.
- UIT-R. (1986). *Report 236-6, Influence of Terrain Irregularities and Vegetation on Tropospheric Propagation* (Vol. 5). Dubrovnik.
- UIT-R. (1994). *Recomendación P-525-2 Cálculo de la atenuación en el espacio libre*. Ginebra.
- UIT-R. (2012). *Report BT.2215-2 Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers*. Ginebra.
- Weissberger, M. (1981). *An initial critical summary of models of predicting the attenuation of radio waves by foliage*. Annapolis: Electromagnetic Compatibility Analysis Centre.



## Glosario



<b>3GPP.</b>	<i>3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project.</i>
<b>ACIR.</b>	<i>Adjacent Channel Interference Ratio.</i>
<b>ACLR.</b>	<i>Adjacent Channel Leakage Ratio.</i>
<b>ACS.</b>	<i>Adjacent Channel Selectivity.</i>
<b>AEB.</b>	<i>Adyacente en banda.</i>
<b>AFB.</b>	<i>Adyacente fuera de banda.</i>
<b>AMC.</b>	<i>Adaptative Modulation and Coding.</i>
<b>ANE.</b>	<i>Agencia Nacional del Espectro - Colombia.</i>
<b>ANTV.</b>	<i>Autoridad Nacional de Televisión - Colombia.</i>
<b>APT.</b>	<i>Asia-Pacific Telecommunity.</i>
<b>ATDI.</b>	<i>Advanced Topographic Development &amp; Images Ltd.</i>
<b>BICM.</b>	<i>Bit Interleaving Coding and Modulation.</i>
<b>BS.</b>	<i>Base Station.</i>
<b>C/I.</b>	<i>Signal to Interference Ratio.</i>
<b>CCP.</b>	<i>Comité Consultivo Permanente.</i>
<b>CITEL.</b>	<i>Comisión Interamericana de Telecomunicaciones.</i>
<b>CMR.</b>	<i>Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones.</i>
<b>CNABF.</b>	<i>Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia.</i>
<b>CoCa.</b>	<i>Cocanal.</i>
<b>COFDM.</b>	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing.</i>
<b>CP.</b>	<i>Continual Pilots.</i>
<b>CQI.</b>	<i>Channel Quality Indicator.</i>
<b>CRC.</b>	<i>Comisión de Regulación de Comunicaciones - Colombia.</i>
<b>DL.</b>	<i>Downlink.</i>
<b>DRSS.</b>	<i>Desired Received Signal Strength.</i>
<b>DVB-T.</b>	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial.</i>
<b>DVB-T2.</b>	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial 2.</i>
<b>eNB.</b>	<i>Evolved Node B.</i>
<b>ETSI.</b>	<i>European Telecommunications Standards Institute.</i>
<b>FCC.</b>	<i>Federal Communications Commission - EE. UU.</i>
<b>FDD.</b>	<i>Frequency-Division Duplexing.</i>
<b>FEC.</b>	<i>Forward Error Correction.</i>
<b>GSM.</b>	<i>Global System for Mobile Communications.</i>
<b>GSMA.</b>	<i>GSM Association.</i>
<b>HD.</b>	<i>High Definition.</i>
<b>HP.</b>	<i>High Priority.</i>



<b>HSPA.</b>	<i>High Speed Data Access.</i>
<b>iDTV.</b>	<i>Integrated Digital Television.</i>
<b>IEEE.</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
<b>IFT.</b>	<i>Instituto Federal de Telecomunicaciones - México.</i>
<b>IDFT.</b>	<i>Inverse Discrete Fourier Transform.</i>
<b>IMT.</b>	<i>Telecomunicaciones Móviles Internacionales.</i>
<b>IRSS.</b>	<i>Interfering Received Signal Strength.</i>
<b>ISDB-T.</b>	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial.</i>
<b>ISI.</b>	<i>Inter Symbol Interference.</i>
<b>ITEAM.</b>	<i>Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia – España.</i>
<b>LDPC.</b>	<i>Low Density Parity Check.</i>
<b>LP.</b>	<i>Low Priority.</i>
<b>LTE.</b>	<i>Long Term Evolution.</i>
<b>MAC.</b>	<i>Media Access Control.</i>
<b>MinTIC.</b>	<i>Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones - Colombia.</i>
<b>MCL.</b>	<i>Minimun Coupling Loss.</i>
<b>NI.</b>	<i>National Instruments.</i>
<b>NSMS.</b>	<i>Nacional Spectrum Management System.</i>
<b>OFDMA.</b>	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.</i>
<b>PAPR.</b>	<i>Peak Average Power Ratio.</i>
<b>PCR.</b>	<i>Policy Conformance Reasoner.</i>
<b>PE.</b>	<i>Policy Executor.</i>
<b>PIRE.</b>	<i>Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.</i>
<b>PMP.</b>	<i>Policy Management Point.</i>
<b>PR.</b>	<i>Protection Ratio.</i>
<b>PRA.</b>	<i>Potencia Radiada Aparente.</i>
<b>PTTV.</b>	<i>Plan Técnico de Televisión - Colombia.</i>
<b>QAM.</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation.</i>
<b>QPSK.</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying.</i>
<b>RAS.</b>	<i>Servicios de Radioastronomía.</i>
<b>RR.</b>	<i>Reglamento de Radiocomunicaciones.</i>
<b>RRC.</b>	<i>Radio Resource Control.</i>
<b>SBTVD.</b>	<i>Sistema Brasileiro de Televisão Digital.</i>
<b>SD.</b>	<i>Standard Definition.</i>
<b>SDR.</b>	<i>Software Defined Radio.</i>
<b>SEM.</b>	<i>Spectral Emission Mask.</i>
<b>SFP.</b>	<i>Subjective Failure Point.</i>
<b>SINR.</b>	<i>Signal to interference plus Noise Ratio.</i>
<b>SP.</b>	<i>Scattered Pilots.</i>
<b>SNR.</b>	<i>Signal to noise ratio.</i>
<b>STB.</b>	<i>Set-Top Box.</i>



<b>TDT.</b>	Televisión Digital Terrestre.
<b>TrBk.</b>	Transport Blocks.
<b>TPS.</b>	Transmission Parameter Signaling Pilots.
<b>TS.</b>	Transport Stream.
<b>TSP.</b>	Transport Stream Protocol.
<b>UE.</b>	User Equipment.
<b>UHF.</b>	Ultra High Frequency.
<b>UIT.</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>UL.</b>	Uplink.
<b>UMTS.</b>	Universal Mobile Telecommunication System.
<b>UTRA.</b>	UMTS Terrestrial Radio Access.
<b>VBER.</b>	Verify Bit Error Rate.
<b>VHF.</b>	Very High Frequency.
<b>WGS.</b>	World Geodetic System.



## Anexo 1. Análisis de interferencia



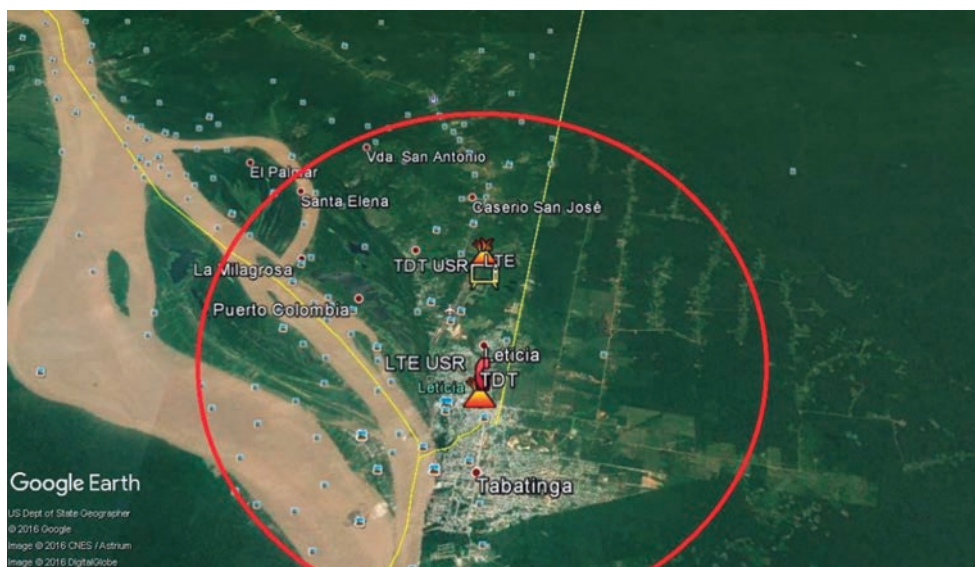
El presente anexo describe los temas relacionados con el análisis de interferencia, desde las simulaciones realizadas en ICS Telecom hasta pruebas de laboratorio desarrolladas.

### Protocolo de simulaciones de interferencia

En esta sección se realiza una descripción de los resultados de las simulaciones de interferencia entre las señales de TDT y LTE para tres escenarios diferentes en la frontera colombo-brasilera, específicamente en la zona entre Leticia y Tabatinga, realizados a partir del *software* ICS Telecom; también se describen los parámetros y escenarios que se tuvieron en cuenta para dichas simulaciones.

**Área de cobertura.** El área que se seleccionó para definir el escenario de las simulaciones corresponde a la ciudad de Leticia y al municipio de Tabatinga.

Para el estudio se determinó un radio de 20 km con el fin de cubrir la totalidad del casco urbano y parte de la zona rural, también se observan las dos antenas transmisoras, tanto de TDT como de LTD, dos usuarios de estos servicios (**Figura 88**).



**Figura 88.** Área de cobertura de simulación en el *software* ICS Telecom. Fuente: Google Earth.

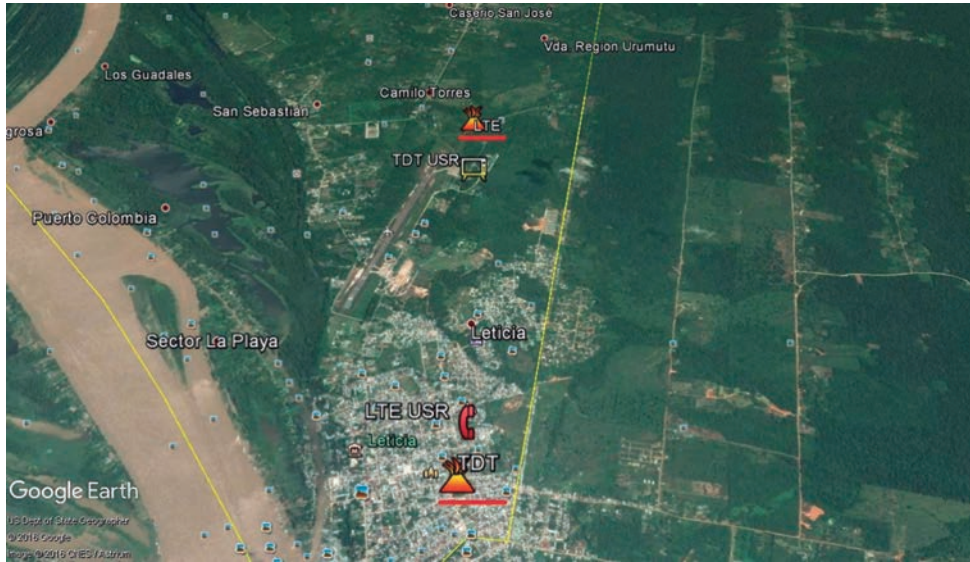
**Escenarios de simulación.** Los parámetros de las antenas transmisoras se muestran en la **Tabla 49** y su ubicación se puede observar en la **Figura 89**.





**Tabla 49.** Ubicación de las antenas transmisoras.

Antena	Ubicación	
	Latitud	Longitud
LTE	04° 10' 48" S	69° 56' 10" W
TDT	04° 12' 59.34" S	69° 56' 11.60" W



**Figura 89.** Ubicación de las antenas transmisoras. Fuente: Google Earth.

Los parámetros de las antenas transmisoras se muestran en la **Tabla 50**

**Tabla 50.** Parámetros de las antenas transmisoras.

Parámetros	Transmisor TDT		Transmisor LTE	
	Altura de la antena Tx (m)	100		30
Potencia de Tx (W)	2000		2	
Ancho de banda (MHz)	6		20	
Frecuencias (MHz)	614-668		614-656	
Sistema Radiante Omnidireccional	Ganancia (dBi)	10.49	Ganancia (dBi).	14
	Polarización	Horizontal	Polarización	Horizontal

Para simular la interferencia tanto de las señales TDT como LTE en esta zona se determinaron dos puntos de recepción distribuidos como se muestra en la **Figura 90**. Las distancias entre estos y las antenas transmisoras varían dependiendo del escenario.



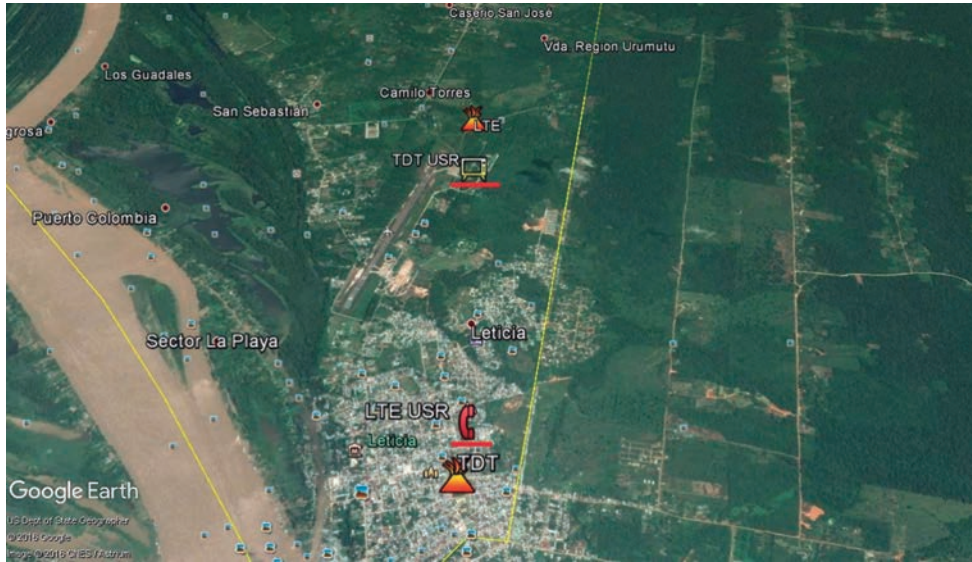


Figura 90. Ubicación de los receptores. Fuente: Google Earth.

Los parámetros de las antenas receptoras TDT y LTE se muestran en la **Tabla 51**.

Tabla 51. Características de las antenas receptoras.

Parámetros	Receptor TDT		Receptor LTE	
Frecuencia mínima (MHz)	614		614	
Frecuencia máxima (MHz)	656		668	
Altura de la antena Rx (m)	1.5		1.5	
Sistema Radiante Omnidireccional	Ganancia (dBi)	30	Ganancia (dBi)	6
	Polarización	Horizontal	Polarización	Vertical

**Caso 1.** El primer escenario consistió en realizar 15 pruebas dejando fija la frecuencia de TDT y variando la frecuencia LTE. Hay cuatro tipos de interferencia AFB, dos AEB y tres cocanal. En la **Figura 91** se pueden observar las características de este escenario.

**Caso 2.** En este escenario se realizaron siete pruebas en las cuales la frecuencia de LTE se mantuvo fija y la frecuencia TDT se varió. Se presentan dos tipos de interferencia AFB, dos AEB y tres cocanal. En la **Figura 92** se puede observar las características de este escenario.

**Metodología de las simulaciones.** Para el desarrollo de las simulaciones se utilizó el modelo DEM con la cartografía de Colombia entregada por la ANE y se definió la ocupación del suelo como zona rural boscosa. Además, se determinó la paleta de convención de valores C/I, tal como se especifica en la **Tabla 52**. Como modelo de propagación se seleccionó el Okumura-Hata Rural.



Prueba	LTE		TDT		Banda de Guarda [MHz]	Tipo de interf	Frecuencia									
	Banda [MHz]	Frec. Central	Banda [MHz]	Frec. Central			Ras	CH 38	CH 39	CH 40	CH 41	CH 42	CH 43	CH 44	CH 45	CH 46
1	F0 614 F1 634	Fc 624	F0 638 F1 644	Fc 641	4	AFB		LTE		TDT						
2	F0 615 F1 635	Fc 625	F0 638 F1 644	Fc 641	3	AFB		LTE		TDT						
3	F0 616 F1 636	Fc 626	F0 638 F1 644	Fc 641	2	AFB		LTE		TDT						
4	F0 617 F1 637	Fc 627	F0 638 F1 644	Fc 641	1	AFB		LTE		TDT						
5	F0 618 F1 638	Fc 628	F0 638 F1 644	Fc 641	0	AFB		LTE		TDT						
6	F0 621 F1 641	Fc 631	F0 638 F1 644	Fc 641		AEB		LTE		TDT						
7	F0 624 F1 644	Fc 634	F0 638 F1 644	Fc 641		Cocanal		LTE		TDT						
8	F0 631 F1 651	Fc 641	F0 638 F1 644	Fc 641		Cocanal		LTE		TDT						
9	F0 638 F1 658	Fc 648	F0 638 F1 644	Fc 641		Cocanal		LTE		TDT						
10	F0 641 F1 661	Fc 651	F0 638 F1 644	Fc 641		AEB		LTE		TDT						
11	F0 644 F1 664	Fc 654	F0 638 F1 644	Fc 641	0	AFB		LTE		TDT						
12	F0 645 F1 665	Fc 655	F0 638 F1 644	Fc 641	1	AFB		LTE		TDT						
13	F0 646 F1 666	Fc 656	F0 638 F1 644	Fc 641	2	AFB		LTE		TDT						
14	F0 647 F1 667	Fc 657	F0 638 F1 644	Fc 641	3	AFB		LTE		TDT						
15	F0 648 F1 668	Fc 658	F0 638 F1 644	Fc 641	4	AFB		LTE		TDT						

Figura 91. Simulaciones para el caso 1.

Prueba	LTE			TDT			Banda de Guarda [MHz]	Tipo de interf	Frecuencia						
	Banda [MHz]	Frec. Central [MHz]	Frec. Central [MHz]	Banda [MHz]	Frec. Central [MHz]	Frec. Central [MHz]			Ras	CH 39	CH 40	CH 41	CH 42	CH 43	CH 44
1	F0 631 F1 651	Fc 641	Fc 641	F0 620 F1 626	Fc 623	Fc 623	5	AFB	TDT		LTE				
2	F0 631 F1 651	Fc 641	Fc 641	F0 626 F1 632	Fc 629	Fc 629		AEB	TDT		LTE				
3	F0 631 F1 651	Fc 641	Fc 641	F0 632 F1 638	Fc 635	Fc 635		Cocanal		TDT	LTE				
4	F0 631 F1 651	Fc 641	Fc 641	F0 638 F1 644	Fc 641	Fc 641		Cocanal			TDT	LTE			
5	F0 631 F1 651	Fc 641	Fc 641	F0 644 F1 650	Fc 647	Fc 647		Cocanal				TDT	LTE		
6	F0 631 F1 651	Fc 641	Fc 641	F0 650 F1 656	Fc 653	Fc 653		AEB			LTE		TDT		
7	F0 631 F1 651	Fc 641	Fc 641	F0 656 F1 662	Fc 659	Fc 659	5	AFB			LTE			LTE	TDT

Figura 92. Simulaciones para el caso 2.

**Tabla 52.** Relación de colores para relaciones C/I.

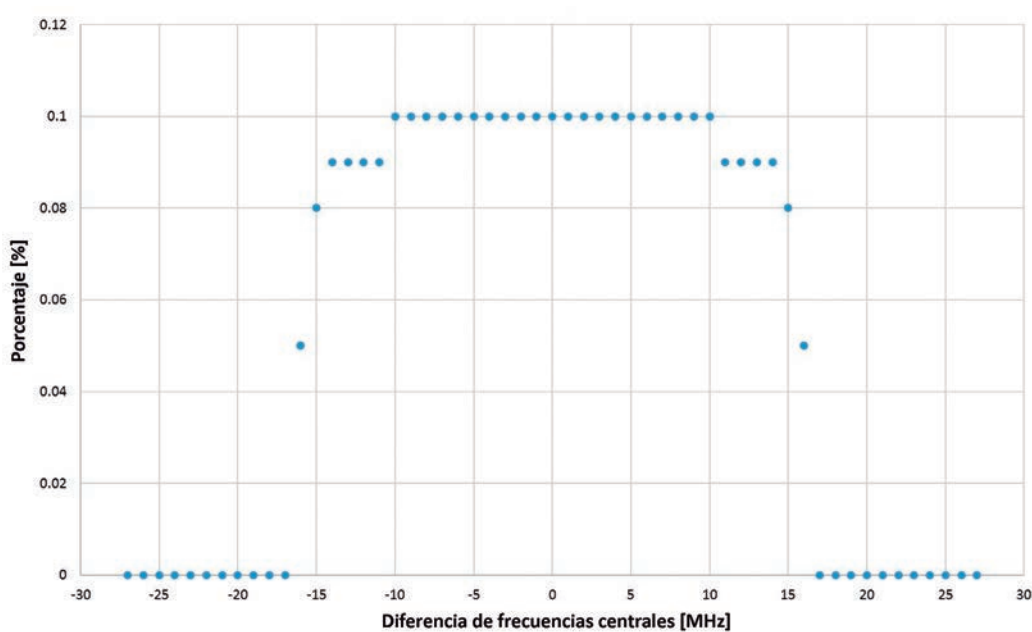
Color	Valores C/I (dB)
Verde	$-\infty$ a 20
Verde oliva	20 a 30
Amarillo	30 a 45
Amarillo quemado	45 a 55
Rojo	55 a 70
Café	70 a 80
Café claro	80 a $\infty$

Para cada una de las antenas se agregó un elemento TX / RX que cumple la función tanto de transmisor como de receptor y se configuraron los parámetros técnicos descritos en las **Tablas 50 y 51**.

Para el cálculo de la interferencia se seleccionó la opción mapa C/I y las máscaras para las relaciones de protección se definieron como N = 0, 14; N = 1, -10; N = 2, -40.

### Resultados de las simulaciones

**Caso 1.** Al hacer la relación de estos valores con la frecuencia de separación de las frecuencias centrales se evidenció que para diferencias entre -7 y 7 MHz, el porcentaje de interferencia es del 0.1 %, lo cual muestra que una señal TDT interfiere con mayor facilidad a una señal LTE que una LTE a una TDT. El valor mínimo está en 0 % y esto se observa en la **Figura 93**.

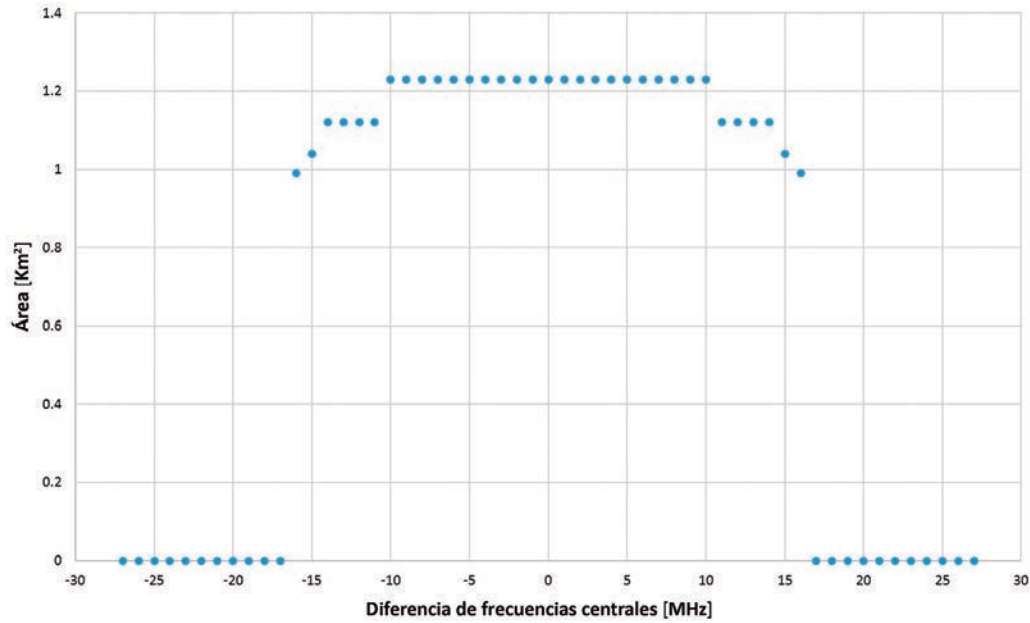


**Figura 93.** Porcentaje de interferencia para el escenario A.1.



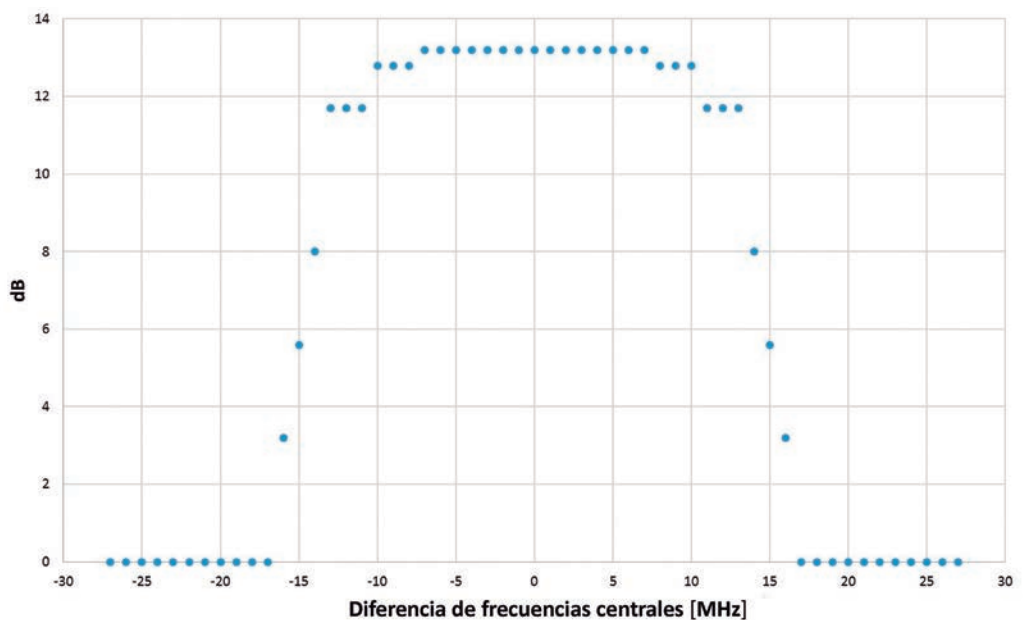


El área interferida es mayor en este caso. El área más grande que puede sufrir interferencia es de 1.23 km<sup>2</sup> y la menor, de 0 km<sup>2</sup> **Figura 94**.



**Figura 94.** Área de interferencia para el escenario A.1.

Así mismo, los resultados muestran que la C/I requerida debe ser mínimo de 13.2 dB, tal como se observa en la **Figura 95**.

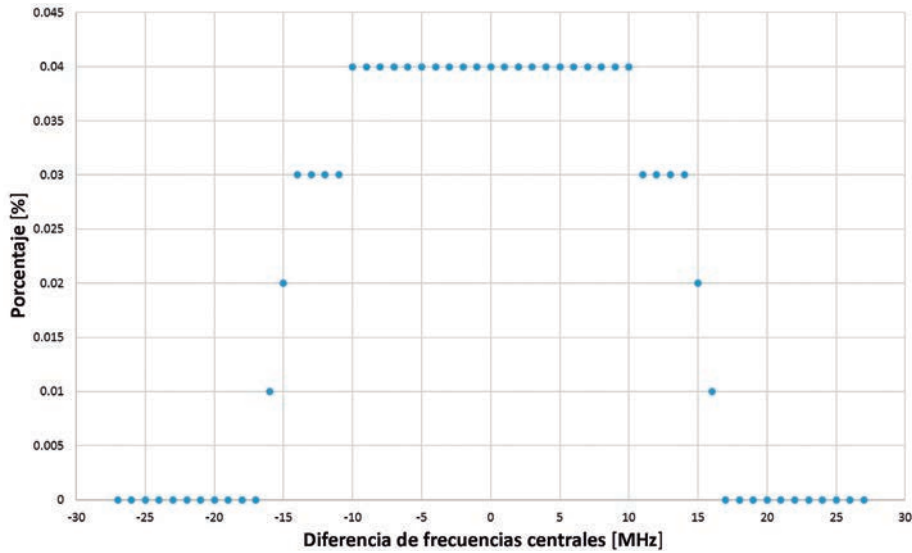


**Figura 95.** Relación C/I requerida para el escenario A.1.



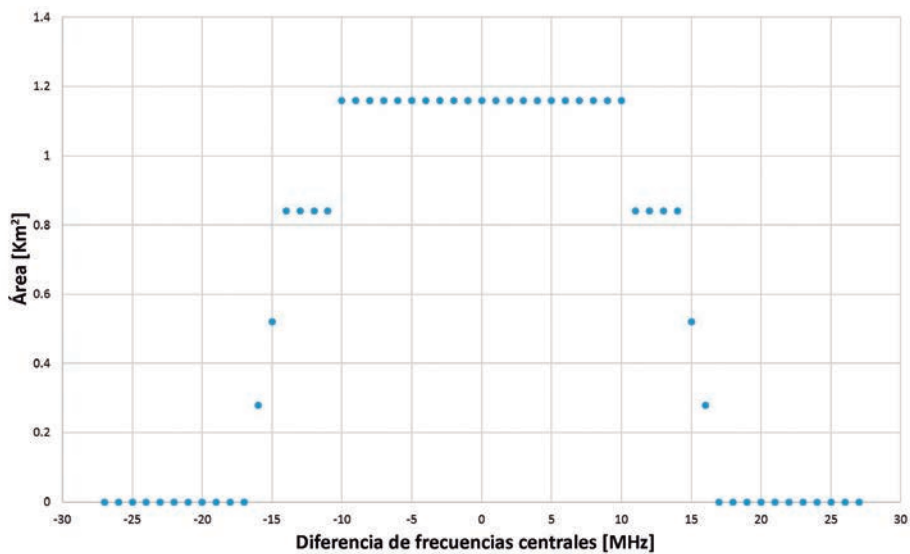


Relacionando estos valores con la frecuencia de separación entre las frecuencias centrales de los servicios se encontró, para el caso 1, que cuando la diferencia está entre -10 y 10 MHz, el porcentaje de interferencia se mantiene constante en 0.04 %. Para separaciones mayores que 10 MHz, este valor disminuye a medida que la frecuencia aumenta. Caso contrario se da para separaciones menores que -10 MHz. Esto se puede observar en la **Figura 96**. El valor mínimo se registra en 0 %.



**Figura 96.** Porcentaje de interferencia para el escenario B.1.

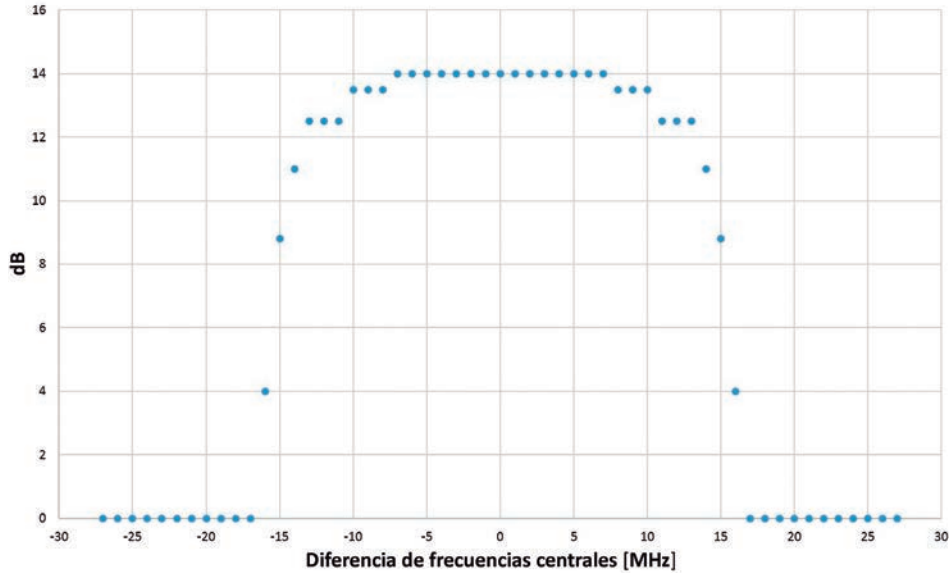
El mismo comportamiento se evidencia con respecto al área interferida. En la **Figura 97** se puede observar que el área con mayor interferencia es de 1.16 km<sup>2</sup> y la menor de 0 km<sup>2</sup>.



**Figura 97.** Área de interferencia para el escenario B.1.

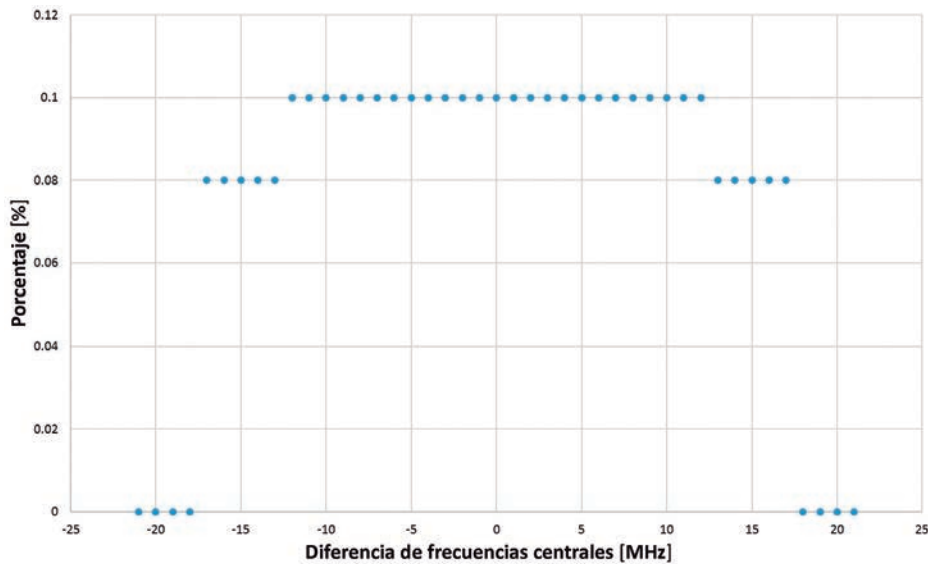


Los resultados también arrojaron que la C/I requerida para separaciones de frecuencia entre -7 y 7 MHz debe ser mínimo 14 dB. Para diferencias más grandes se observa que este valor debe oscilar entre 4 y 14 dB para evitar casos de interferencia. Esto se observa en la **Figura 98**.



**Figura 98.** Relación C/I requerida para el escenario B.1.

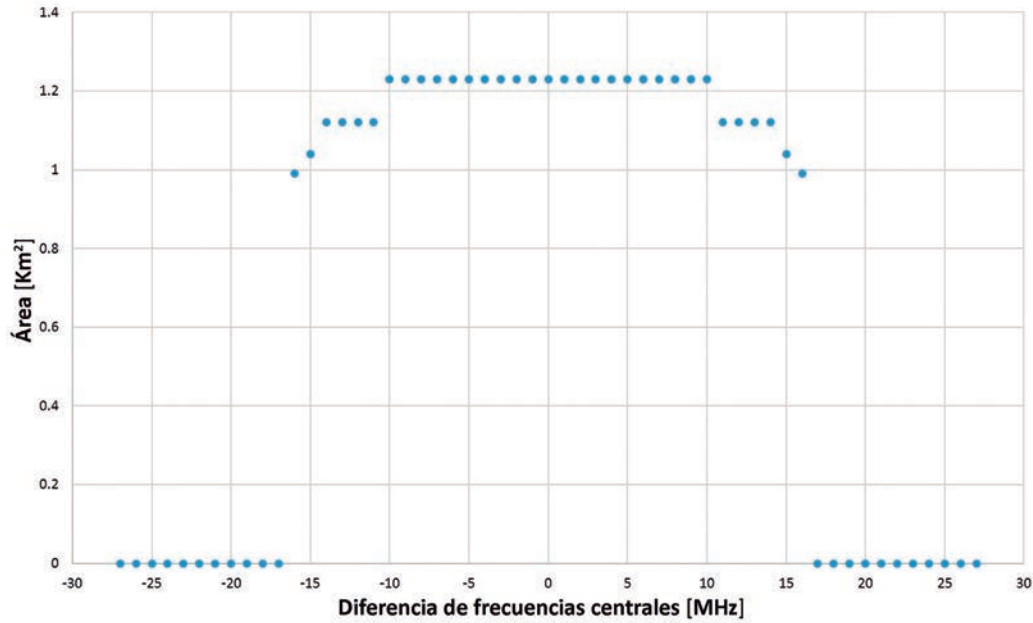
**Caso 2.** Posterior a la ejecución de los cambios planteados se observó que cuando las diferencias están entre -12 y 12 MHz, el porcentaje de interferencia es del 0.1 %. Esto se muestra en la **Figura 99**.



**Figura 99.** Porcentaje de interferencia para el escenario A.2.

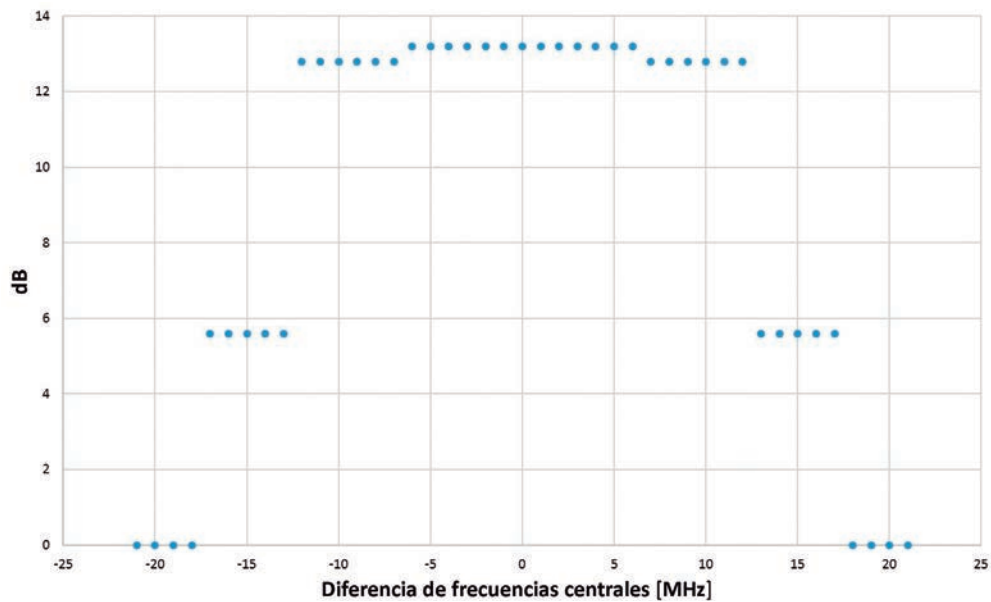


En cuanto al área interferida, también se observa un valor de 1.23 km<sup>2</sup> cuando se produce interferencia cocanal. En la **Figura 100** se puede observar esto.



**Figura 100.** Área de interferencia para el escenario A.2.

Los resultados de la C/I requerida arrojan que este valor debe estar entre 13.2 y 5.6 dB, tal como se observa en la **Figura 101**.



**Figura 101.** Relación C/I requerida para el escenario A.2.



Para el caso 2 se encontró que cuando la diferencia está entre -7 y 7 MHz, el porcentaje de interferencia es de 0.04. Cuando la separación es mayor, este valor disminuye a 0.03 (Figura 102). El valor mínimo se registra en 0 %.

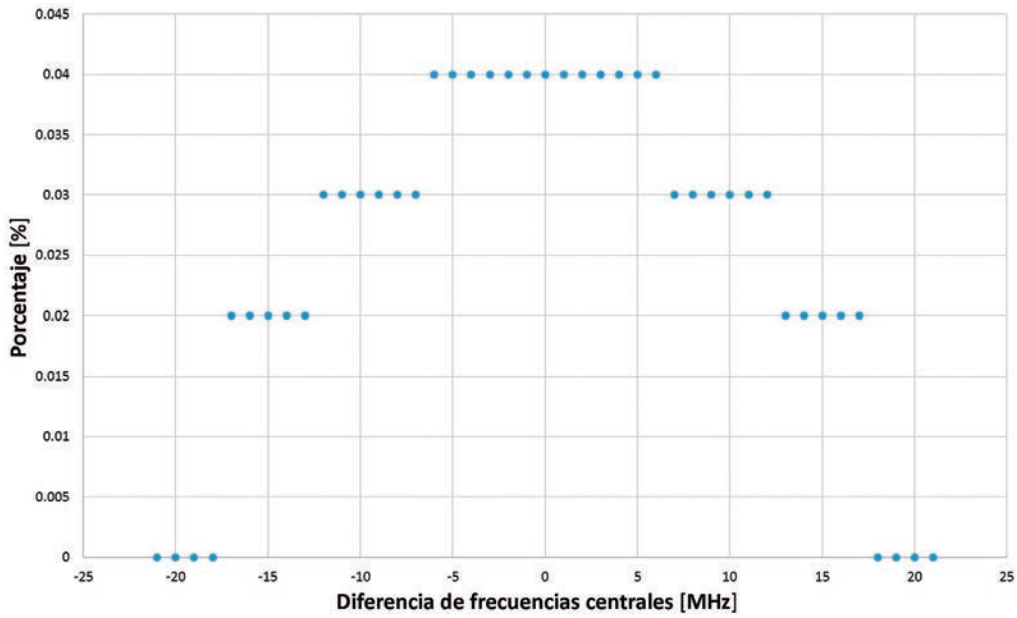


Figura 102. Porcentaje de interferencia para el escenario B.2.

En la Figura 103 se puede observar que el área con mayor interferencia es de 1.16 km<sup>2</sup> y la menor de 0.28 km<sup>2</sup>.

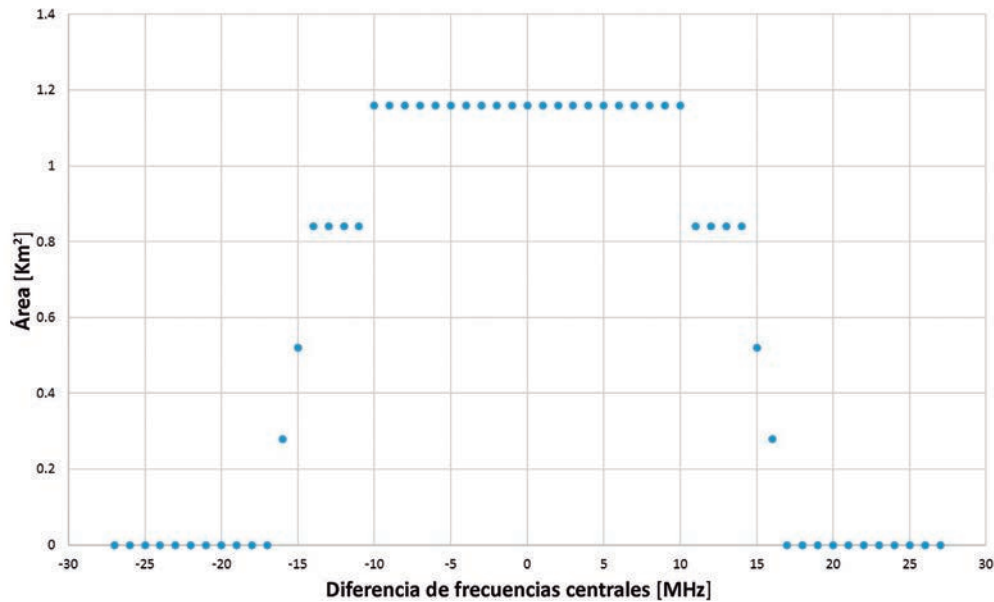
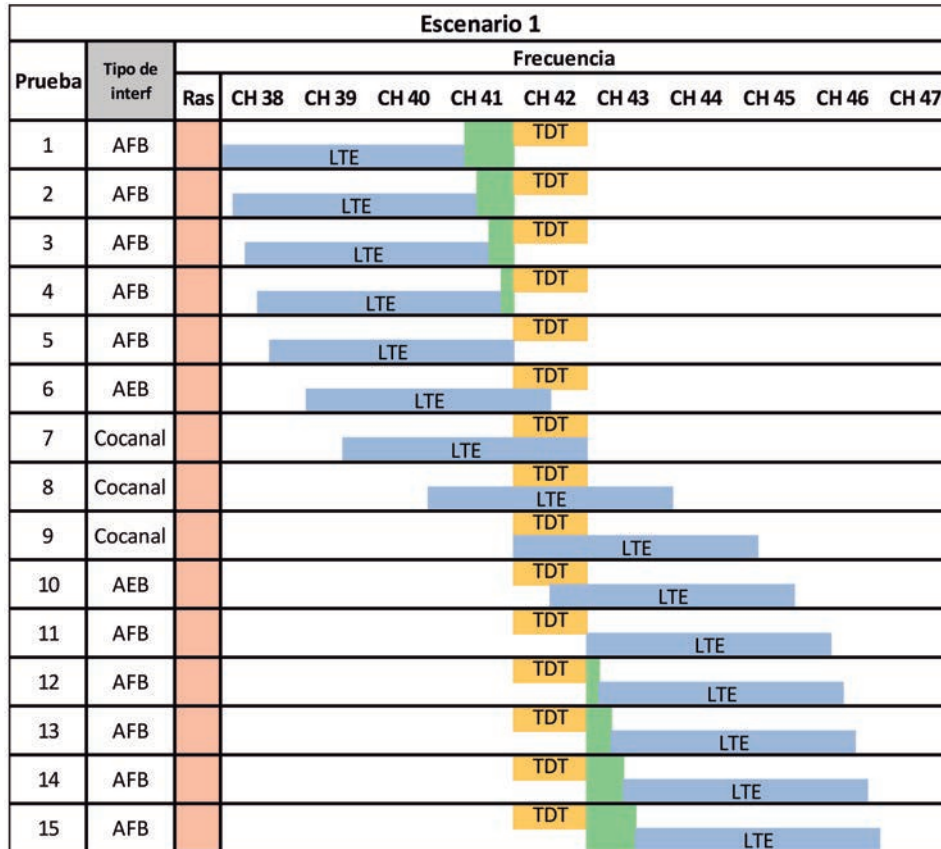


Figura 103. Área de interferencia para el escenario B.2.



La C/I requerida debe ser mínimo de 14 dB cuando la separación de frecuencia es de -7 y 7 MHz. Esto se observa en la **Figura 104**.



**Figura 104.** Relación C/I requerida para el escenario B.2.

Los resultados anteriores se obtuvieron para un valor de potencia de 2000 W y 2 W, correspondientes al transmisor de TDT y LTE, respectivamente. Se observó que al aumentar la potencia del transmisor TDT a 19.000 W, tanto el área interferida como el porcentaje de interferencia disminuyen. En el caso de la interferencia cocanal para el escenario 1, el porcentaje de interferencia pasa de 0.04 % a 0.01 % y el área de 1.16 km<sup>2</sup> a 0.28 km<sup>2</sup>. En el escenario 2 se presenta la misma situación.

Si se disminuye la potencia del transmisor TDT a 200 W, ocurre lo contrario y los valores de interferencia aumentan. Para la interferencia cocanal en el escenario 2, el porcentaje de interferencia pasa de 0.04 % a 0.21 % y el área de 1.16 km<sup>2</sup> a 5.92 km<sup>2</sup>.

Si se varía la potencia de los transmisores, los valores de interferencia cambian considerablemente. Cuando se aumenta la potencia del transmisor TDT a 19000 W, tanto el área interferida como el porcentaje de interferencia aumentan. En el caso de la interferencia cocanal para el escenario 1, el porcentaje de interferencia pasa de 0.1 % a 0.6 % y el área de 1.23 km<sup>2</sup> a 6.97 km<sup>2</sup>. En el escenario 2 se presenta la misma situación.



Si se disminuye la potencia del transmisor TDT a 200 W, ocurre lo contrario y los valores de interferencia aumentan. Para la interferencia cocanal en el escenario 2, el porcentaje de interferencia pasa de 0.1 % a 0.03 % y el área de 1.23 km<sup>2</sup> a 0.86 km<sup>2</sup>.

### Protocolo de pruebas de laboratorio

Buscando definir los umbrales de protección adecuados en el modelo de propagación de la propuesta metodológica, este documento plantea el protocolo básico para las mediciones de pruebas de laboratorio con el fin de dimensionar las afectaciones de la interferencia de los servicios de LTE y TDT en el caso de la frontera Colombia-Brasil.

En todos los escenarios se busca medir tres tipos de interferencia: el primero es la interferencia cocanal, en la que dos señales se encuentran en el mismo canal espectral y una de las dos no sobrepasa espectralmente a la otra, es decir, está totalmente contenida en una de las señales. También se analizará la interferencia adyacente en banda, en la cual la frecuencia central de las dos es diferente y se caracteriza por que el hombro de una de las señales se encuentra dentro de la otra señal. El tercer tipo de interferencia es la adyacente fuera de banda, en la cual no existe solapamiento en frecuencia, pero las bandas se encuentran lo suficientemente cerca como para generar interferencia.

**Conexiones de equipos.** Con el fin de realizar las mediciones de interferencia se espera obtener una medición congruente entre equipos; por ello se plantea la conexión mostrada en la **Figura 47**, en la cual, el inicio de la generación de señales interferentes o víctima será controlado con *software* en los equipos USRP para la generación de LTE y SFE para la generación de la televisión digital. Para la lectura de señales se obtendrán mediciones del receptor del USRP, de un analizador de espectro y de un ETL Tv Analyzer.

**Escenarios de análisis.** Como planteamiento inicial se busca medir la interferencia de LTE a TDT y de TDT a LTE; para ello se utilizó el modelo de propagación Okumura-Hata con las características mostradas en la **Tabla 53**.

**Tabla 53.** Características de transmisión LTE para el modelo Okumura-Hata.

Característica	LTE	TDT	Característica	LTE	TDT
Frecuencia (MHz)	656	656	Ganancia de la antena (w)	1000	1000
Altura antena (m)	30	150	Ganancia de la antena (dBi)	14	10
Altura móvil (m)	1.5	3.0	Potencia TX (dBm)	40	63
Factor de corrección	0.003521	3.601413			

Para la construcción del modelo se tuvo en cuenta un entorno rural y se plantean las siguientes relaciones de distancia-potencia en el receptor (**Figura 41**).

Teniendo el planteamiento de distancias entre los receptores y las antenas y la percepción de potencia en dichos puntos, se presenta la propuesta de dos escenarios de análisis en movimiento de canales para los servicios de televisión digital brasileña y LTE.





El primero busca medir la interferencia entre servicios manteniendo constante el canal de televisión en Brasil y realizando movimientos espectrales en la banda de telefonía celular para un enlace de bajada (*Downlink*); durante este movimiento se contempla una banda de guarda desde los 4 MHz a los 0 MHz en la parte inferior y superior de la banda de TDT de forma simétrica

El segundo contiene desplazamientos en espectro para un canal de televisión en una banda fija de LTE con cuatro bloques de *Downlink* y contempla solo una banda de guarda de 5 MHz de forma simétrica (superior e inferior) respecto a la banda de LTE.

Aunque existe una mayor cantidad de posibilidades para probar dentro de nuestra propuesta, las condiciones de laboratorio nos limitan a las siguientes:

- Único enlace de LTE: *Downlink* a cuatro bloques de 5 MHz.
- Solo es posible transmitir una señal de televisión digital con el estándar DVB-T a una sola frecuencia, lo que limita las pruebas a un solo canal.

A continuación se presentan de forma detallada los escenarios de prueba:

**Caso 1.** En este escenario se busca medir la afectación de los servicios al existir movimientos espectrales para la banda de LTE.

Se mantendrá fijo el canal 42 brasileño de televisión digital; para el sistema LTE se realizarán movimientos espectrales buscando los siguientes casos:

- Interferencia de canal adyacente fuera de banda (AFB).
- Interferencia de canal adyacente en banda (AEB).
- Interferencia cocanal.

Como se muestra en la primera columna de la **Tabla 54** y , en la **Figura 105**, dichos movimientos espectrales se modificarán hasta llegar a la prueba 15.

Para ello se plantea un movimiento de frecuencias como el mostrado en la **Figura 105**.

**Caso 2.** En este escenario se busca medir la afectación de los servicios al existir movimientos espectrales de la banda de TDT usando el esquema de conexión indicado en la **Figura 47**.

Se mantendrá fijo el bloque de *Downlink* de LTE (con frecuencia central en el canal 42), como se muestra en la **Figura 106**; para el sistema TDT se realizarán movimientos espectrales por canal, es decir, cada 6 MHz, buscando los siguientes casos:

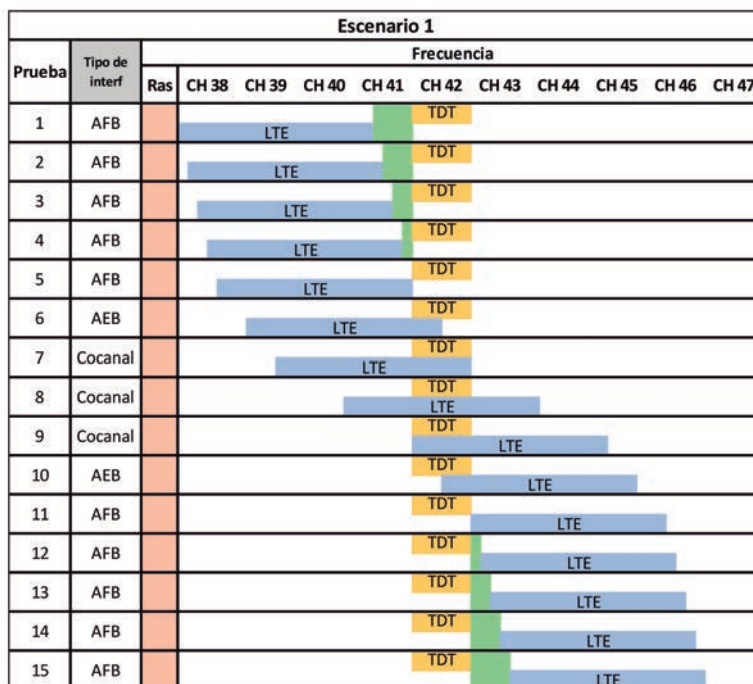
- Interferencia de canal adyacente fuera de banda (AFB).
- Interferencia de canal adyacente en banda (AEB).
- Interferencia cocanal.



Los cambios de frecuencia se realizarán de acuerdo a lo mostrado en la **Tabla 55** y en la **Figura 106**.

**Tabla 54.** Cambios de frecuencia para el caso 1.

Prueba	LTE Banda [MHz]			TDT Banda [MHz]			Banda de Guarda [MHz]	Tipo de interferencia
	F Inicial	F Central	F Final	F Inicial	F Central	F Final		
1	614	624	634	638	641	644	4	AFB
2	615	625	635	638	641	644	3	AFB
3	616	626	636	638	641	644	2	AFB
4	617	627	637	638	641	644	1	AFB
5	618	628	638	638	641	644	0	AFB
6	621	631	641	638	641	644	-	AEB (3 MHz)
7	624	634	644	638	641	644	-	Cocanal
8	631	641	651	638	641	644	-	Cocanal
9	638	648	658	638	641	644	-	Cocanal
10	641	651	661	638	641	644	-	AEB (3 MHz)
11	644	654	664	638	641	644	0	AEB
12	645	655	665	638	641	644	1	AFB
13	646	656	666	638	641	644	2	AEB
14	647	657	667	638	641	644	3	AEB
15	648	658	668	638	641	644	4	AFB



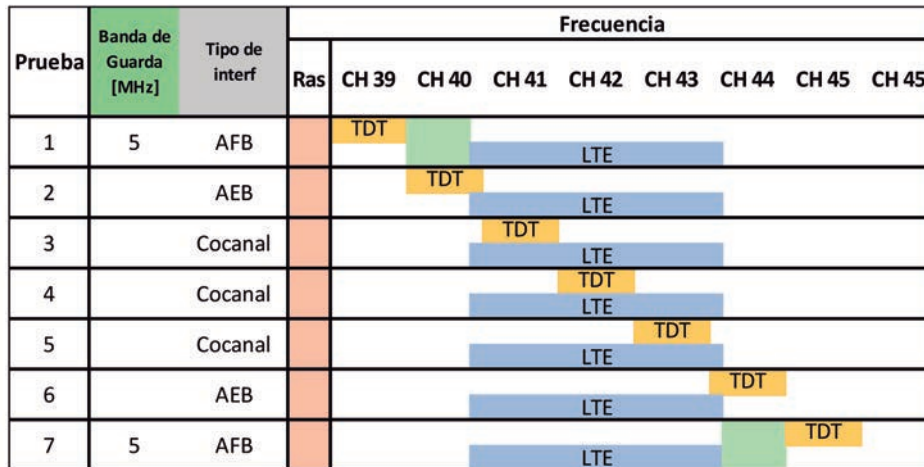
**Figura 105.** Caso 1 de interferencia.



**Tabla 55.** Cambios de frecuencia para el caso 2.

Prueba	LTE Banda [MHz]			TDT Banda [MHz]			Banda de Guarda [MHz]	Tipo de interferencia
	F Inicial	F Central	F Final	F Inicial	F Central	F Final		
1	631	641	651	620	623	626	5	AFB
2	631	641	651	626	629	632	-	AEB (1 MHz)
3	631	641	651	632	635	638	-	Cocanal
4	631	641	651	638	641	644	-	Cocanal
5	631	641	651	644	647	650	-	Cocanal
6	631	641	651	650	653	656	-	AEB (1 MHz)
7	631	641	651	656	659	662	5	AFB

Para ello se plantea el movimiento de frecuencias, como el mostrado en la **Figura 106**, con el fin de identificar los tipos de interferencia previamente mencionados.



**Figura 106.** Caso 2 de interferencia.

Es importante aclarar que se desarrollaron un total de 44 pruebas (30 del escenario 1 y 14 del escenario 2); de forma simplificada, la toma de pruebas se realizó de acuerdo a la **Tabla 56**.

**Variables de medición.** Para realizar las mediciones de LTE y su interferencia se utilizará el analizador de espectro *Tektronix3000* y el módulo *USRP-2954R* de *National Instruments*; en las mediciones de DVB-T se usará el *ETL Tv Analyzer* de *Rohde y Schwarz* y el *HD Ranger* de *Promax*.

De acuerdo a lo analizado por el equipo de investigación del proyecto, las variables que se medirán en los equipos durante las pruebas de laboratorio serán las descritas en las **Tablas 57 y 58**.



**Tabla 56.** Toma de datos para potencias determinadas en el eNB y la BS.

Prueba	Caso	Pot e NB [dBm]	Pot e NB [dBm]	Escenario	Prueba
1	1	-9.45	-39.5	E1	1
	2			E1	2
	3			E1	3
	4			E1	4
	5			E1	5
	6			E1	6
	7			E1	7
	8			E1	8
	9			E1	9
	10			E1	10
	11			E1	11
	12			E1	12
	13			E1	13
	14			E1	14
	15			E1	15
	16			E2	1
	17			E2	2
	18			E2	3
	19			E2	4
	20			E2	5
	21			E2	6
	22			E2	7
2	1	-54	-5	E1	1
	2			E1	2
	3			E1	3
	4			E1	4
	5			E1	5
	6			E1	6
	7			E1	7
	8			E1	8
	9			E1	9
	10			E1	10
	11			E1	11
	12			E1	12
	13			E1	13
	14			E1	14
	15			E1	15
	16			E2	1
	17			E2	2
	18			E2	3
	19			E2	4
	20			E2	5
	21			E2	6
	22			E2	7



Se realizaron mediciones en los equipos de recepción definidos en el protocolo de pruebas; en el caso de LTE, se usó el USRP-2954R, del cual se obtuvo información de las variables mostradas en la **Tabla 58**. Adicionalmente, con el fin de obtener información sobre el comportamiento general del sistema al estar expuesto al medio se utilizará el analizador de espectro *Tektronix3000* y se realizará una lectura de los parámetros descritos en la **Tabla 57**.

**Tabla 57.** Parámetros de medición para el analizador de espectro.

Parámetro de lectura	Unidades
Ancho de banda de la señal	Hz
Nivel de potencia del canal	dBm
Delta de potencia (se realiza con marcadores en las frecuencias centrales)	Hz

**Tabla 58.** Parámetros de medición básica y avanzada para las pruebas de laboratorio.

Medición básica		Medición avanzada	
Valores de lectura	Unidad	Valores de lectura	Unidad
Potencia de recepción de RF en el UE	dBm	Ganancia aplicada para el UE	dB
Espectro de potencia del UE RX (gráfica)	Hz / dBm	PDCCH <i>Constellation</i> (gráfica)	I/Q
Constelación PDSCH (gráfica)	I/Q	Falla del UE / Bloques de error	s/BLER
<i>Wideband SINR</i>	dB		
<i>Throughput</i>	Mbps		

En el caso de la recepción de la señal de televisión digital se usará el equipo *ETL Tv Analyzer* de Rohde y Schwarz, con el cual se realizaron mediciones de los parámetros (**Tabla 59**).

**Tabla 59.** Parámetros de medición del ETL.

Sección	Valores de lectura	Unidades
Espectro	Espectro	
	Atenuación de hombro	dB
	C/N	MHz/dB
Overview	<i>Overview</i> (MER-BER)	dB
Análisis de modulación	Constelación	I/Q
	MER	dB

**Protocolo de medición.** En la **Tabla 60** se muestra el protocolo para las mediciones de las variables objetivo en los escenarios planteados; para ello se dispone de una logística de equipos, de mediciones de variables y de la manera en la que debe almacenarse y extraerse la información.



**Tabla 60.** Protocolo de medición de las pruebas de laboratorio.

Protocolos
<p><b>Logística</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexión de alimentación y prueba de funcionamiento de los equipos.</li> <li>• Conexión de los equipos de acuerdo a los esquemas planteados en la <b>Figura 47</b>, según el caso.</li> <li>• Encender equipos.</li> <li>• Configuración de condiciones iniciales de los equipos de transmisión.</li> <li>• Configuración de condiciones iniciales de los equipos de medición.</li> <li>• Prueba de toma de datos, recalibración en caso de ser necesario.</li> <li>• Toma de datos, extracción de información.</li> <li>• Desconexión y desmontaje de equipos.</li> </ul>
Medición de variables del USRP
<p>Abrir el proyecto: <i>LTE Design USRP RIO 120 MHz BW v2.0</i> y abrir el archivo <i>LTE Host DL_2</i>.                      Activar el eNB y el UE.                      En la pestaña <i>UE RX basic</i> tomar los siguientes datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>UE RF Power</i>.</li> <li>• <i>Wideband SINR</i>.</li> <li>• <i>Throughput</i>.</li> </ul> <p><i>UE Rx Power spectrum</i>: Ancho de banda, potencia de transmisión y potencia en los hombros.  <i>PDSCH constellation</i> (imagen).                      En la pestaña <i>UE RX advanced</i> tomar los siguientes datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>UE Applied Gain</i>.</li> <li>• <i>PDCCH constellation</i> (imagen).</li> <li>• <i>UE failure/block error rate (BLER)</i>.</li> <li>• Tomar 25 muestras de cada una de las variables previamente definidas.</li> </ul>
Medición de variables con el Spectrum Analyzer 3000
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sintonizar los canales en las frecuencias adecuadas.</li> <li>• Asignar un <i>spam</i> y <i>RWB</i> adecuados para realizar la medición.</li> <li>• Medir los siguientes parámetros 25 veces por escenario.</li> <li>• Ancho de banda de la señal.</li> <li>• Nivel de potencia del canal.</li> <li>• Diferencia de potencia para señales cocanales.</li> <li>• Al inicio y al final de la toma de datos verificar la disponibilidad de memoria; en caso de estar llena, se libera con una USB.</li> <li>• Tomar 25 muestras de cada una de las variables previamente definidas.</li> </ul>
Mediciones con el ETL Tv Analyzer
<p>Seleccionar el botón modo y elegir <i>Tv Analyzer/Receiver</i>, opción <i>digital TV</i> y oprimir <i>enter</i>.                      Elegir <i>digital TV settings</i> y ajustar los siguientes parámetros: <i>channel bandwidth</i> en 6 Mhz y <i>FEC sync</i> en <i>FEC sync required</i>.                      Seleccionar el botón <i>special settings</i> y posteriormente <i>symbol loop</i> en <i>medium</i>.                      Seleccionar <i>digital TV</i>, luego "meas" y luego <i>digital TV settings</i>.</p> <p><b>Para medición de espectro:</b>                      Elegir la frecuencia central con el botón <i>freq</i> y el <i>spam</i> adecuado.                      Seleccionar <i>spectrum</i>, ubicar los marcadores necesarios de acuerdo a la forma de la señal y medir los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectro.</li> <li>• Atenuación de hombro.</li> <li>• C/N a 0 MHz.</li> </ul>

Continúa en la próxima página





**Continuación de la Tabla 60.** Protocolo de medición de las pruebas de laboratorio.

<p><b>Para medición del MER y BER:</b>                  Seleccionar <i>overview</i> y medir:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• BER <i>before Viterbi</i>.</li> <li>• BER <i>before RS</i>.</li> <li>• BER <i>after RS</i>.</li> <li>• MER (RMS).</li> <li>• MER (Peak).</li> </ul>
<p><b>Para visualización de la constelación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionar <i>modulation analysis</i> y medir:</li> <li>• Constelación (I/Q).</li> <li>• MER (f) (de esta gráfica solo se toma una imagen como referente).</li> <li>• Tomar 25 muestras de cada una de las variables previamente definidas.</li> </ul>
<p><b>Almacenamiento y extracción de la información</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Almacenar en una memoria USB.</li> <li>• Copiar información a PC.</li> <li>• Clasificar archivos de datos y archivos de imágenes.</li> <li>• Sistematizar información en Excel, observar los valores de las variables definidas en cada imagen y transcribir en archivo de Excel.</li> </ul>

**Resultados de pruebas de interferencia de laboratorio.** A continuación se presenta de forma detallada la ejecución de los escenarios de prueba. De acuerdo con los escenarios planteados en el protocolo de pruebas, se buscan tres tipos de interferencia: cocanal, adyacente en banda (AEB) y adyacente fuera de banda (AFB); para cada prueba se busca un tipo de interferencia, tal y como se muestra en la **Figura 107**. En el resto del documento se mencionarán los casos como escenarios.

Interferencia	Cocanal																						
	AEB						■										■						
	AFB	■								■								■			■		
Caso		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Escenario		E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E1	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E2
Prueba		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1	2	3	4	5	6	7

**Figura 107.** Tipos de interferencia buscados por prueba de laboratorio.

**Ejecución de escenarios**

**Caso 1.** Este escenario buscaba medir la afectación de los servicios al existir movimientos espectrales para la banda de LTE. Como fue mencionado en el protocolo de las pruebas se mantuvo fijo el canal 42 de televisión digital y se realizaron movimientos espectrales para identificar los tipos de interferencia esperados (adyacente fuera de banda, adyacente en banda y cocanal). Los movimientos espectrales se realizaron de acuerdo con lo mostrado a continuación en la **Figura 108**.



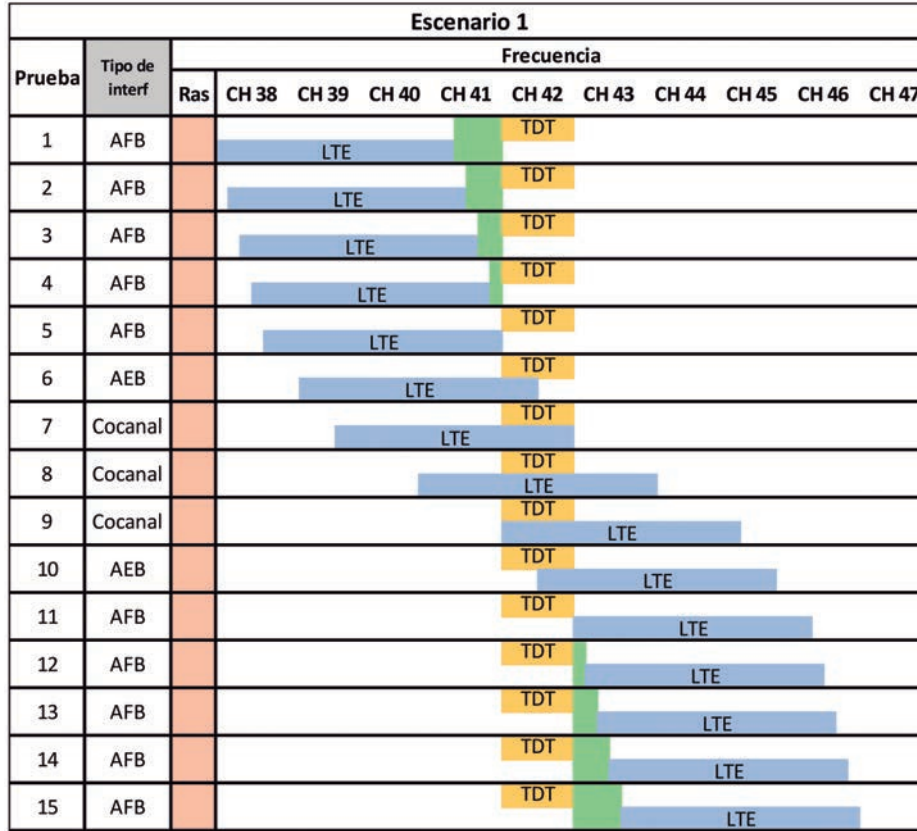


Figura 108. Caso 1 de interferencia.

**Caso 2.** Este escenario plantea encontrar la misma afectación, pero modificando espectralmente la banda de TDT por canales, es decir, cada 6 MHz, como se muestra en la Figura 109. Adicionalmente, se mantuvo fijo el bloque de *Downlink* de LTE (con frecuencia central en el canal 42) y se buscaron los mismos tipos de interferencia mostrados en el escenario 1.

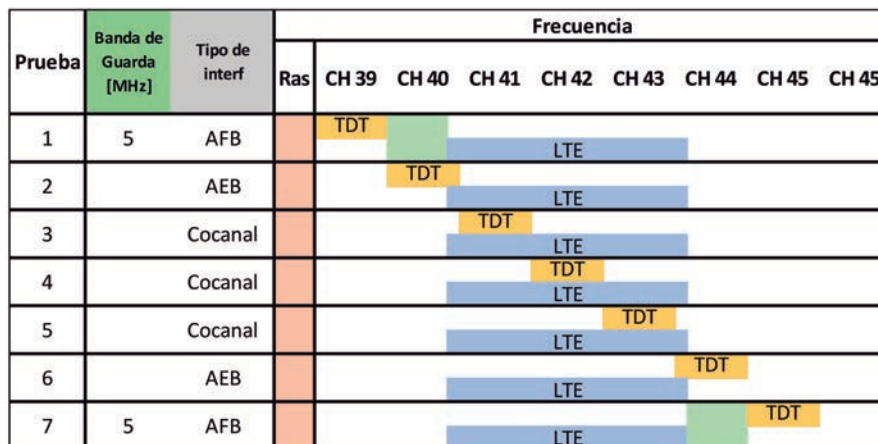
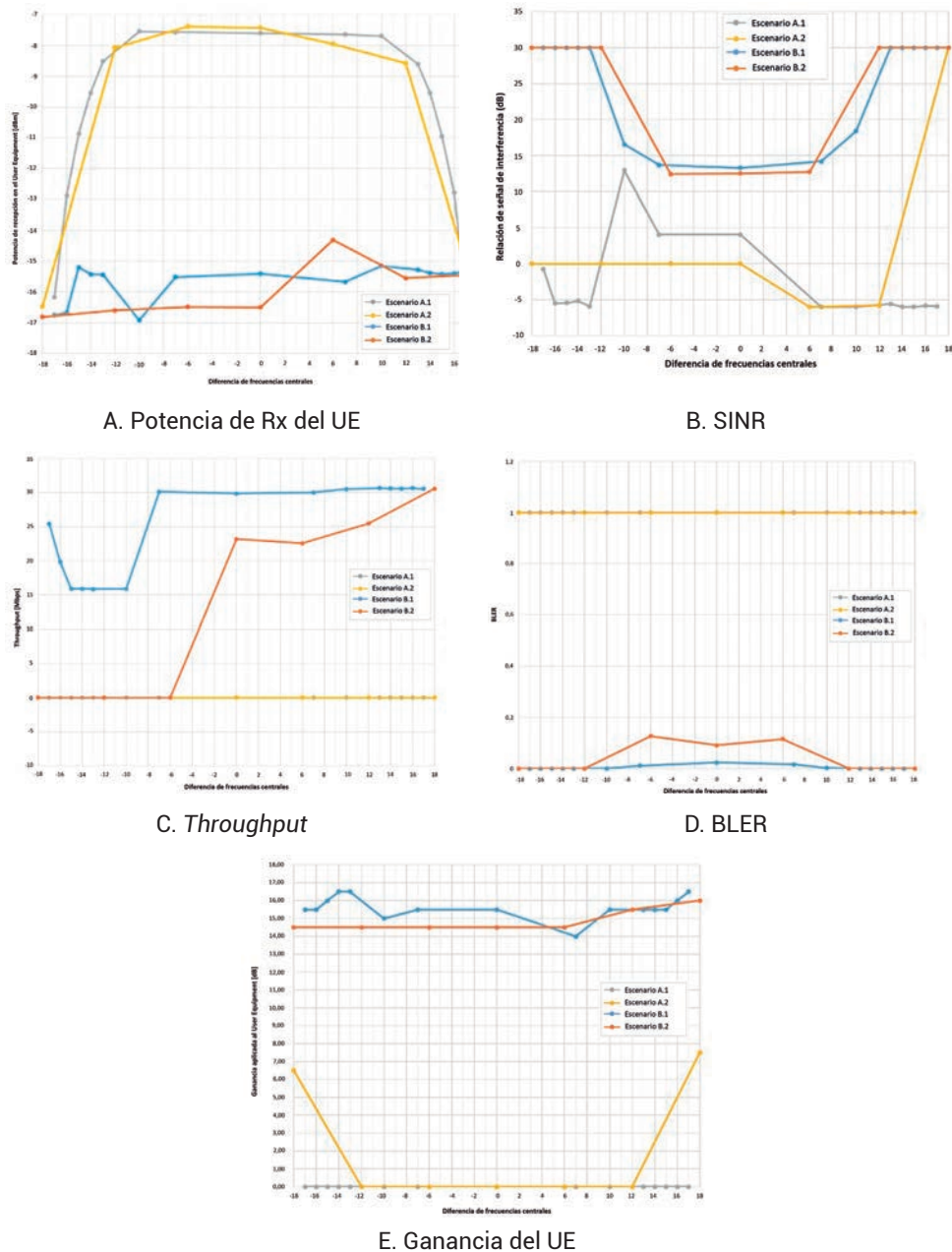


Figura 109. Caso 2 de interferencia.



Se realizaron tomas de 25 datos para cada escenario, pruebas y tipos de afectación de servicios esperados.

**Resultados obtenidos en pruebas de interferencia de laboratorio.** En la **Figura 110** se muestran de forma general los resultados obtenidos por este equipo en todos los escenarios planteados; para ello se exponen los parámetros de potencia de recepción en el UE (a), la SINR (b), *Throughput* (c), BLER (d) y la ganancia aplicada al UE (e):



**Figura 110.** Resultados generales de recepción en el User Equipment.



De acuerdo con los resultados obtenidos en la **Figura 111** se observa una clara diferencia en la afectación de LTE a TDT y viceversa; en el primer caso se ve una señal con valores picos inferiores al tener bandas de guarda significativamente mayores y valores constantes y mayores cuando las bandas de guarda son inferiores a los 6 MHz.

Asimismo, es posible observar que la SINR, cuando LTE interfiere, tiene un comportamiento analógico a un filtro rechazabandas desde una distancia aproximada de 10 MHz; esto se debe a que la potencia del interferente es mayor y al tener esa distancia en frecuencia se garantiza un tipo de interferencia adyacente fuera de banda. Sin embargo, cuando TDT es el interferente, el sistema se comporta de forma irregular.

Al ser de menor potencia percibida, el enlace de telefonía en el escenario de TDT sobre LTE, el *throughput* y el BLER tienen valores constantes en 0 y 1, respectivamente; sin embargo, al analizar el enlace TDT como víctima se puede observar que el *throughput* aumenta significativamente (más de 10 dBm) desde los -10 MHz de distancia espectral; es posible que a pesar de que el tráfico sea mayor, la calidad de la información percibida por el UE sea menor que en condiciones libres de interferencia. El BLER tiene un comportamiento similar, pero varía desde los -12 MHz de distancia con un cambio de menos de 0.5.

A continuación, la **Figura 111** muestra los cambios obtenidos en las constelaciones PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) y PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) durante la variación de frecuencias en las pruebas para el caso de LTE que afecta al enlace de TDT; con esto se logró diferenciar claramente los canales cuando se realizan cambios de frecuencia; dichas mediciones son obtenidas por el *User Equipment*.

En la **Figura 112** se observa una diferencia significativa entre la interferencia de LTE a TDT (**Figura 112C**) y TDT a LTE (**Figura 112D**). Además, se evidencia que el sistema LTE, a pesar de ser interferente en el primer caso, también tiene afectación en su funcionamiento normal. En el segundo caso se ve claramente que la constelación de LTE no tiene la potencia suficiente para que el UE reciba una señal clara y se evidencia en ella una mayor cantidad de desviaciones de potencia que pueden ser interpretadas como ruido.

En cuanto al espectro, es posible visualizar la afectación de los anchos de banda de las señales de televisión y telefonía, además de las potencias de canal en los servicios. Dicha comparación se muestra en la **Figura 112**.



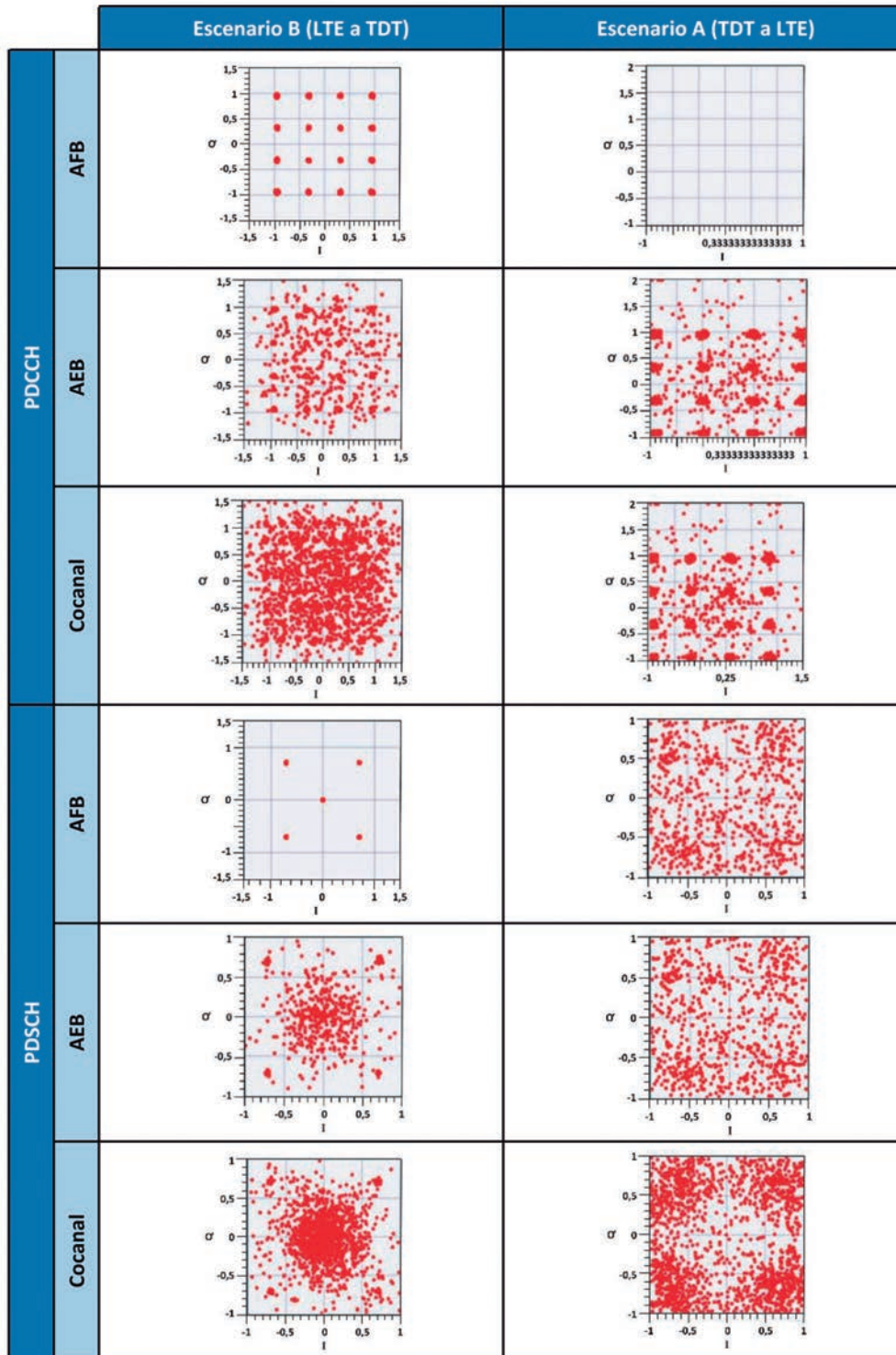


Figura 111. Variaciones del espectro en los canales PDCCH y PDSCH.





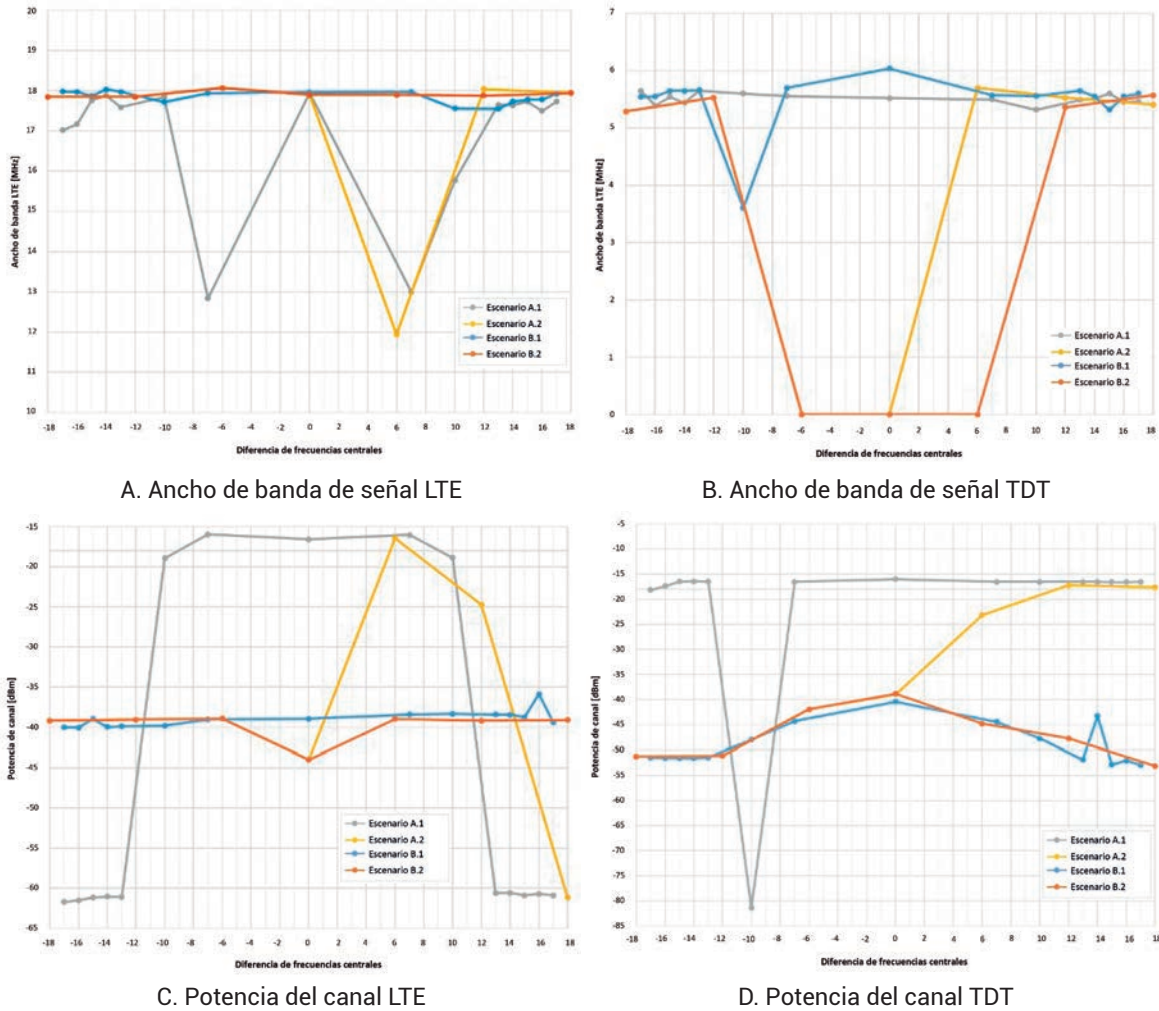


Figura 112. Potencias de canal y anchos de banda de las señales de LTE y TDT.

En este caso es posible identificar en la sección de los anchos de banda (Figuras 113A y 113B) que en el caso de LTE estos no son afectados significativamente (menos de 1 dBm); por el contrario, el sistema de TDT tiene una potencia lo suficientemente baja para que su ancho de banda sea susceptible de cambios, especialmente cuando se observan los escenarios en banda adyacente y cocanal; caso contrario a lo que se observa en la interferencia de TDT a LTE, donde los anchos de banda y las potencias de canal tienen un comportamiento más cambiante, especialmente cuando existen interferencias adyacentes en banda y cocanales.

Las formas de las señales en el espectro para cada uno de los casos de interferencia se evidencian en la Figura 113, donde podemos observar que no es posible identificar una diferencia de potencia que permita definir claramente el ancho de banda de la señal de TDT contenida en la de LTE.





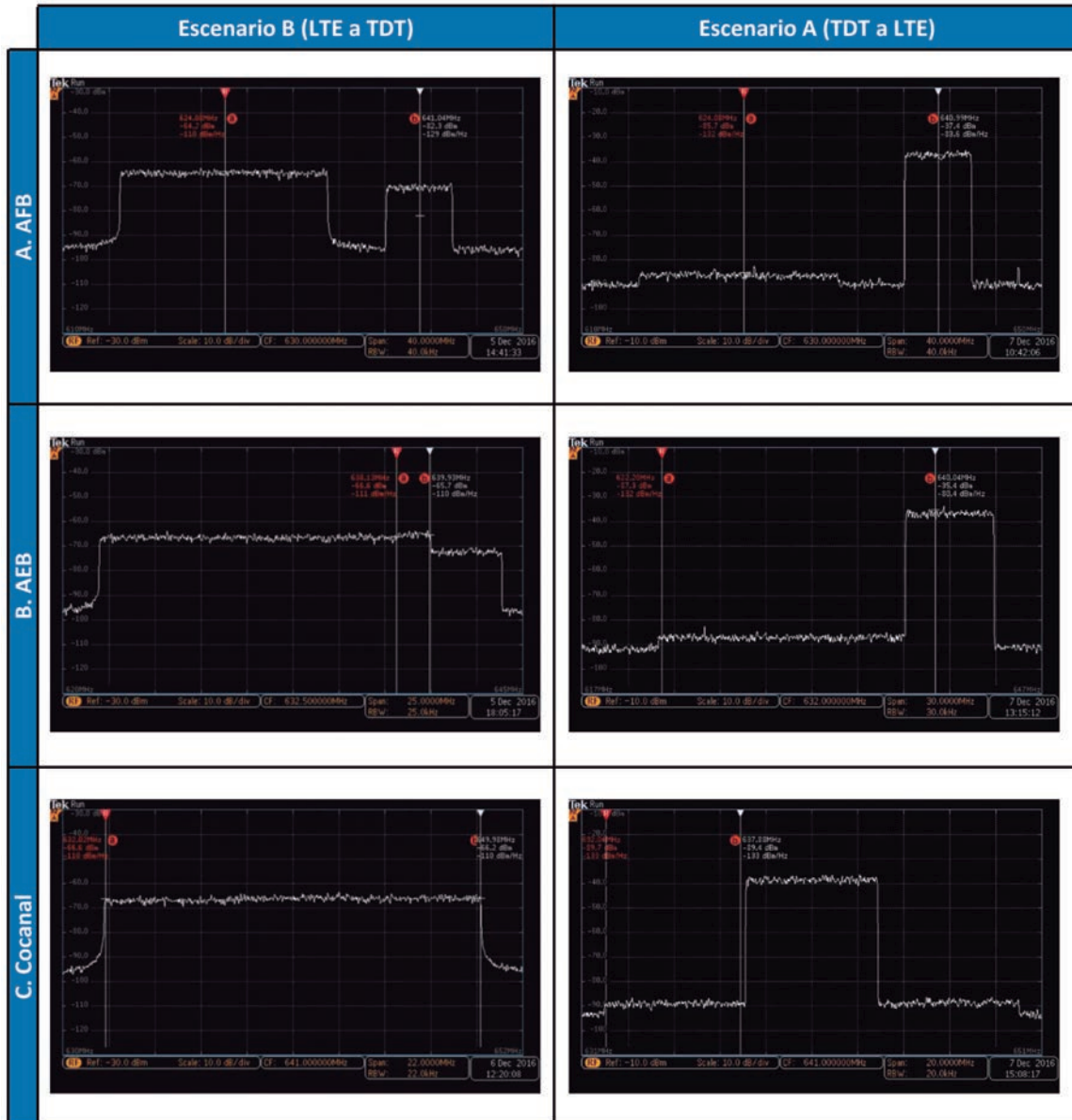
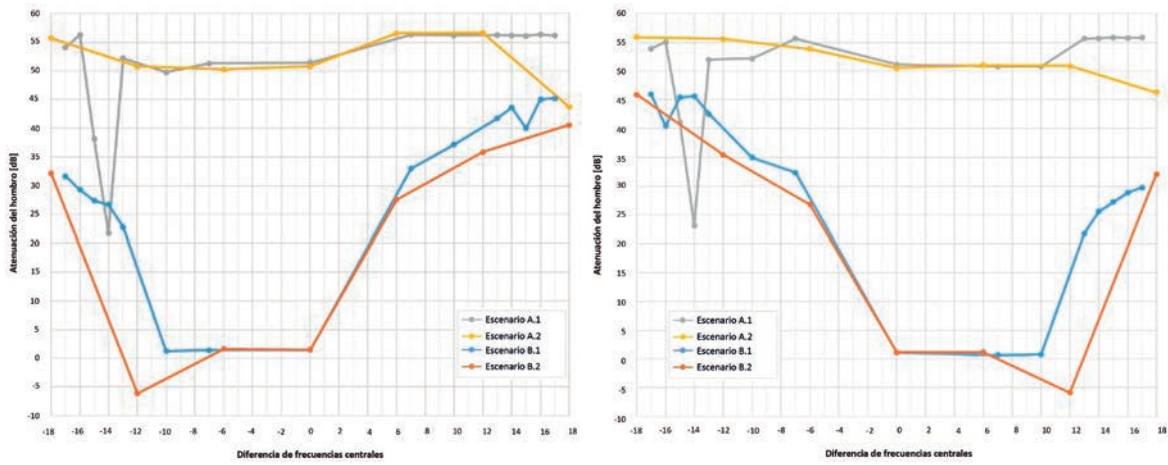


Figura 113. Espectro en cada tipo de interferencia

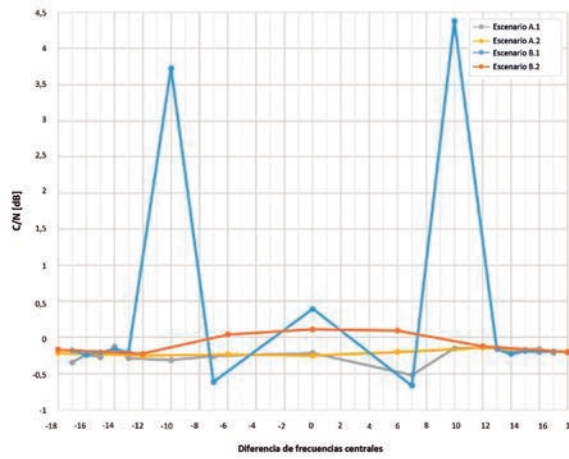
Posteriormente se observó el comportamiento en el receptor víctima por medio del equipo ETL Tv Analyzer. Dentro de los aspectos generales se identificaron los parámetros de atenuación de los hombros; asimismo, aparece la relación *Carrier to Noise* (C/N), tomada justo en el centro de la banda. Luego se analizó la relación del MER y el BER de acuerdo con los cambios de frecuencia realizados durante las pruebas; estas características son mostradas en las Figuras 114 y 115. Es clave aclarar que todas las mediciones de este equipo fueron tomadas únicamente en la señal de TDT.





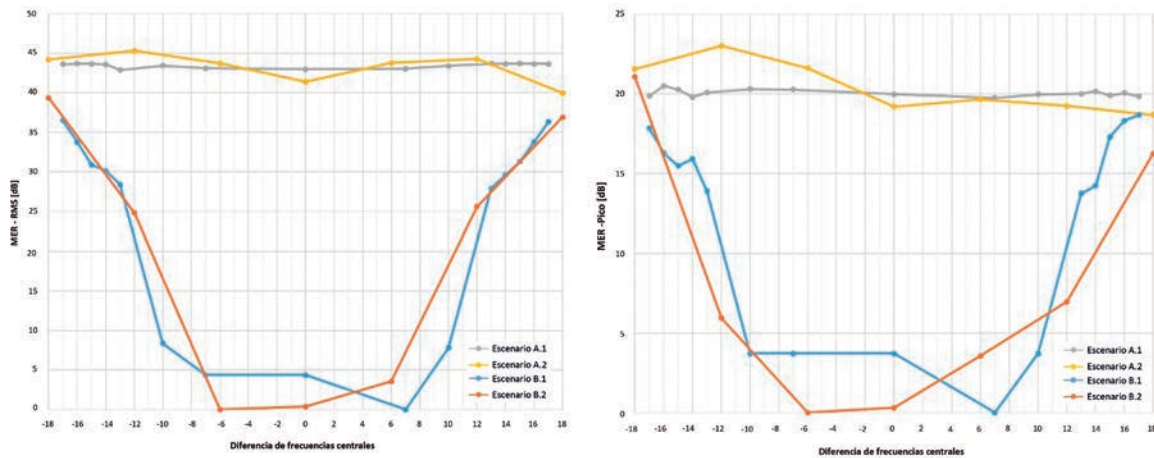
A. Atenuación hombro inferior

B. Atenuación hombro superior



C. Relación C/N

Figura 114. Atenuación de hombros y C/N en la señal de TDT.



A. RMS

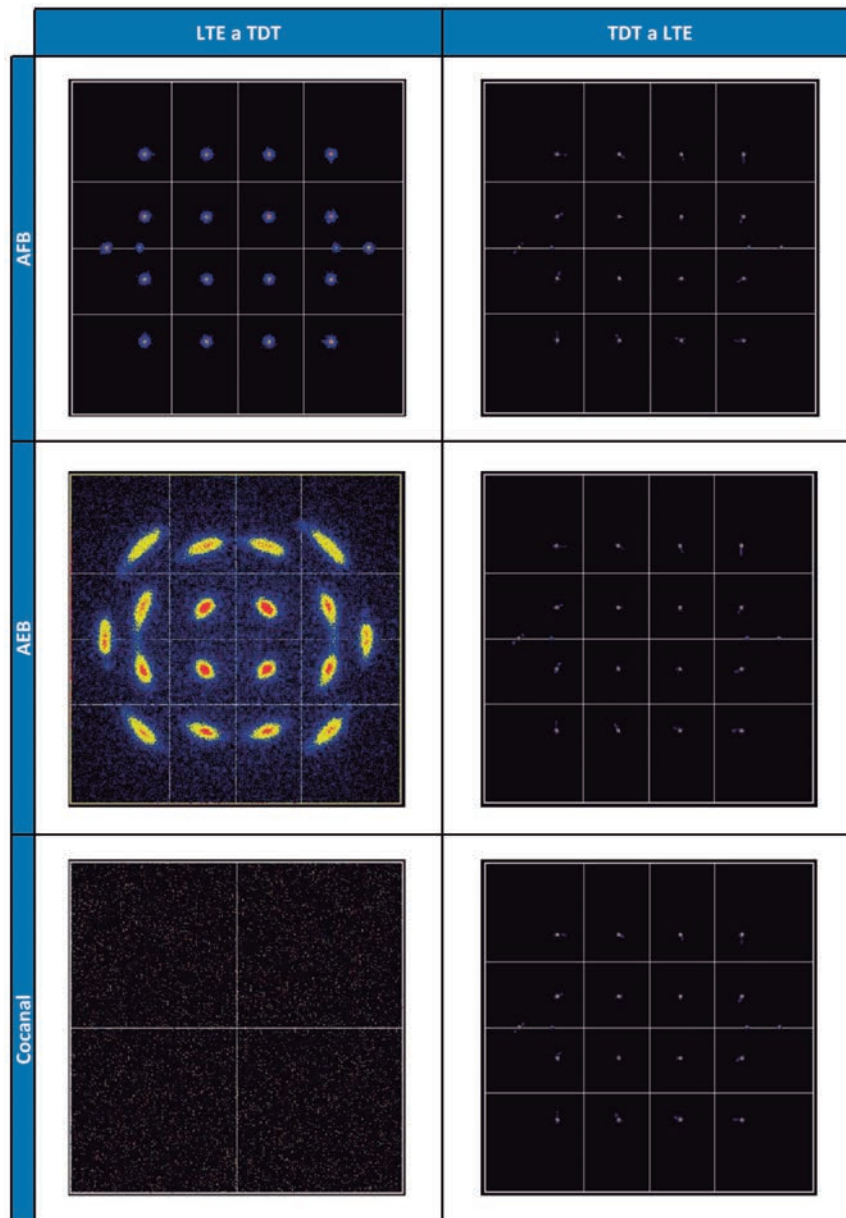
B. Pico

Figura 115. MER pico y RMS para los escenarios de prueba.



Es importante destacar que las mediciones del BER antes de Viterbi, y antes y después del *Resource Block* tienen valores aproximados de  $0 \times 10^{-9}$ ,  $0 \times 10^{-8}$ ,  $0 \times 10^{-7}$ , respectivamente.

Respecto a la constelación de la TDT, en la **Figura 116** se observa la afectación por interferencia en la señal debido al sistema de LTE. En el caso de la interferencia de tipo cocanal, se evidencia una mayor dispersión de la señal, lo cual puede ser consecuencia de que los dos sistemas, para este caso, tienen la modulación 16 QAM a  $\frac{1}{2}$  y la potencia de LTE es significativamente alta para afectar la recepción del televisor.



**Figura 116.** Constelaciones de la señal de televisión.



## Anexo 2. Análisis de propagación primera comisión



En el presente anexo se describen las características técnicas y resultados relacionados con el estudio de modelos de propagación específicos para la selva Colombo brasilera.

### Protocolo de simulaciones de propagación

A continuación se muestran las características tenidas en cuenta para realizar las simulaciones de propagación.

**Área de cobertura.** El área que se seleccionó para definir el escenario de las simulaciones corresponde a la ciudad de Leticia y al municipio de Tabatinga.

Leticia es la capital del departamento del Amazonas y está ubicada en el extremo sur del país, donde marca límite fronterizo con Brasil y Perú. Se encuentra a una altitud de 96 m.s.n.m. y tiene una población de 41326 habitantes, de los cuales, 26726 residen en el casco urbano. Abarca un área de 5968 km<sup>2</sup>, equivalentes al 5.44 % de la extensión total del departamento. La mayor parte de su territorio presenta una topografía plana y selvática, con un clima húmedo tropical. La temperatura promedio está en 25 °C, con una humedad relativa del 85 %.

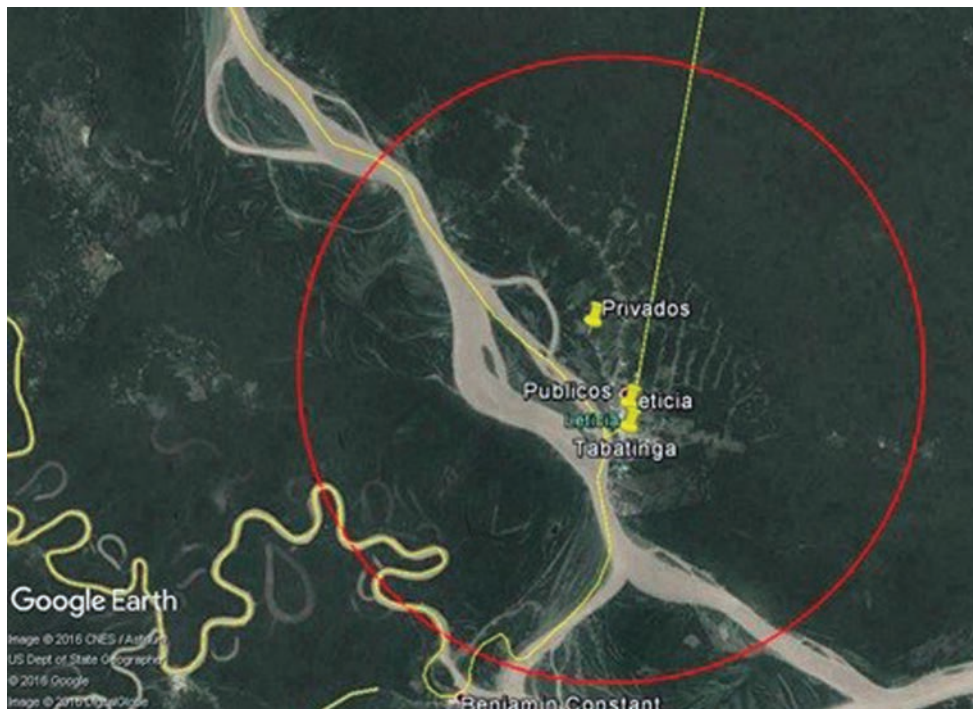


Figura 117. Área de cobertura de simulación en el software ICS Telecom.





Por otro lado, Tabatinga es un municipio perteneciente al estado del Amazonas en Brasil; está ubicado junto a Leticia a una altitud de 85 m.s.n.m. y un área de 3266 km<sup>2</sup>. Cuenta con una población de 61028 habitantes, de los cuales 36371 residen en la zona urbana. Las condiciones climáticas y topográficas son las mismas que las de Leticia.

Para el estudio se determinó un radio de 30 km con el fin de cubrir la totalidad del casco urbano y parte de la zona rural, como se observa en la **Figura 117**.

**Escenarios de simulación y canales simulados.** Para la emisión del servicio de televisión análoga, Leticia cuenta con dos antenas para la transmisión de los canales privados CCNP y públicos RTVC. La primera antena se encuentra ubicada hacia el norte, a las afueras de Leticia, aproximadamente a 5 km del centro de la ciudad. Y la segunda está dentro del casco urbano, a menos de 100 metros de la frontera. De la misma manera, Tabatinga cuenta con una antena transmisora para los canales regionales como O Globo y Canal Educativo; esta se encuentra ubicada en el centro del municipio. En la **Figura 118** se puede observar la localización de dichas antenas y la **Tabla 61** contiene la información de localización.



**Figura 118.** Ubicación de las antenas transmisoras.



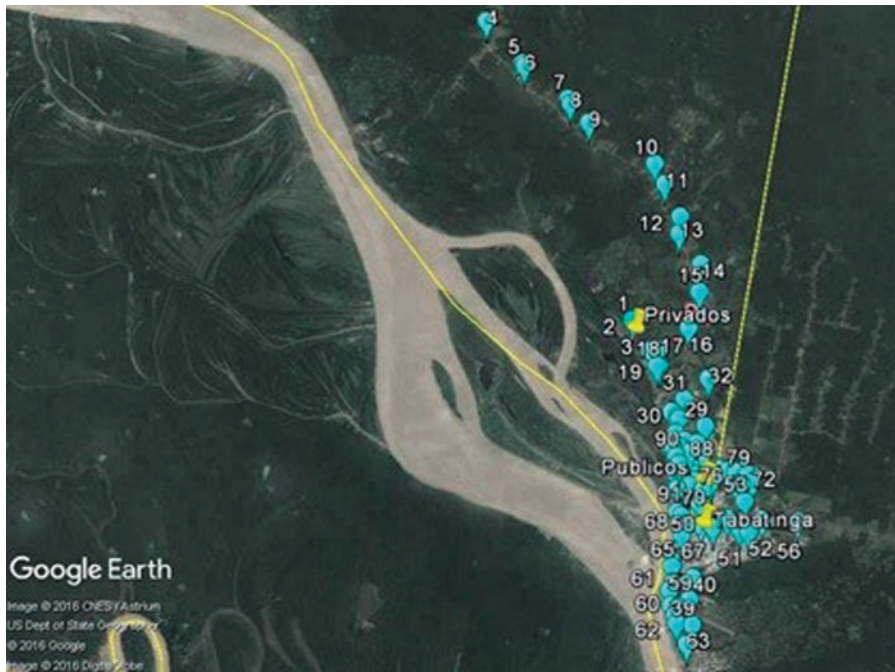
**Tabla 61.** Ubicación de las antenas transmisoras.

Antena	País	Ubicación		Altura (m)	Potencia de Tx (W)
		Latitud	Longitud		
Privados	Colombia	04° 10' 08.60" S	69° 57' 27.00" W	39	500
RTVC	Colombia	04° 12' 59.34" S	69° 56' 11.60" W	100	2000
Brasil	Brasil	04° 13' 47.00" S	69° 56' 12.00" W	50	1000

Para simular la cobertura de las señales de televisión análoga en esta zona se determinaron 90 puntos de recepción distribuidos como se muestra en la **Figura 119**, los cuales están directamente relacionados con los puntos de medición en la primera comisión de pruebas de campo. La antena receptora se definió como omnidireccional con ganancia de 11.35 dBi y altura de 3 metros. La atenuación, según el tipo de zona dentro del mapa, se seleccionó con el código de ocupación del suelo con un valor de ocho correspondiente a zona rural boscosa, considerando las condiciones geográficas de Leticia y Tabatinga.

Según el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias de Colombia, para el servicio de televisión análoga en Leticia se tiene que la antena de canales privados presta los servicios de emisión para RCN y Caracol, mientras que la antena de RTVC presta los servicios para Canal UNO, Señal Colombia, Canal Institucional y Canal 13. Para el caso de la antena brasilera se identificaron dos canales asociados: O Globo y Canal Educativo, según ANATEL.

Teniendo en cuenta lo anterior se simularon ocho canales, seis colombianos y dos brasileros. Los parámetros técnicos para cada transmisor se definieron según lo establecido por la ANE y ANATEL (en el caso de Brasil).



**Figura 119.** Ubicación de los receptores.





**Metodología de las simulaciones.** Para el desarrollo de las simulaciones, en primer lugar, se cargó el modelo DEM con la cartografía de Colombia entregada por la ANE, y se definió la ocupación del suelo como zona rural boscosa. Además, se determinó la paleta de convención de niveles de potencia recibida, tal como se especifica en la **Tabla 62**. Asimismo, se seleccionaron tres modelos de propagación: UIT 525, Okumura-Hata Rural y COST 231.

**Tabla 62.** Relación de colores para niveles de potencia recibidos.

Color	Valores (dBm)
Azul rey	$-\infty$ a -80
Azul	-80 a -75
Azul aguamarina	-75 a -70
Verde aguamarina	-70 a -65
Verde	-65 a -60
Verde oliva	-60 a -55
Amarillo	-55 a -50
Amarillo quemado	-45 a -40
Rojo	-35 a -30
Café	-30 a -25
Café claro	-25 a $\infty$

Para cada una de las antenas se agregó un elemento Tx/Rx que cumple la función tanto de transmisor como de receptor y se le configuraron los parámetros técnicos descritos en la **Tabla 61**. Teniendo en cuenta el arreglo real de antenas de cada estación, se utilizó un patrón de radiación diferente para cada una (**Tabla 63**); y observamos que en la **Figura 120A** corresponde a la antena de canales públicos, la **Figura 120B** a la de canales privados y la **Figura 120C** a la de canales brasileiros.

A pesar de que Leticia es una ciudad capital, se determinó utilizar el modelo Okumura-Hata Rural y no el suburbano, debido a que no hay edificios con alturas superiores a 15 metros. En cada uno de estos modelos se incluyó la opción de clima húmedo tropical.

Para la configuración de los receptores se utilizó un elemento DF o *Direct Finder*, el cual funciona como receptor en un rango de frecuencias determinado. En la **Tabla 64** se muestran los parámetros técnicos definidos.



Tabla 63. Parámetros

Parámetros		Parámetros técnicos de las antenas.									
		Canales públicos					Canales privados				
		CH 8	CH 9	CH 11	CH 13	CH 25	CH 27	CH 4	CH 19		
Tipo de señal <sup>1</sup>		TV M	TV M	TV M	TV M	TV M	TV M	TV M	TV M	TV M	TV M
Frecuencia portadora video (MHz)		181.25	187.25	199.25	211.25	537.25	549.25	67.25	501.25		
Potencia Tx de la antena (W)		2000	2000	2000	2000	500	500	1000	1000		
Altura de la antena Tx (m)		100	100	100	100	39	39	50	50		
Ancho de banda (MHz)		6	6	6	6	6	6	6	6		
Ganancia (dBd)		10.17	6	10.4	10.54	10.97	10.97	10.54	10.54		
Polarización		Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal		
Coordenadas Tx		4° 12' 59.34"S	4° 12' 59.34"S	4° 12' 59.34"S	4° 12' 59.34"S	4° 10' 08.60"S	4° 10' 08.60"S	4° 13' 47"S	4° 13' 47"S		
Longitud		69° 56'11.60"W	69° 56'11.60"W	69° 56'11.60"W	69° 56'11.60"W	69° 57' 27"W	69° 57'27"W	69° 56'12"W	69° 56'12"W		

1 El tipo de señal TV M hace referencia a las señales de televisión analógica.



**Figura 120.** Patrón de radiación de la antena de transmisoras con azimut 0°.

**Tabla 64.** Parámetros técnicos de los receptores.

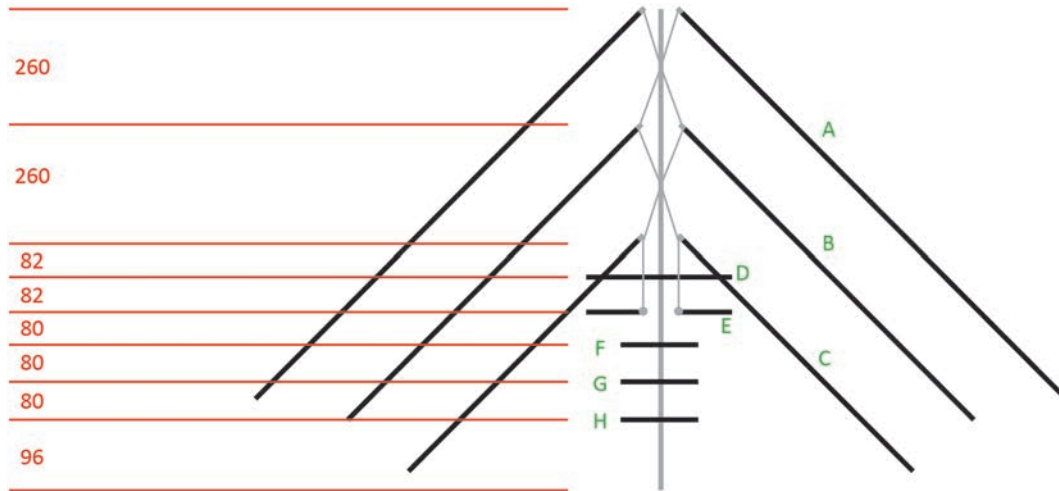
Parámetros	Valor	
Frecuencia mínima (MHz)	50	
Frecuencia máxima (MHz)	700	
Altura de la antena Rx (m)	3	
Sistema Radiante Omnidireccional	Ganancia (dBd)	11.35
	Polarización	Horizontal

Una vez establecidos todos los parámetros tanto para los transmisores como para los receptores, se realizó el cálculo de la cobertura para cada canal.

**Caracterización de antena receptora (primera comisión).** Las antenas periódicas o logarítmicas periódicas se caracterizan por su independencia de la frecuencia de transmisión y de la impedancia de radiación del sistema. Estas pueden tener relaciones de ancho de banda 10:1, es decir, pueden variar entre 60-600 MHz, y las ganancias dependen del tipo de elementos que se le incluyan al arreglo. Una de las características principales es que los elementos consisten en un patrón geométrico básico repetido que modifica su tamaño; estas características se conectan a través de una línea de transmisión que se cruza entre los elementos dipolares del arreglo. La relación entre un elemento y el elemento siguiente está dada por  $1/R$ , donde R es la relación de diseño logarítmico, el cual debe ser un valor inferior a 1 (Tomasi, 1996).

En la **Figura 121** y en la **Tabla 65** se presentan las características de la antena que se utilizó para las mediciones de campo en Leticia y Tabatinga. Esta es una antena Yagi-Uda espina de pescado mixta. Está definida con un parámetro R de 0.76, de acuerdo a la relación de distancias de su arreglo de reflectores. Dicha antena tiene una sección logarítmica de espina de pescado con relación de 0.76, que cubre frecuencias desde 120 MHz hasta 400 MHz y las frecuencias de VHF, y la sección de refractario extremo (elementos D, F, G y H), como un arreglo de dipolo de media onda para una frecuencia entre 400 y 850 MHz que cubre las frecuencias de UHF.





**Figura 121.** Arreglo de antena Yagi-Uda usado en mediciones de campo.

**Tabla 65.** Dimensiones de los elementos del arreglo de la antena Yagi-Uda.

Elemento	Tamaño (mm)
A	1250 *2
B	950*2
C	725*2
D	300
E	120*2
F, G, H	170 (cada una)

La caracterización de esta antena fue realizada mediante el kit de antenas ED3200, que tiene un sistema de radio a 500 MHz para UHF. El montaje y los componentes que se usaron para realizar la medición se muestran en la **Figura 122**, a saber: una antena transmisora dipolo de media onda a 500 MHz, la antena Yagi-Uda a 2 metros de distancia, el sistema ED3200 con un motor a paso para el giro de la antena, el transmisor de 500 MHz, el controlador y medidor de intensidad, y un computador para la recolección de datos.

Se realizaron 10 mediciones circulares de 360° y se compensó mediante un promedio con una ventana deslizante de 5° (cinco muestras), con el fin de disminuir las variaciones presentadas por el movimiento no continuo y las oscilaciones (resonancias mecánicas) del movimiento de la antena en su giro. Los resultados de la ventana deslizante mostraron una desviación estándar de aproximadamente 1.1 dB, lo cual concuerda con su propósito de suavizar los datos. Adicionalmente, se realizó el mismo procedimiento para una antena omnidireccional polarizada de forma vertical con el fin de hallar la ganancia de la antena. En la **Figura 123** se presenta el patrón de ganancia de la antena obtenida como resultado de las mediciones. Este patrón es muy similar al simulado para una antena Yagi-Uda espina de pescado con características similares; dicho patrón es presentado en la **Figura 124**.

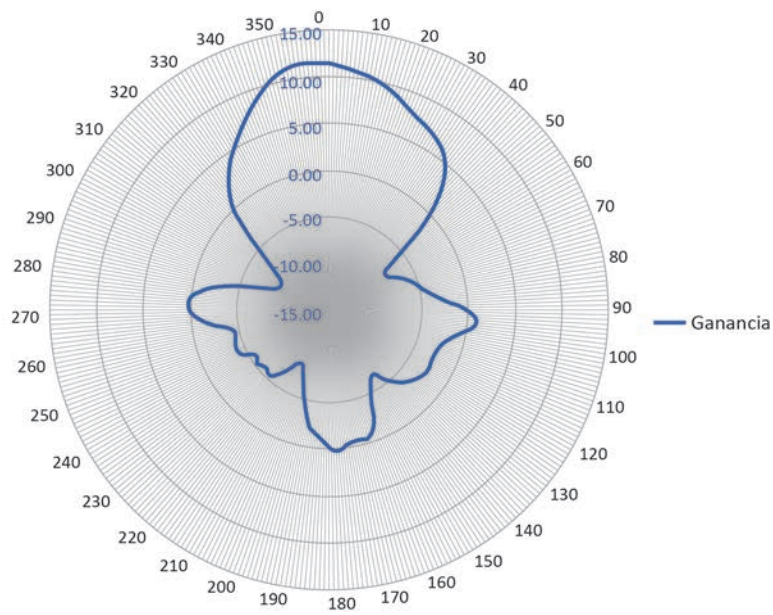




**Figura 122.** Sistema de mediciones del patrón de radiación y ganancia de antena.



**Figura 123.** Patrón simulado de antena Yagi-Uda.



**Figura 124.** Ganancia horizontal de antena Yagi-Uda.



**Protocolo de mediciones de campo (primera comisión).** Durante la etapa de planeación, tomando como base el análisis de los modelos y recomendaciones realizado en el “entregable 1: estudios teóricos”, se elaboraron tres versiones del protocolo, las cuales fueron revisadas y aprobadas por el investigador principal. La **Tabla 66** resume los parámetros para las mediciones de anchos de banda de la señal de televisión, la cobertura para dichas señales y las mediciones fuera de banda para la televisión digital. Cabe anotar que algunos de estos parámetros no fueron tenidos en cuenta a la hora de las mediciones debido a que en la zona de estudio todavía no existe cobertura de canales digitales.

**Tabla 66.** Normatividad asociada al protocolo de medición.

Norma	Descripción
UIT-R SM. 1792 de 2007	Medición de emisiones en banda lateral de los transmisores T-DAB y DVB-T a efectos de comprobación técnica.
UIT-R SM. 1875-2 de 2014	Mediciones de cobertura de la DVB-T.
UIT-R SM. 443-4 del 2007	Medición de ancho de banda en las estaciones.

Los protocolos diseñados estuvieron encaminados a identificar tres aspectos del servicio de televisión, a saber: i) canalización de las señales de TV análoga en Leticia, Tabatinga y sus alrededores; ii) propagación de las señales de TV análoga; iii) extracción de la información.

Previo a la realización de la comisión de trabajo a Leticia se estableció el protocolo para realizar las mediciones de campo electromagnético en la zona fronteriza de Leticia y Tabatinga. Dicho protocolo se elabora tomando como referencias las normas de la UIT-R 1792, 1875 y 443. En la **Tabla 67** se describen estas normas.

**Tabla 67.** Descripción de las normas relacionadas para el protocolo de medición.

Norma: UIT-R SM. 1792 de 2007 Medición de emisiones en banda lateral de los transmisores T-DAB y DVB-T a efectos de comprobación técnica
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los puntos de medición deben ubicarse de tal manera que haya visibilidad directa con la antena transmisora y, en lo posible, sin interferencia de obstáculos considerables.</li> <li>• Para medir la señal se debe utilizar un analizador de espectros o, en su defecto, un receptor portátil que permita hacer un barrido manual. Se debe asegurar que no haya reflexiones en la recepción de la señal. Esto se verifica observando que la señal principal no tenga una variación mayor que <math>\pm 2</math> dB.</li> <li>• Las mediciones que se deben hacer son las siguientes: frecuencia de operación; máximo nivel de la señal; ancho de banda, ruido del receptor y sensibilidad del sistema.</li> <li>• Para medir el máximo nivel de la señal debe sintonizarse el receptor a una frecuencia de <math>\pm 100</math> KHz. Así mismo, se debe tener en cuenta el desplazamiento de la frecuencia con respecto a la central, que para el caso de un sistema con ancho de banda de 6 MHz es de aproximadamente <math>\pm 2.8</math> MHz.</li> <li>• Para obtener resultados razonablemente fiables, el nivel espectral de las emisiones del transmisor tiene que estar como mínimo 3 dB por encima del ruido del receptor.</li> <li>• Para medir el nivel de ruido se debe ajustar el receptor a la misma anchura de banda de resolución. La atenuación en RF se pone a 0 dB. Se desconecta la señal y en la entrada del receptor se termina con 50 <math>\Omega</math>. El nivel recibido indicado se considerará el nivel de ruido del receptor.</li> <li>• Se debe medir la frecuencia en la que se produce un margen de 3dB entre el nivel de la señal medido y el valor de la sensibilidad del sistema.</li> <li>• Se hace énfasis en que los lugares de recepción óptima son pocos. Así mismo, se recomienda utilizar una antena directiva de gran ganancia, como las Yagi.</li> </ul>

Continúa en la próxima página





**Continuación de la Tabla 67.** Descripción de las normas relacionadas para el protocolo de medición.

UIT- R SM. 1875-2 de 2014 Mediciones de cobertura de la DVB-T
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La cobertura de una señal está determinada por el valor mediano de la intensidad de campo para la situación de recepción, en particular en una determinada altura sobre el nivel del suelo (entre 3 y 10 m).</li> <li>• Deben incluirse parámetros de la antena Rx como altura, ganancia y directividad.</li> <li>• El mínimo factor de ruido del receptor debe ser de 7 dB.</li> <li>• La intensidad de campo en recepción está constituida por la suma vectorial de la componente de señal recibida directamente y las reflexiones debidas a obstáculos en el terreno. Varía según el emplazamiento del receptor y como los obstáculos donde se produce la reflexión pueden ser estacionarios, también varía con el tiempo. Por tanto, la intensidad de campo de recepción real dentro de una cierta zona puede describirse únicamente de manera estadística mediante un valor mediano y una desviación típica.</li> <li>• Canal de recepción: Según el artículo 2.23, el canal de recepción correspondiente a este caso de estudio es Rayleigh. Este tipo de canal tiene desviaciones típicas de las alturas espectrales mayores que 3 dB.</li> <li>• La antena para un receptor móvil externo debe situarse mínimo a 1.5 m sobre el nivel del suelo.</li> <li>• A veces, el punto de medición ideal no será accesible debido a los edificios, a carreteras inexistentes y a otros problemas. En este caso debe elegirse el punto de medición accesible más cercano, preferiblemente situado a una distancia inferior a 50 m del punto de medición ideal.</li> </ul>
UIT-R SM.443-4 del 2007 Medición de ancho de banda en las estaciones de TV
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe asegurarse la línea de visibilidad (LoS) con la curva de Fresnel entre la antena transmisora y receptora a fin de garantizar un alto grado de discriminación de la fuente de emisión.</li> <li>• Debe utilizarse una antena directiva con una fuerte directividad y un elevado valor de la relación lóbulo-frontal-lóbulo posterior, con objeto de minimizar la influencia de los efectos de desvanecimiento por multitrayecto.</li> <li>• Puede utilizarse cualquier analizador de espectro o receptor digital de comprobación técnica adecuado.</li> <li>• No deben aparecer interferencias impulsivas (por ejemplo, interferencias procedentes de una fuente de encendido).</li> </ul>

En la **Tabla 68** se describe el protocolo de medición aplicado en campo para determinar la cobertura y la propagación de las señales de televisión analógica en Leticia, Tabatinga y sus alrededores.

**Tabla 68.** Protocolo de medición aplicado.

Protocolos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contratar un vehículo de uso público para transportar los equipos de medición y los investigadores del proyecto.</li> <li>• Ubicar el trayecto en el que se realizarán las medidas.</li> <li>• Parquear el vehículo en zonas seguras para garantizar la seguridad de las personas y los equipos (poner señalización).</li> <li>• Conectar el inversor a la batería del vehículo y conexión de los equipos de medición al mismo para garantizar su alimentación.</li> <li>• Conectar y probar el correcto funcionamiento de los equipos.</li> <li>• Ubicar la trayectoria en el GPS, tomar medidas cada 500 m según el terreno lo permita.</li> <li>• Determinar las coordenadas reales del sitio con el GPS (guardar datos).</li> <li>• Instalar la antena receptora. Esto se hará con ayuda de un mástil para lograr una altura de 3 m.</li> <li>• Conectar la antena al puerto RF del analizador utilizando un cable tipo RG 58 con conectores BNC y un adaptador minicoaxial.</li> <li>• Ubicar la antena intentando mantener la línea de vista con la antena transmisora.</li> </ul>

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 68.** Protocolo de medición aplicado.

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encender el analizador con un inversor de 12 V a 120 V.</li> <li>• Realizar las mediciones determinadas con anticipación (grabar datos).</li> <li>• Desconectar y desmontar los equipos y elementos utilizados.</li> <li>• Verificar (conteo) de elementos.</li> <li>• Trasladarse al siguiente punto.</li> </ul> <p><b>Nota:</b> Todos los participantes del trabajo deberán portar cédula, carnet de la Escuela y carta de la ANE informando los permisos para toma de las medidas de campo.</p>
<b>Canalización</b>
<p><b>Coordenadas de cada punto</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicarse en el punto geográficamente seleccionado.</li> <li>• Con ayuda de un GPS, tomar las coordenadas del punto.</li> <li>• Documentar esta información en la ficha técnica.</li> </ul>
<p><b>Canales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sintonizamos los distintos canales utilizando el HD <i>Ranger 2</i>.</li> <li>• Sintonizar los canales con un <i>spam</i> total de 20 MHz para lograr una buena visualización de la señal con el módulo de RF del analizador.</li> <li>• Tomar valores de potencia y C/I con el HD <i>Ranger</i>.</li> <li>• Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos).</li> </ul>
<p><b>Canalización para telefonía móvil</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar los diferentes servicios entre 600 MHz y 800 MHz utilizando el HD <i>Ranger 2</i>.</li> <li>• Identificar los diferentes servicios entre 600 MHz y 800 MHz utilizando el módulo de RF del analizador.</li> <li>• Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos).</li> </ul>
<b>Propagación</b>
<p><b>Sensibilidad</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Repetir los pasos de logística.</li> <li>• Sintonizar las frecuencias de los canales privados en estudio en el analizador de espectros.</li> <li>• Desconectar la antena.</li> <li>• Adecuar el analizador para observar la frecuencia en la cual la señal está a 3 dB por encima del nivel de ruido.</li> <li>• Documentar los datos en la tabla de Excel.</li> <li>• Grabar el archivo correspondiente.</li> </ul>
<p><b>Potencia dentro de la banda</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguir los procedimientos de logística mencionados anteriormente.</li> <li>• Utilizando el módulo de RF del analizador sintonizamos los canales privados en 539.25 MHz para RCN y 551.25 MHz para Caracol, con un <i>spam</i> total de 20 MHz para lograr una buena visualización de la señal</li> <li>• Utilizando el <i>Ranger</i> sintonizamos los canales privados con un <i>spam</i> total de 20 MHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>• Tomar 25 medidas de la potencia de cada canal.</li> <li>• Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos).</li> </ul>
<p><b>Potencia total de la banda</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguir los procedimientos de logística mencionados anteriormente.</li> <li>• Utilizando el módulo de RF del analizador sintonizamos los canales públicos en las bandas correspondientes, con un <i>spam</i> total de 20 MHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>• Con el menú <i>measure</i>, ubicar la medida total en banda.</li> <li>• Tomar 25 medidas de la potencia de cada canal.</li> <li>• Documentar los datos en la tabla de Excel.</li> <li>• Grabar el archivo correspondiente.</li> </ul>
<p><b>Relación señal a ruido (C/N)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Repetir los pasos de logística.</li> <li>• Sintonizar las frecuencias de los canales privados en estudio.</li> <li>• Adecuar el <i>Ranger</i> para observar C/N.</li> <li>• Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos).</li> </ul>

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 68.** Protocolo de medición aplicado.

**Almacenamiento y extracción de la información**

- Almacenar en una memoria USB.
- Copiar información al PC.
- Clasificar archivos de datos y archivos de imágenes.
- Sistematizar información en Excel. Para el analizador de espectros observar los valores de las variables definidas en cada imagen y transcribir en archivo de Excel. Para el *Ranger*, extraer los archivos del módulo *Datalogger* y sistematizarlos en Excel.

**Ubicación de los puntos receptores en mediciones de campo**

La **Tabla 69** muestra los datos de los 90 lugares, sus ubicaciones, ángulos y elevación de los puntos receptores seleccionados en la visita a Leticia y Tabatinga.

**Tabla 69.** Ubicación de los puntos receptores.

	Nombre	Latitud	Longitud	Ángulo [°]	Elevación [m]
1	Antena CCNP	4°10'12"S	69°57'26"W	309NW	80
2	Amazonigas	4°10'23"S	69°57'20"W	319NW	81
3	Cruce	4°10' 46"S	69°57'06"W	309NW	80
4	km 18	4°04'50"S	69°59'53"W	149SE	80
5	km 17	4°05'20"S	69°59'28"W	170S	110
6	km 16	4°05'23"S	69°59'26"W	142SE	90
7	km 15	4°06'01"S	69°58'37"W	181S	90
8	km 14	4°06'06"S	69°58'35"W	138SE	90
9	km 13	4°06'28"S	69°58'14"W	143SE	100
10	km 11	4°07'15"S	69°57'01"W	205SW	100
11	km 10	4°07'38"S	69°56'50"W	170S	70
12	km 9	4°08'15"S	69°56'33"W	151SE	80
13	km 8	4°08'34"S	69°56'24"W	186S	100
14	km 7	4°09'09"S	69°56'10"W	176S	90
15	km 6	4°09'40"S	69°56'12"W	234SW	100
16	km 5	4°10'21"S	69°56'24"W	232SW	100
17	km 3	4°10'45"S	69°56'56"W	210SW	100
18	km 2	4°11'03"S	69°56'59"W	196S	90
19	km 2 medición 2	4°11'03"S	69°56'59"W	336NW	90
20	Cafamaz	4°12'00"S	69°56'36"W	164S	90
21	Cafamaz	4°12'00"S	69°56'36"W	9N	90
22	Sena Lagos	4°11'55"S	69°56'46"W	158S	90
23	Sena Lagos 2	4°11'55"S	69°56'46"W	329NW	90
24	Cementerio	4°11'59"S	69°56'38"W	127SE	90

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 69.** Ubicación de los puntos receptores.

	Nombre	Latitud	Longitud	Ángulo [°]	Elevación [m]
25	La frontera-Motojapón	4°13'49"S	69°56'15"W	342N	92
26	Sobre la frontera lado Colombia 1	4°13'09"S	69°56'07"W	300N	90
27	Sobre la frontera lado Colombia 2	4°12'43"S	69°56'09"W	238SE	90
28	Barrio M. <sup>a</sup> de Jesús	4°12'30"S	69°56'15"W	204SE	88
29	Parroquia Barrio M. <sup>a</sup> de Jesús	4°12'21"S	69°56'06"W	201SE	89
30	Aeropuerto Tabatinga	4°12'03"S	69°56'35"W	175SE	88
31	U. Nacional	4°11'41"S	69°56'29"W	203SE	88
32	Base Aérea Heibit Bay	4°11'18"S	69°56'02"W	215SE	85
33	Restaurante Sazón 100 % Peruana	4°12'34"S	69°56'35"W	96SE	88
34	Muelle internacional Leticia	4°12'23"S	69°56'42"W	173NE	80
35	Muelle Tabatinga	4°13'47"S	69°56'37"W	20N	88
36	Mercado Tabatinga	4°13'51"S	69°56'36"W	140SE	90
37	Montaña Tabatinga	4°15'14"S	69°56'46"W	347NW	90
38	Comara Tabatinga	4°15'30"S	69°56'44"W	338N	100
39	Pista Aeropuerto Tabatinga	4°15'52"S	69°56'21"W	355NW	90
40	Aeropuerto Tabatinga	4°15'00"S	69°56'20"W	12N	100
41	Casa del Chocolate	4°13'20"S	69°56'09"W	13N	90
42	Muelle Leticia Oriente	4°13'1'0"S	69°56'67"W	218NE	80
43	Muelle Leticia Occidente	4°13'60"S	69°56'04"W	64NE	80
44	Calle Casa de Cambio	4°13'01"S	69°56'41"W	185SW	80
45	Hospital	4°12'35"S	69°56'34"W	100E	88
46	Barrio José M. <sup>a</sup> Hernández	4°12'27"S	69°56'29"W	150SE	90
47	Almacén La Seiba	4°12'57"S	69°56'37"W	175SE	90
48	Tabatinga 1	4°14'01"S	69°56'11"W	303NE	90
49	Tabatinga 2	4°14'03"S	69°55'58"W	213NO	90
50	Tabatinga 3	4°14'04"S	69°55'58"W	246NO	90
51	Hospital Tabatinga	4°14'05"S	69°55'29"W	148NO	90
52	Tabatinga 4	4°14'09"S	69°55'19"W	320NE	90
53	Tabatinga 5	4°13'35"S	69°55'23"W	314NO	90
54	Tabatinga 6	4°13'55"S	69°55'04"W	275NO	90
55	Instituto Federal del Amazonas	4°13'05"S	69°55'15"W	255NO	94
56	Barrio El Paraíso	4°13'57"S	69°54'25"W	328NE	85
57	Tabatinga	4°13'05"S	69°55'15"W	92SE	90
58	Tabatinga	4°13'54"S	69°55'42"W	210SO	90
59	Vía Umariacu-Tabatinga 1	4°13'24"S	69°56'24"W	210SO	85

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 69.** Ubicación de los puntos receptores.

	Nombre	Latitud	Longitud	Ángulo [°]	Elevación [m]
60	Vía Umariacu-Tabatinga 2	4°15'32"S	69°56'37"W	20NE	85
61	Vía Umariacu-Tabatinga 3	4°15'04"S	69°56'41"W	197SO	85
62	Comunidad Umariacu 1	4°15'50"S	69°56'38"W	261SO	80
63	Comunidad Umariacu 2	4°16'13"S	69°56'27"W	245SO	85
64	Vía Umariacu-Tabatinga 4	4°15'42"S	69°56'40"W	235SO	88
65	Vía Umariacu-Tabatinga 5	4°14'47"S	69°56'43"W	35NE	85
66	Orilla río lado Brasil 1	4°13'41"S	69°56'43"W	299NO	85
67	Orilla río lado Brasil 2	4°14'12"S	69°56'32"W	314NO	85
68	Orilla río lado Brasil 3	4°14'01"S	69°56'27"W	221SO	88
69	Piscina Hotel Anaconda	4°12'58"S	69°56'33"W	212SO	90
70	Sobre la frontera lado Brasil 1	4°13'23"S	69°56'09"W	302NO	87
71	Cementerio Brasil	4°13'12"S	69°55'59"W	158SE	88
72	Cárcel Brasil	4°13'14"S	69°55'15"W	241NO	87
73	Sobre la frontera lado Brasil 2	4°13'17"S	69°55'26"W	260SO	88
74	Sobre la frontera lado Brasil 3	4°13'16"S	69°55'32"W	241SO	88
75	Sobre la frontera lado Brasil 4	4°13'03"S	69°55'58"W	202SO	88
76	Sobre la frontera lado Brasil 5	4°12'59"S	69°55'50"W	202SO	88
77	Sobre la frontera lado Brasil 6	4°13'01"S	69°55'42"W	263NO	88
78	Sobre la frontera lado Brasil 7	4°13'02"S	69°55'33"W	265NO	88
79	Sobre la frontera lado Brasil 8	4°13'05"S	69°55'20"W	285NO	85
80	Sobre la frontera lado Brasil 9	4°13'16"S	69°56'09"W	11NE	88
81	Iglesia del Espíritu Santo Tabatinga	4°13'38"S	69°56'12"W	242NO	88
82	Hotel Decameron	4°13'11"S	69°56'32"W	189SO	90
83	Leticia 1	4°13'17"S	69°56'24"W	332NO	90
84	Leticia 2	4°13'12"S	69°56'18"W	5NE	90
85	Leticia 3	4°13'05"S	69°56'19"W	152SE	90
86	Leticia 4	4°12'56"S	69°56'22"W	87SE	90
87	Liga Contra el Cáncer	4°12'49"S	69°56'24"W	112SE	90
88	Fiscalía	4°12'40"S	69°56'23"W	57NE	90
89	Cárcel Leticia	4°12'36"S	69°56'41"W	179SE	90
90	Cámara de Comercio	4°12'44"S	69°56'38"W	116SE	90
91	Museo	4°12'53"S	69°56'35"W	23NE	90

**Antenas de mediciones de campo en Leticia-Tabatinga (primera comisión).** Las tres antenas identificadas para televisión en la frontera se pueden visualizar en la **Figura 125**.





A. Canales públicos

B. Canales privados

C. Canales brasileiros

**Figura 125.** Antenas de TV análoga de los canales.





## Anexo 3. Análisis de propagación segunda comisión



### Caracterización de la antena receptora (segunda comisión)

En las Figuras 126 y 127 y en la Tabla 70 se presenta la antena que se utilizó para las mediciones de campo (antena aérea de 13 elementos para VHF y UHF).

Es un arreglo de antenas Yagi y dipolo doblado, definidas con parámetro R de 0.97 y 0.98, respectivamente, de acuerdo con la relación de distancias de su arreglo de reflectores. La antena cubre frecuencias desde 74 MHz a 230 MHz para VHF y de 470 MHz a 860 MHz para UHF.

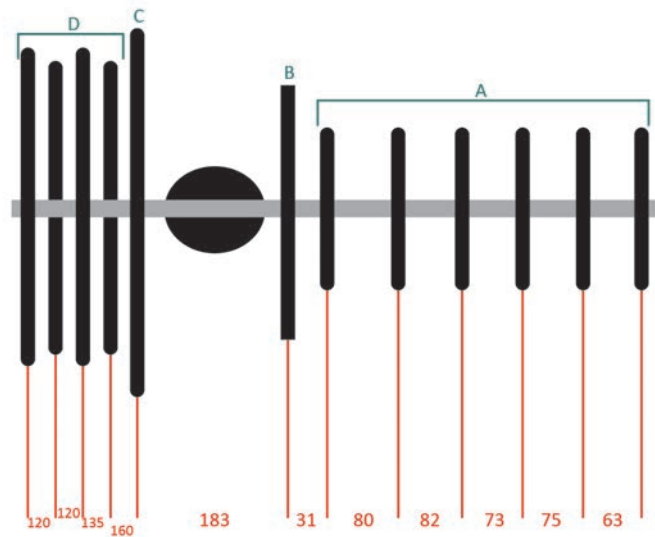


Figura 126. Vista superior de la antena.

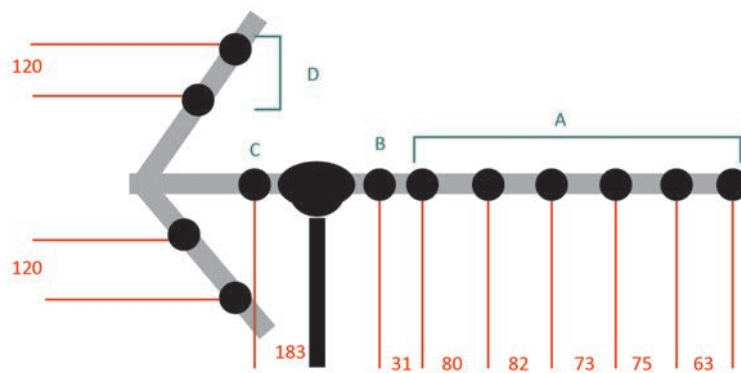


Figura 127. Vista lateral de la antena.



**Tabla 70.** Dimensiones de los elementos del arreglo de la antena.

Elemento	Tamaño (mm)
A	195
B	330
C	720
D	364

La caracterización de esta antena fue realizada mediante el kit de antenas ED3200, que tiene un sistema de radio a 500 MHz para UHF. La metodología para realizar la medición se presenta en la **Figura 128**, donde se muestra una antena transmisora dipolo de media onda a 500 MHz, la antena a 2 m de distancia, el sistema ED3200 con un motor a paso para el giro de la antena, el transmisor de 500 MHz, controlador y medidor de intensidad, más un computador para la recolección de datos.



**Figura 128.** Organización del sistema de mediciones del patrón de radiación y ganancia de antena.

Para la medición se realizaron 10 mediciones circulares de 360° y se compensó mediante un promedio con una ventana deslizante de 5° (cinco muestras) para disminuir las variaciones presentadas por el movimiento no continuo y las oscilaciones (resonancias mecánicas) del movimiento de la antena en su giro. Los resultados de la ventana deslizante mostraron una desviación estándar de aproximadamente 1.7 dB, lo cual concuerda con su propósito. Adicionalmente se realizó el mismo procedimiento para una antena omnidireccional de polarizada de forma vertical con el fin de hallar la ganancia de la antena. En la **Figura 129** se presenta el patrón de ganancia de la antena como resultado de las mediciones.



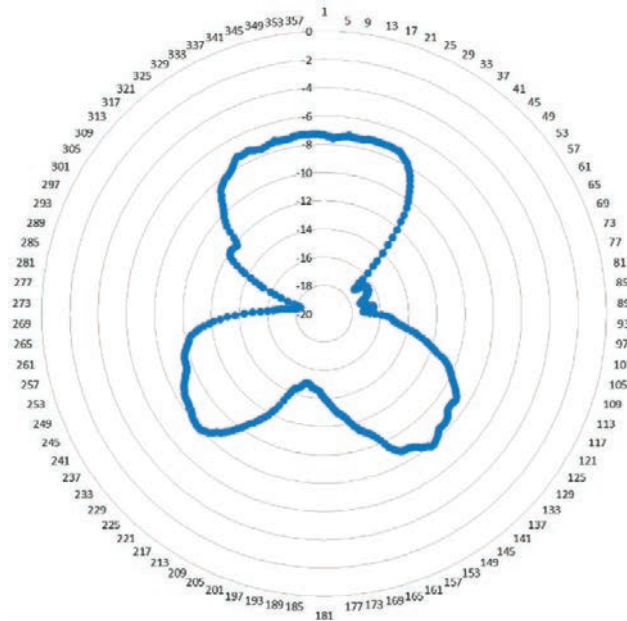


Figura 129. Ganancia horizontal de antena Yagi-Uda.

### Protocolo de mediciones de campo para televisión analógica (segunda comisión)

En la **Tabla 71** se describe el protocolo de medición desarrollado para determinar la cobertura y la propagación de las señales de televisión analógica en Leticia, Tabatinga y sus alrededores.

Tabla 71. Protocolo de medición.

Logística
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexión de la alimentación de la batería al inversor y del mismo a los equipos.</li> <li>• Conexión y prueba de funcionamiento de los equipos.</li> <li>• Ubicación del trayecto en el que se realizarán las medidas.</li> <li>• Ubicación de la trayectoria en el GPS según lo planteado</li> <li>• Parqueo seguro del vehículo para las personas y los equipos (poner señalización).</li> <li>• Caminar hasta el punto (si es necesario).</li> <li>• Toma de coordenadas reales con el GPS. Guardar datos en ficha técnica.</li> <li>• Conectar la antena. Esto se hará con ayuda de un mástil para lograr una altura de 3.5 m.</li> <li>• Conectar la antena con el <i>spliter</i> al puerto RF del analizador utilizando un cable tipo RG 58 con conectores BNC y adaptador coaxial, así como al <i>Ranger</i>.</li> <li>• Ubicar la antena intentando mantener la línea de vista con la antena transmisora.</li> <li>• Encender equipos.</li> <li>• Toma de mediciones, grabar datos.</li> <li>• Desconexión y desmontaje de equipos.</li> <li>• Verificación (conteo) de elementos.</li> <li>• Traslado al siguiente punto.</li> </ul> <p><b>Nota:</b> Todos los participantes del trabajo deberán portar cédula, carnet de la ECI y cartas de permisos para toma de medidas.</p>

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 71. Protocolo de medición.**

Canalización
<p><b>Coordenadas de cada punto</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ubíquese en el punto geográficamente seleccionado según lo planteado.</li> <li>2. Con ayuda de un GPS tome las coordenadas del punto y el ángulo de ubicación de la antena.</li> <li>3. Documente esta información en la ficha técnica.</li> </ol>
<p><b>Ángulos de la antena transmisora</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ubíquese en la antena transmisora.</li> <li>2. Con ayuda de un GPS medir su ángulo y azimut.</li> <li>3. Documente esta información en la ficha técnica.</li> </ol>
<p><b>Canales</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilizando en HD <i>Ranger 2</i> sintonizamos para identificar los canales.</li> <li>2. Utilizando el módulo de RF del analizador sintonizamos los canales con un <i>spam</i> total de 20 MHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>3. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos).</li> </ol>
<p><b>Ángulo de la antena receptora</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ubíquese detrás de la antena receptora.</li> <li>2. Con ayuda de un GPS o brújula medir el ángulo de dirección con respecto a la antena transmisora.</li> <li>3. Documente esta información en la ficha técnica.</li> </ol>
Propagación
<p><b>Potencia portadora de video</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Seguir los procedimientos de logística mencionados anteriormente.</li> <li>2. Utilizando el módulo de RF del analizador <i>Tektronix</i> sintonizamos la frecuencia central de los canales con un <i>spam</i> total de 6.6 MHz y un RBW de 30 KHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>3. El nivel de referencia debe estar en -40 dBm.</li> <li>4. Con ayuda de los marcadores ubicamos las portadoras de audio y video de cada canal.</li> <li>5. Tomar 25 medidas de la potencia de cada canal.</li> <li>6. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos), así como en la memoria de los equipos. Para el analizador <i>Tektronix</i>, utilizar el botón <i>save</i> para almacenar pantallazos.</li> <li>7. Utilizando el módulo de RF del analizador <i>Anritsu</i> sintonizamos en la frecuencia inicial 180 MHz y en la final 216 MHz con un <i>spam</i> total de 50 MHz y un RBW de 30 KHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>8. El nivel de referencia debe estar en -40 dBm.</li> <li>9. Con ayuda de los marcadores ubicamos las portadoras de video de cada canal.</li> <li>10. Tomar 25 medidas.</li> <li>11. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos), así como en la memoria de los equipos. Para el <i>Anritsu</i>, guardar cada medida con la función <i>save/display</i>.</li> <li>12. Durante el desplazamiento de un punto a otro, bajar esta información al PC para liberar la memoria de los equipos.</li> </ol>
<p><b>Potencia total de la banda</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Seguir los procedimientos de logística mencionados anteriormente.</li> <li>2. Para el analizador <i>Tektronix</i>, utilizando el módulo de RF del analizador, sintonizamos los canales en las bandas correspondientes con un <i>spam</i> total de 6.6 MHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>3. Con el menú <i>measure</i> ubicar la medida total en banda.</li> <li>4. Tomar 25 medidas de la potencia de cada canal.</li> <li>5. Documentar los datos en la tabla de Excel.</li> <li>6. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos), así como en la memoria de los equipos. Para el analizador <i>Tektronix</i>, utilizar el botón <i>save</i> para almacenar pantallazos.</li> <li>7. Para el analizador <i>Anritsu</i> este es un procedimiento matemático. Con los datos arrojados por el analizador se debe realizar la suma en mW de las potencias obtenidas en el canal. Este valor se convierte luego a dBm y el resultado es la potencia total del canal.</li> </ol>

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 71.** Protocolo de medición.

8. Con el *Ranger* sintonizamos los canales con un *span* total de 6.6 MHz y un RBW de 30 KHz para lograr una buena visualización de la señal.
9. Tomar 25 medidas de la potencia de cada canal.
10. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos), así como en la memoria de los equipos.

**Almacenamiento y extracción de la información**

Después de cada medición se debe descargar la información de los equipos al PC para evitar que la memoria de estos se llene y su rendimiento disminuya. Para el analizador *Tektronix* se deben clasificar las imágenes de los pantallazos por canal en diferentes archivos. Para el caso del analizador *Anritsu* se deben descargar los archivos de las mediciones usando la herramienta *Master Software Tools*. Estas también deben ser clasificadas por canal y por punto. De la misma manera, para el *Ranger* se deben extraer los archivos del módulo *Datalogger* y clasificarlos por canal y por punto.

1. Almacenar en una memoria USB.
2. Copiar información a PC.
3. Clasificar archivos de datos y archivos de imágenes.
4. Sistematizar información en Excel. Para el analizador de espectros *Tektronix* se deben observar los valores de las variables definidas en cada imagen y transcribir en archivo de Excel. Para el *Ranger* se deben extraer los archivos del módulo *Datalogger* y sistematizarlos en Excel. Para el *Anritsu* se deben extraer los archivos al PC y con el *software Anritsu* extraer cada archivo en formato .CVS para ser posteriormente analizado en Excel.

**Protocolo de mediciones de campo para telefonía móvil**

En la **Tabla 72** se presenta un protocolo de mediciones de telefonía móvil en la frontera.

**Tabla 72.** Protocolo de medición para telefonía móvil en Leticia.

Logística
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexión de la alimentación de la batería al inversor y del mismo a los equipos.</li> <li>• Conexión y prueba de funcionamiento de los equipos.</li> <li>• Ubicación del trayecto en el que se realizarán las medidas.</li> <li>• Ubicación de la trayectoria en el GPS según lo definido.</li> <li>• Parqueo seguro del vehículo para las personas y equipos (poner señalización).</li> <li>• Caminar hasta el punto (si es necesario).</li> <li>• Toma de coordenadas reales con el GPS del sitio. Guardar datos en ficha técnica.</li> <li>• Conectar la antena con el <i>spliter</i> al puerto RF de cada analizador utilizando un cable tipo RG 58 con conectores BNC y adaptador coaxial.</li> <li>• Encender equipos.</li> <li>• Toma de mediciones, grabar datos.</li> <li>• Desconexión y desmontaje de equipos.</li> <li>• Verificación (conteo) de elementos.</li> <li>• Traslado al siguiente punto.</li> </ul> <p><b>Nota:</b> Todos los participantes del trabajo deberán portar cédula, carnet de la ECI y cartas de permisos para toma de medidas.</p>
Canalización
<p><b>Ubicación de antenas</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificar las antenas celulares dentro de la zona haciendo un recorrido del lugar. Para facilitar este proceso se puede utilizar una aplicación móvil que las identifique.</li> <li>2. Estando en la antena, con ayuda de un GPS medir sus coordenadas.</li> <li>3. Describir características como altura y sectores.</li> <li>4. Documente esta información en la ficha técnica.</li> </ol>

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 72.** Protocolo de medición para telefonía móvil en Leticia.

<p><b>Coordenadas de cada punto</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ubíquese en el punto geográficamente seleccionado según lo definido.</li> <li>2. Con ayuda de un GPS tome las coordenadas del punto y el ángulo de ubicación de la antena.</li> <li>3. Documente esta información en la ficha técnica.</li> </ol>
<p><b>Ángulos de la antena transmisora</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ubíquese en la antena transmisora.</li> <li>2. Con ayuda de un GPS medir su ángulo y azimut.</li> <li>3. Documente esta información en la ficha técnica.</li> </ol>
<p><b>Canalización para telefonía móvil</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilizando los analizadores sintonizamos para identificar los servicios de las bandas 850, 900 y 1900 MHz.</li> <li>2. Utilizando una <i>spam</i> de 50 MHz y un RBW de 30 KHz, identificar los <i>Uplink</i> y <i>Downlink</i> de cada servicio.</li> <li>3. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos), así como en la memoria de los equipos.</li> </ol>
<p><b>Ancho de banda</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilizando el módulo de RF del analizador sintonizamos cada banda con un <i>spam</i> total de 50 MHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>2. Medir el ancho de banda efectivo BW de cada canal.</li> <li>3. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos), así como en la memoria de los equipos.</li> <li>4. Durante el desplazamiento de un punto a otro bajar esta información al PC para liberar la memoria de los equipos.</li> </ol>
<p><b>Potencia</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Seguir los procedimientos de logística mencionados anteriormente.</li> <li>2. Utilizando el módulo de RF del analizador sintonizamos las bandas con un <i>spam</i> total de 50 MHz para lograr una buena visualización de la señal.</li> <li>3. Con ayuda de los marcadores identificar el pico más alto en los <i>Downlink</i> y tomar el valor de la potencia.</li> <li>4. Grabar archivos correspondientes en USB (imágenes y datos), así como en la memoria de los equipos.</li> <li>5. Durante el desplazamiento de un punto a otro bajar esta información al PC para liberar la memoria de los equipos.</li> </ol>
<p><b>Almacenamiento y extracción de la información</b></p> <p>Después de cada medición se debe descargar la información de los equipos al PC para evitar que la memoria de estos se llene y su rendimiento disminuya. Para el analizador <i>Tektronix</i> se deben clasificar las imágenes de los pantallazos por canal en diferentes archivos. Para el caso del analizador <i>Anritsu</i> se deben descargar los archivos de las mediciones usando la herramienta <i>Master Software Tools</i>. Estas también deben ser clasificadas por canal y por punto.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Almacenar en una memoria USB.</li> <li>2. Copiar información a PC.</li> <li>3. Clasificar archivos de datos y archivos de imágenes.</li> <li>4. Sistematizar información en Excel. Para el analizador de espectros <i>Tektronix</i> se deben observar los valores de las variables definidas en cada imagen y transcribir en archivo de Excel. Para el S332D se deben extraer los archivos al PC y con el <i>software Anritsu</i> extraer cada archivo en formato .CVS para ser posteriormente analizado en Excel.</li> </ol>

**Resultados de mediciones de campo telefonía (segunda comisión)**

Siguiendo el protocolo de medición se obtuvieron resultados de las mediciones con los analizadores para los canales públicos. En la **Figura 130** se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con el analizador *Anritsu*. En esta imagen se pueden observar los *Uplink* y *Downlink* de los diferentes operadores que funcionan en la banda de 850 MHz. El pico más alto del *Downlink* está en 884.875 MHz, con un valor de -57.91 dBm. Así mismo, el ancho de banda es de 24.5 MHz.





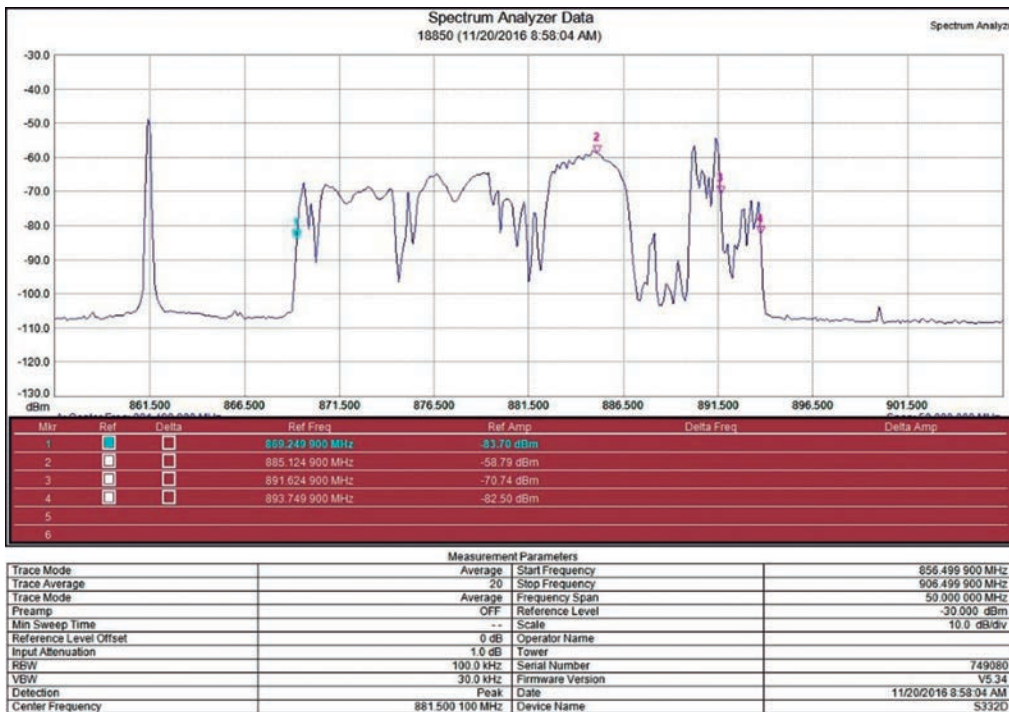


Figura 130. Resultados observados en el analizador Anritsu para la banda 850 MHz.

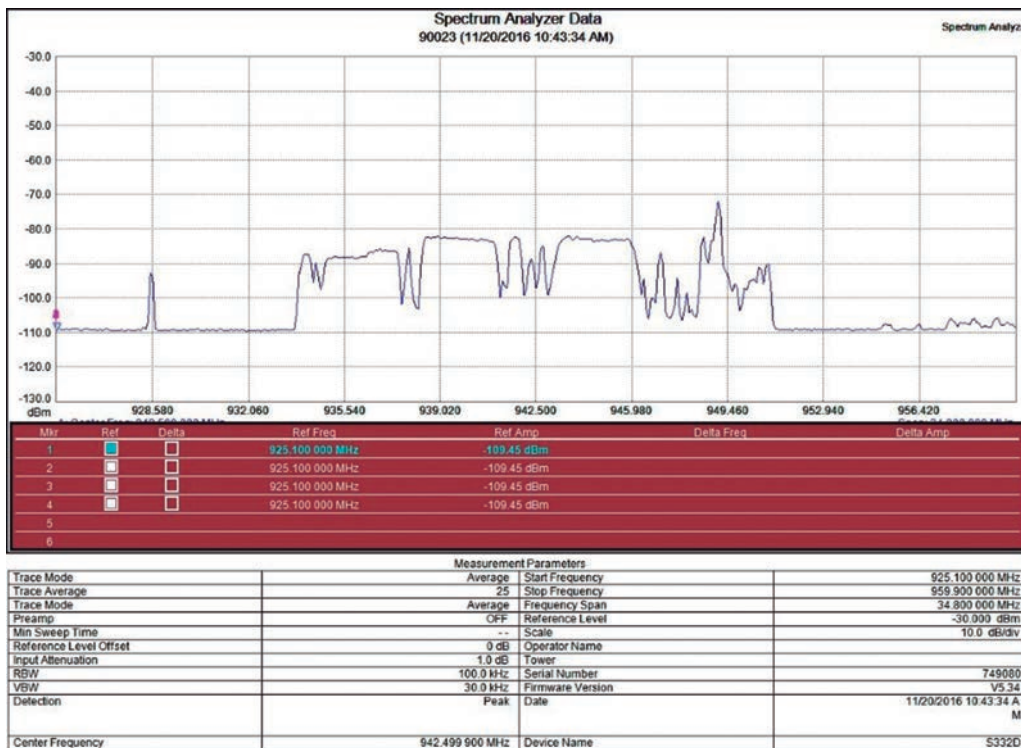
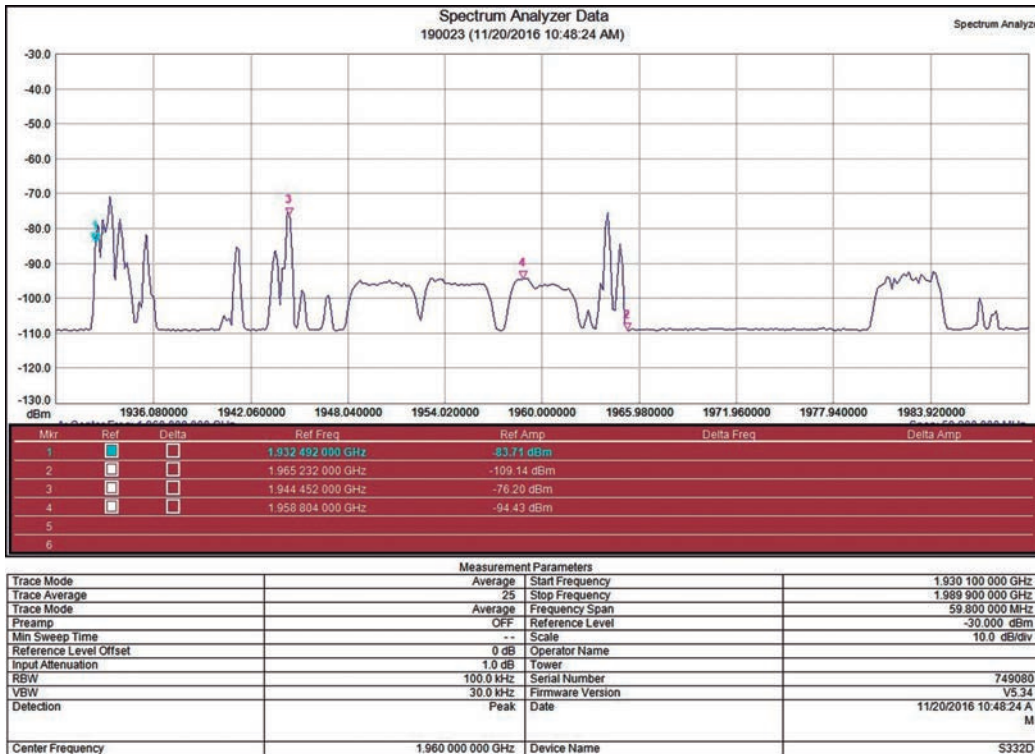


Figura 131. Resultados observados en el analizador Anritsu para la banda 900 MHz.



En la **Figura 131** se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con el analizador *Anritsu*. En esta imagen se pueden observar los *Uplink* y *Downlink* de los diferentes operadores que funcionan en la banda de 900 MHz. Se evidencia que el pico más alto del *Downlink* está en 938.93 MHz, con un valor de -82.11 dBm.

En la **Figura 132** se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con el analizador *Anritsu*. En esta imagen se pueden observar los *Uplink* y *Downlink* de los diferentes operadores que funcionan en la banda de 1900 MHz. Se evidencia que el pico más alto del *Downlink* está en 1958 MHz, con un valor de -94.43 dBm. Para el *Uplink*, el valor más alto se registra en 1945 MHz, con -76.20 dBm.



**Figura 132.** Resultados observados en el analizador *Anritsu* para la banda 900 MHz.



## Anexo 4. Herramientas de simulación y equipos de medición



En el presente anexo se describen las herramientas de medición usadas en el proyecto.

### **Software ICS Telecom**

Permite realizar simulación y representación de sistemas de radiocomunicaciones con base en un sistema de información cartográfica, con la posibilidad de evaluar el desempeño de los mismos con la mayor precisión posible. Su objetivo es estimar o predecir el comportamiento de los parámetros de desempeño de las tecnologías más sobresalientes utilizando un conjunto de algoritmos para cada aspecto particular, y así lograr una alta precisión en sus resultados (Betancur & Sierra, 2015). A manera general se mencionan las principales funcionalidades del *software*:

**Definición de estaciones.** El usuario indica el tipo de estación y sus parámetros técnicos necesarios, tales como ubicación, altura sobre el terreno, potencia, ganancia, pérdidas, modelos de antena, etc. Estas estaciones aparecen instantáneamente en el mapa y pueden ser integradas a una base de datos interna o externa para la realización de posteriores estudios.

**Parámetros de cálculo.** El programa integra varios modelos de propagación, difracción y reflexión. Además, toma en cuenta interacciones físicas tales como la curvatura del globo terrestre, la atenuación climática y la atenuación lineal de usos del suelo.

**Optimización del espectro y cálculos de interferencia.** El sistema asigna frecuencias de forma automática, ya sea desde un rango de frecuencias o desde una lista de frecuencias definidas por el usuario. Optimiza la ocupación del espectro a través de la reutilización de frecuencias cuando esto es posible, y así, a su vez, minimiza la interferencia.

**Diseño.** El programa realiza una búsqueda automática de emplazamientos a partir de un grupo de suscriptores o zonas que han de cubrirse.

**Radioenlaces.** El programa extrae de forma instantánea el perfil del terreno localizado entre dos estaciones teniendo en consideración la curvatura del globo terrestre y los usos del suelo. Además, genera los balances para enlaces por microondas analógicos o digitales, según los modelos predefinidos de propagación, difracción y reflexión. Proporciona la información sobre la fiabilidad del enlace.

**Administración de bases de datos.** El programa usa bases de datos internas que permiten la administración instantánea de todos los emplazamientos que sean necesarios. Ade-



más, da la posibilidad de conectarse a fuentes externas mediante una red existente de ámbito local o lejano.

**Resultados de la simulación.** Dependiendo de la simulación llevada a cabo, estos pueden ser:

- Valor de intensidad de campo en  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  y en  $\text{dBm}$ .
- La numeración de un determinado sitio.
- La numeración de varios sitios.
- Valor en vatios.
- Valor en microsegundos ( $\mu\text{sec}$ ).

### Analizador de TV HD Ranger 2

Explorador universal de TV que cubre los estándares de la familia DVB, así como formatos MPEG-2 o MPEG-4 y audio *Dolby*. También puede trabajar en instalaciones de fibra óptica, DAB/DAB+ y GPS. El medidor ofrece herramientas complementarias, tales como la detección de interferencias de señales 4G, los diagramas de constelaciones o los ecos (Figura 133).



Figura 133. Analizador HD Ranger 2. Fuente: Promax (2016).

El HD Ranger 2 dispone de una aplicación para gestionar los datos que se generan en cada instalación. Esta función facilita al usuario el control de la información generada, de tal forma que puede acceder a ella en cualquier momento, o bien descargarla en un PC.

El equipo dispone en la parte izquierda de tres teclas que dan acceso directo a las tres funciones más importantes. Una de ellas es la tecla "analizador de espectro", que muestra en pantalla el espectro de la señal que recibe por el conector de entrada RF.

El modo "analizador de espectros" permite comprobar las señales presentes en la banda de frecuencias, identificar de forma visual cualquier anomalía, medir el nivel y visualizar la imagen sintonizada (Figura 134).

1. Seleccionar fecha y hora.
2. Número de vista/total de vistas.



3. Modo activo del *joystick*; banda seleccionada; nivel de batería.
4. Valores de medición de la señal en la frecuencia/canal donde apunta el cursor.
5. Espectro en la banda al *spam* seleccionado.
6. Frecuencia central y cursor. También se muestra el ancho de la señal digital enganchada.
7. Estado de la señal.
8. Menús de las teclas programables.

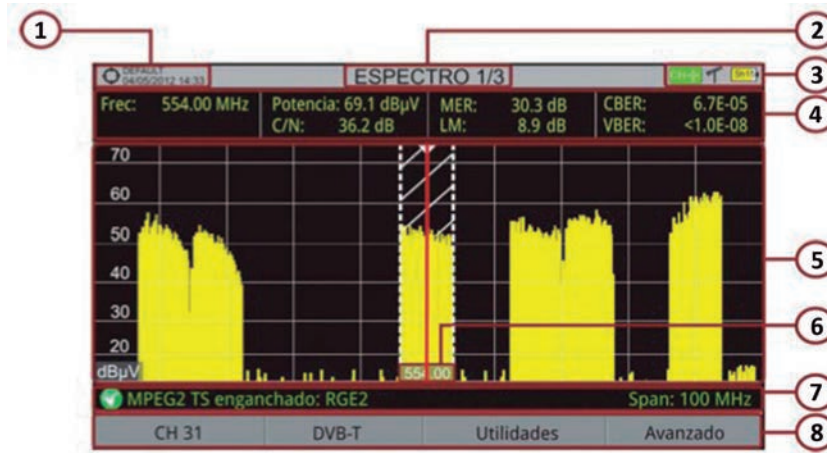


Figura 134. Medida de espectro del HD Ranger 2. Fuente: Promax (2016).

Gracias a la función de autoidentificación o *StealthID*, el sistema está constantemente identificando la señal que recibe. Cuando detecta el tipo de señal, la engancha y muestra la información.

Una vez identificada la señal, el equipo realiza las medidas adecuadas al tipo de señal. Toda la información sobre *transponders* o múltiples se presenta automáticamente en pantalla sin necesidad de introducir ningún parámetro adicional de identificación (Promax, 2016).

A continuación se enumeran las señales que el equipo puede detectar automáticamente:

- TV digital terrestre de primera y segunda generación (DVB-T) (DVB-T2-base y T2-Lite).
- TV digital satélite de primera y segunda generación (DVB-S) (DVB-S2).
- TV digital satélite exclusiva de DIRECTV (DSS).
- TV digital cable de primera y segunda generación (DVB-C) (DVB-C2).
- TV analógica terrestre, cable y satelital.
- FM analógica terrestre.

### Analizador de espectros Tektronix MDO-3000

Osciloscopio que incluye seis instrumentos integrados, incluyendo un analizador de espectros con un rango de medida desde 9 KHz a 3 GHz, generador de funciones, analizador lógico, analizador de protocolos, voltímetro digital y contador de frecuencia; puede capturar señales analógicas, digitales y de RF.





El MDO-3000 proporciona las herramientas necesarias para probar y depurar prácticamente cualquier diseño embebido. Además, es totalmente personalizable, lo que les permite a los clientes seleccionar la funcionalidad y las prestaciones necesarias ahora y más adelante. Se puede actualizar el equipo según sus necesidades (Figuras 135 y 136):

- Actualizar el rendimiento del ancho de banda hasta 1 GHz.
- Ampliar el ancho de banda RF hasta 3 GHz.
- Añadir 16 canales digitales con sonda.
- Añadir generador arbitrario de funciones.

El osciloscopio MDO3000 cuenta con 2 o 4 canales analógicos de entrada, con un ancho de banda que va desde 100 MHz a 1 GHz, 16 canales digitales (opcional) y un canal de entrada de RF que coincide con el ancho de banda del osciloscopio (9 KHz hasta el ancho de banda analógico). La frecuencia de entrada de RF puede extenderse a 3 GHz.

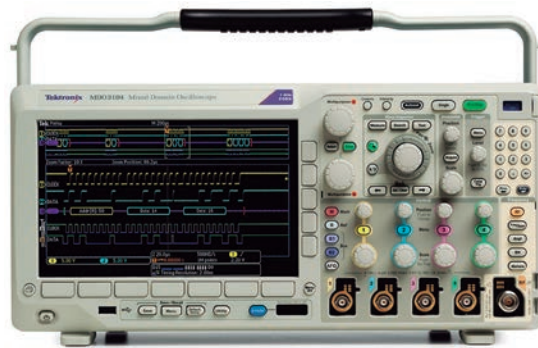


Figura 135. Analizador de espectro Tektronix MDO-3000. Fuente: Tektronix (2015).

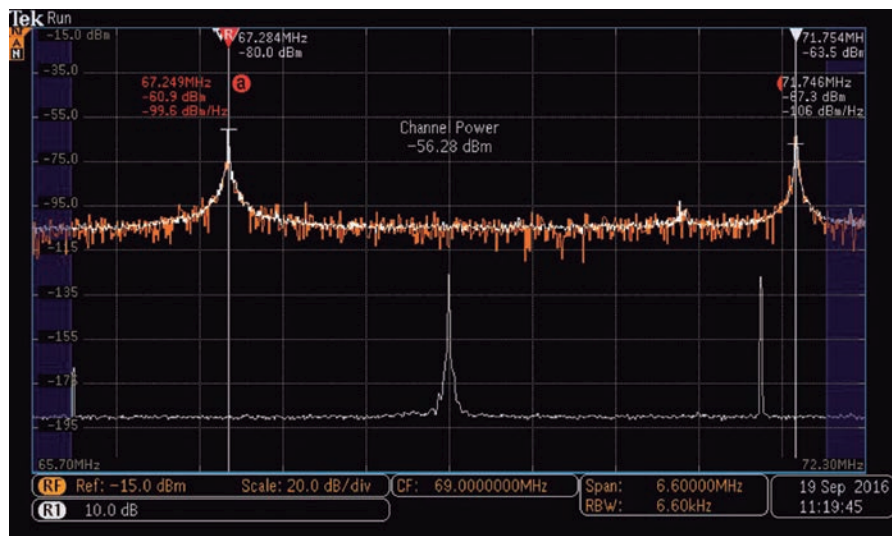


Figura 136. Captura pantalla del analizador de espectro.



### Características claves:

- Tasa de captura de alta velocidad de las anomalías de la forma de onda.
- Los controles proporcionan una fácil navegación y búsqueda automatizada de datos de forma de onda.
- 33 mediciones automáticas e histogramas de forma de onda para el análisis de forma de onda simplificada.
- Controles del panel frontal dedicados para las tareas comunes
- Marcadores pico automatizados que identifican frecuencia y amplitud de los picos de espectro.
- Pantalla espectrograma que permite fácil observación y comprensión de los fenómenos que cambian lentamente RF.
- Las medidas automáticas incluyen potencia del canal, adyacente relación de canal de alimentación y ancho de banda ocupado (Tektronix, 2015).



## Anexo 5. Acuerdo de cooperación para comprobación técnica del espectro



### Anexo 1

#### Acuerdo de cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica

Acuerdo entre las administraciones de Francia, Alemania y Suiza, sobre la cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica

#### Acuerdo

##### Entre las administraciones signatarias sobre la cooperación directa entre estaciones de comprobación técnica radioeléctrica

Las administraciones signatarias, dentro del ámbito de sus responsabilidades definidas en los artículos<sup>(1)</sup> 20, 22 y 24 del Reglamento de Radiocomunicaciones en cuanto a la solución de problemas de interferencia perjudicial o emisiones no autorizadas, han determinado lo siguiente:

1. Si se estima necesaria la asistencia de otro país, la oficina centralizadora del país afectado deberá dirigirse a la oficina centralizadora del país ajeno de acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones (número 1875 del Reglamento de Radiocomunicaciones).
2. Los organismos responsables de la comprobación técnica radioeléctrica designarán estaciones de comprobación técnica radioeléctrica que, cuando se estime oportuno, puedan establecer contacto directo entre ellas (números 1946 y 1956 del Reglamento de Radiocomunicaciones).
3. Las administraciones dan su consentimiento al equipo de comprobación técnica móvil de las estaciones de comprobación técnica mencionadas en el 2. Anterior para cruzar las fronteras comunes de sus países en cumplimiento de las tareas de comprobación técnica radioeléctrica.  
En cada uno de los casos se ha de obtener el consentimiento del país ajeno. Las estaciones podrán utilizar su propio equipo de comprobación técnica. La utilización de medios de comunicación no está cubierta por el presente acuerdo.
4. No pueden realizarse actos oficiales directamente dirigidos a los ciudadanos situados dentro del territorio del país ajeno.
5. Las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica se prestarán mutuo apoyo en la aplicación del presente acuerdo.
6. Los organismos responsables de la comprobación técnica radioeléctrica estipularán dentro de un protocolo los términos que conciernen a la aplicación de este acuerdo.

NOTA 1 – Reemplazados por los Artículos 16, 15 y 18, respectivamente.

París, 16 de septiembre, 1993

Por el Ministro responsable de las telecomunicaciones en Francia:

El Director de la Reglamentación General:

Berna, 15 de octubre, 1993

Por la Dirección General de los Operadores de PTT suizos,

El Director de la Dirección General de Radio y Televisión:

Bonn, 9 de noviembre, 1993

Por el Ministro Federal de Correos y Telecomunicaciones:



## PROTOCOLO

### Relativo al acuerdo de 1993 entre las administraciones de Alemania, Suiza y Francia sobre la cooperación directa entre las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica.

#### 1. Participantes en la cooperación

- por Alemania: las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica de Constance y Darmstadt;
- por Francia: los servicios regionales de las radiocomunicaciones de Lyon-St André de Corcy y Nancy, y el centro internacional de comprobación técnica radioeléctrica de Rambouillet;
- por Suiza: las estaciones de comprobación técnica radioeléctrica de Basilea, Berna, Châtonnaye, Ginebra, St. Gallen y Zurich.

#### 2. Forma de la cooperación

La cooperación directa ofrece las posibilidades siguientes a los países participantes en el acuerdo:

- efectuar mediciones con equipo de comprobación técnica fijo y móvil a petición de un país vecino en su propio territorio;
- efectuar mediciones con su propio equipo de comprobación técnica móvil fuera de su territorio;
- intercambiar resultados de las mediciones.

#### 3. Procedimiento de la cooperación

La petición de mediciones será transmitida entre las estaciones de comprobación técnica por teléfono, fax o télex. Si hubieran de efectuarse mediciones con equipo de comprobación técnica móvil en territorio extranjero, no se podrá sobrepasar una distancia de 50 kilómetros de la frontera.

#### 4. Límites de la cooperación

La cooperación directa de las estaciones de comprobación técnica finalizará cuando la petición ya no pueda ser atendida porque el asunto caiga fuera de la competencia de la estación de comprobación técnica.

Asimismo finalizará

- cuando se prevea que las mediciones con equipo de comprobación técnica fijo requieran más de 3 horas;
- cuando se prevea que las mediciones con equipo de comprobación técnica móvil requieran más de 9 horas o más de un vehículo de comprobación técnica.

En ambos casos, las peticiones se habrán de dirigir a la oficina centralizadora.

París, 16 septiembre, 1993

Por la Dirección de la  
Reglamentación General,  
El Servicio Nacional de las  
Radiocomunicaciones:

Berna, 15 octubre, 1993

Por la Dirección General de los  
Operadores de PTT Suizos  
Dirección de Radio y Televisión  
Departamento de Monopolio  
Estatual de Radiocomunicaciones:

Mainz, 29 noviembre, 1993

Por el BAPT,  
La Oficina Centralizadora del  
Servicio de Comprobación  
Técnica Radioeléctrica:

Nota – debido a reorganización de las autoridades de telecomunicaciones, las autoridades signatarias han cambiado su denominación. No obstante, el acuerdo sigue todavía vigente.

## Anexo 6. Definiciones de parámetros técnicos



El presente anexo describe dos metodologías de definiciones de parámetros técnicos. La primera está basada en la recomendación del documento CITEL 3087 y la segunda es un compendio desarrollado por los autores para el desarrollo del presente proyecto.

### Documento CITEL 3087

Las definiciones incluidas en los acuerdos de coordinación serán las del artículo 1 del RR de la UIT, así como las que se muestran a continuación:

- 1. Interferencia perjudicial.** Se entiende como interferencia perjudicial cualquier emisión que cause una degradación importante en la calidad del tráfico de un servicio de radio-comunicación, o que repetidamente interrumpa dicho servicio al exceder el máximo de densidad de flujo de potencia o la máxima intensidad de campo especificada para el servicio móvil terrestre; o en el caso del servicio fijo terrestre, la máxima degradación de umbral permitida.
- 2. Zona de coordinación.** Área geográfica establecida a partir de un punto o línea de referencia, que es generalmente la línea de frontera entre dos o más países; en esta se establecen condiciones técnicas y procedimentales particulares del uso de una determinada banda de frecuencias con el fin de reducir el riesgo de interferencia perjudicial sobre los sistemas de comunicaciones y promover el uso eficiente del espectro.
- 3. Distancia de coordinación.** Distancia medida a partir de un punto o línea de referencia, que es generalmente la línea de frontera entre dos o más países. La distancia de coordinación se establece dependiendo de las características de los sistemas de comunicaciones, la frecuencia de operación y demás factores técnicos que las administraciones estimen convenientes para proteger sus sistemas de comunicaciones ante eventuales interferencias perjudiciales.
- 4. Frecuencias que requieren coordinación.** Frecuencias sujetas a coordinación con la(s) administración(es) con las que se ha suscrito un acuerdo para el uso del espectro antes que una estación sea puesta en servicio.
- 5. Frecuencias preferenciales.** Frecuencias que las administraciones firmantes del (los) acuerdo(s) podrían asignar sin coordinación previa, de acuerdo con las condiciones técnicas y procedimentales establecidas.



6. **Frecuencias compartidas.** Frecuencias que las administraciones firmantes del (los) acuerdo(s) podrían compartir sin coordinación previa, de acuerdo con las condiciones técnicas y procedimentales establecidas.
7. **Frecuencias para futuras redes de comunicaciones.** Frecuencias que las administraciones están obligadas a coordinar de acuerdo con las condiciones técnicas y procedimentales establecidas en el acuerdo para el uso del espectro para una futura introducción de una red de radiocomunicaciones.
8. **Frecuencias utilizadas de acuerdo con planes de redes establecidos en zonas geográficas.** Frecuencias usadas por el servicio móvil terrestre en los países firmantes del acuerdo con base en un plan de red que haya sido preparado y adoptado con antelación, teniendo en cuenta las características técnicas establecidas en dicho plan.
9. **Frecuencias utilizando códigos preferenciales.** Frecuencias que las administraciones firmantes del (los) acuerdo(s) podrían asignar sin coordinación previa, de acuerdo con las condiciones técnicas y procedimentales establecidas.
10. **Frecuencias utilizadas a partir de acuerdos entre operadores.** Pueden ser utilizadas sin coordinación previa, con la condición de que exista un acuerdo vigente firmado por las administraciones interesadas. Estos acuerdos entre los operadores también pueden incluir el uso de códigos.
11. **Registro de frecuencias.** Registro de frecuencias compuesto por las frecuencias coordinadas, las frecuencias preferenciales asignadas, las frecuencias compartidas, las frecuencias coordinadas para redes de radiocomunicaciones radioplanificadas, y sus frecuencias utilizadas de acuerdo con planes de redes establecidos en zonas geográficas y frecuencias utilizando códigos preferenciales.

## Compendio de definiciones

### Frecuencia y espectro

1. **Frecuencias y bandas.** La frecuencia se define como la velocidad de una electromagnética en oscilar; constituyen los elementos más importantes en el espectro radioeléctrico. Para el caso de la coexistencia, se definen diversos tipos de frecuencias que permiten el uso compartido del espectro de manera organizada a partir de un acuerdo de coordinación (UIT, 1995):
  - **Frecuencias adjudicadas.** Frecuencias de uso exclusivo o preferente por una administración.



- **Frecuencias compartidas.** Frecuencias que pueden ser usadas por dos o más administraciones sin coordinación previa y que no afectan los sistemas vecinos.
- **Frecuencias coordinadas.** Frecuencias resultado del proceso de coordinación, donde típicamente se coordinan servicios fijos.
- **Frecuencias para redes planificadas.** Son frecuencias que deben ser coordinadas para introducción de nuevas redes de radio coherentes.

Las bandas son, entonces, los rangos de frecuencia que pueden usar un servicio de radio-comunicaciones.

**2. Ancho de banda y banda de guarda.** El ancho de banda es el espectro radioeléctrico de un servicio de radiocomunicaciones. Se delimita por una frecuencia inferior y otra superior, y puede o no definir bandas de guarda para proteger de interferencia a otros servicios de radio adyacentes. Las bandas de guarda son separaciones espectrales entre anchos de banda donde no se transmite nada; estas se dejan libres para que, en estos espacios, la potencia interferente no afecte los sistemas o servicios de las bandas contiguas.

**3. Canales y canalización.** Los canales son esos espacios espectrales para un único servicio o usuario, dependiendo de la tecnología usada. Por ejemplo, en telefonía móvil un canal puede usar dos frecuencias, una inferior para el UL y una superior para el DL. Para el caso de la televisión se definen con un ancho de banda de 6 u 8 MHz para asignar un canal de televisión. La canalización es la forma estandarizada de definir cuáles espacios de frecuencia corresponden a una numeración de canales definidos y cuál es su uso dentro del espectro radioeléctrico.

## Radiación, propagación y espectro

**1. Potencia máxima radiada.** La Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) y la Potencia Radiada Aparente (PRA) son dos parámetros importantes de la transmisión que influyen en la potencia recibida por un receptor que puede o no ser interferido. La PIRE se define como la potencia que emitiría una antena isotrópica teórica (es decir, aquella que distribuye la potencia exactamente igual en todas las direcciones) para producir una densidad de potencia observada en la dirección del lóbulo de máxima ganancia de una antena. La PIRE tiene en cuenta todas las ganancias y las pérdidas de conectores, la antena y la línea de transmisión, por lo que permite calcular la potencia real, los valores de campo electromagnético y, en específico, determinar el área de cobertura de un transmisor. Por su parte, la PRA es la potencia de un radiador dipolo de media onda transmitiendo en un plano horizontal. Su relación con la PRA está dada en la **Ecuación 45**. La potencia máxima radiada puede estar delimitada por la altura efectiva de la antena, ya que a mayor altura, mejor propagación de la señal.





$$PRA [dBW] = PIRE [dBW] - 2.15[dB]$$

**Ecuación 45.**

**2. Densidad de flujo de potencia.** La densidad de flujo de potencia se define como la potencia por unidad de área de una esfera de un radiador isotrópico con un radio  $r$ . Este valor permite calcular la potencia recibida en un receptor que se encuentre a la misma distancia  $r$ , únicamente teniendo en cuenta la propagación en espacio libre. La **Ecuación 46** muestra la densidad de flujo de potencia a una distancia  $r$  de un radiador isotrópico en un espacio libre.

$$\phi \left[ dB \left( \frac{W}{m^2} \right) \right] = 10 \log \left( \frac{PIRE}{4\pi r^2} \right)$$

**Ecuación 46.**

Por su parte, la potencia recibida se puede determinar como la densidad de flujo de potencia multiplicada por el área efectiva de la antena, tal como se describe en la **Ecuación 47**.

$$P_{Recibida} = \phi * A_e$$

**Ecuación 47.**

**3. Modelos de propagación y Link Budget.** Los modelos de propagación, como se mencionó en el "entregable 2: estudios técnicos", permiten la realización de un procedimiento matemático, ya sea empírico o determinístico, para predecir la potencia recibida en un receptor a una distancia determinada de la antena transmisora. Los modelos tienen en cuenta los principios básicos de la propagación, como son la reflexión, la difracción y la dispersión, así como los componentes terrenales y el impacto de los objetos en el camino de la propagación entre un transmisor y un receptor. Por su parte, el *Link Budget* tiene en cuenta las pérdidas por propagación, así como las ganancias y pérdidas de los transmisores y receptores con el fin de predecir la potencia recibida en un receptor de la forma más cercana posible.

## Localización y variables espaciales

**1. Zona de coordinación.** La Recomendación UIT-R SM.1049-1 de la UIT (UIT, 1995) define la zona de coordinación como el espacio o área transfronteriza donde dos o más administraciones vecinas deban realizar esfuerzos comunes, aplicando un acuerdo de coordinación, para permitir el correcto funcionamiento de los servicios de radiocomunicaciones. Este acuerdo deberá incluir los procedimientos para la creación de la zona de coordinación y la definición del perímetro de coordinación con base en requisitos técnicos.



cos propios de la explotación del servicio de radiocomunicaciones. Adicionalmente, el desarrollo de la zona de coordinación debe propender hacia el intercambio oportuno de información respecto a la gestión del espectro radioeléctrico y una metodología para resolver situaciones de interferencia perjudicial inesperada.

El acuerdo en la zona de coordinación deberá incluir en detalle aspectos técnicos como las frecuencias a las cuales se realizará el servicio, el ancho de banda acordado, el sistema de modulación y transmisión, la altura efectiva de antena, las limitaciones de cobertura mínima del servicio, la ubicación de antenas y estaciones, entre otros. Por su parte, el perímetro de coordinación debe buscar un acuerdo de la máxima intensidad de campo interferente permitida en las frecuencias y bandas de los servicios, los valores máximos de potencia y ganancia de la antena transmisora y un método de predicción de la potencia recibida que incluya un modelo de propagación coherente con la topografía de la zona de coordinación.

Finalmente, se debe incluir una metodología para la verificación del acuerdo y mencionar cómo se han implementado las señales en la zona de coordinación con mediciones necesarias para validar el modelo de propagación usado, mediciones meteorológicas que influyan en la señal recibida y procedimientos de resolución de dificultades posteriores a la implementación del acuerdo.

- 2. Ubicación de estaciones.** Para identificar si una estación necesita de un proceso de coordinación se debe saber si su ubicación se encuentra dentro de la zona de coordinación. Por lo cual, las administraciones involucradas deben proveer la información de la ubicación de las estaciones con un formato en el cual las coordenadas se presenten de manera organizada. Los sistemas de coordenadas usualmente se dividen en dos categorías: a) coordenadas angulares relacionadas con la latitud del Ecuador y la longitud del meridiano de *Greenwich* y b) una proyección rectangular de un área particular de la tierra. Para el primer caso se recomiendan los datos geodésicos basados en el geoido 80 GRS, como el WGS 84, recomendado para zonas de coordinación internacional.
- 3. Altura efectiva de las antenas.** La altura efectiva de una antena transmisora, según se define en las recomendaciones UIT-R P.370 y UIT-R P.1546, es la altura de esta sobre el nivel medio del terreno para distancias comprendidas entre 3 y 15 km en la dirección de la antena receptora (MinTIC & ANE, 2016). Este caso es ampliamente usado para antenas de televisión digital, cuya cobertura supera típicamente los 10 km. Para distancias más cortas se establece que la altura efectiva es la misma de la torre o mástil de comunicaciones. Este es el caso típico de sistemas de telefonía móvil.
- 4. Azimut y elevación.** El azimut y la elevación describen la dirección de máxima transferencia energética de una antena, o lo que se denomina la dirección del lóbulo principal. El azimut se define como el ángulo que tiene la antena con respecto al norte verdadero de la tierra sobre un plano horizontal, y sus valores están entre 0° y 360°. Por su par-



te, la elevación es el ángulo que se genera entre el plano horizontal y el ángulo al cual apunta la antena, y tiene valores entre  $+90^\circ$  y  $-90^\circ$ . En sistemas de radiodifusión televisiva o en telefonía móvil, donde la antena típicamente apunta a los usuarios en tierra, los valores están entre  $0^\circ$  y  $-10^\circ$ .

**5. Ganancia de antena y directividad.** La ganancia de antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena. Sus unidades son dBi o dBd: la primera se da en relación con una antena isotrópica y la segunda en relación con un dipolo de media onda. Así como en la relación entre la PIRE y la PRA, su diferencia también es de 2.15 dB a favor del dBd. La directividad es el ángulo al cual se apunta el lóbulo principal o lóbulo de mayor potencia, de acuerdo con los parámetros de azimut y elevación.

**6. Polarización de la antena.** La polarización de la antena es la forma geométrica en la cual el campo electromagnético fluye. Para un campo que se desplaza sobre el eje +Z, el campo eléctrico (E) estará en la dirección +X y el campo magnético apuntará en la dirección +Y, todos con magnitud positiva. Debido a lo anterior, se pueden describir dos tipos de polarización: A) o B).

- **Polarización lineal.** Ocurre cuando el campo eléctrico oscila sobre el mismo eje y está sincronizado en fase con el campo magnético. En particular, si este eje X es paralelo al horizonte, se denomina polarización horizontal. Cuando el eje del campo eléctrico sea perpendicular al horizonte, se denomina polarización vertical.
- **Polarización circular.** Se da cuando el campo eléctrico está desfasado  $90^\circ$  con respecto al campo magnético. Para este caso, el campo puede rotar en el sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario, dependiendo del signo del desfase. Un caso particular de este último se da cuando las magnitudes de los campos eléctrico y magnético difieren, produciendo así una polarización elíptica. La polarización es un aspecto sumamente importante en las radiocomunicaciones debido a que la máxima transferencia de energía entre dos antenas se da cuando ambas presentan la misma polarización.

**7. Cobertura o zona de recepción.** La cobertura es el área geográfica donde se presta un servicio de radiocomunicaciones gracias a una antena. Si la potencia recibida es mayor que el nivel de sensibilidad del equipo receptor, se considera que tiene servicio y, por lo tanto, a dicha distancia hay cobertura. Las características de cobertura dependen de diversos aspectos como la potencia transmitida, la sensibilidad de equipos, la topografía del terreno, los obstáculos y los parámetros de propagación descritos en la siguiente sección.



## Interferencia y coexistencia

**1. Interferencia.** La CITEL, en el documento 3807 de lineamientos para el establecimiento de acuerdos para el uso del espectro en zonas de coordinación, describe la interferencia perjudicial como cualquier emisión que genere una degradación en la calidad o la interrupción de un servicio de comunicaciones debido a un exceso en la máxima densidad de flujo de potencia, a la máxima intensidad de campo o a que supere el umbral permitido.

Se definen, entonces, tres tipos de interferencia: i) Adyacente Fuera de Banda (AFB), en la cual no existe solapamiento en frecuencia, pero las bandas se encuentran lo suficientemente cerca para generar interferencia. ii) Adyacente en Banda (AEB), en la cual la frecuencia central de las dos es diferente y se caracteriza por que el hombro de una de las señales se encuentra fuera de la otra señal. iii) Cocanal (CoCa), en la cual las dos señales se encuentran en el mismo canal espectral y una de las dos no sobrepasa espectralmente a la otra. En la **Figura 40** se describen estos tres tipos de interferencia.

Por otro lado, para los sistemas de televisión digital, por ejemplo, se define el *Interference Threshold* como la máxima potencia de interferencia permitida. La **Ecuación 48** presenta esta relación, en la que se define a SNR como el valor en el cual la relación de señal a ruido de un sistema no interferido es de 15.19 dB (Canada, 2015).

$$Interference_{Threshold} = 15 + 10 \log \left( \frac{1}{1 - 10^{-SNR/10}} \right)$$

**Ecuación 48.**

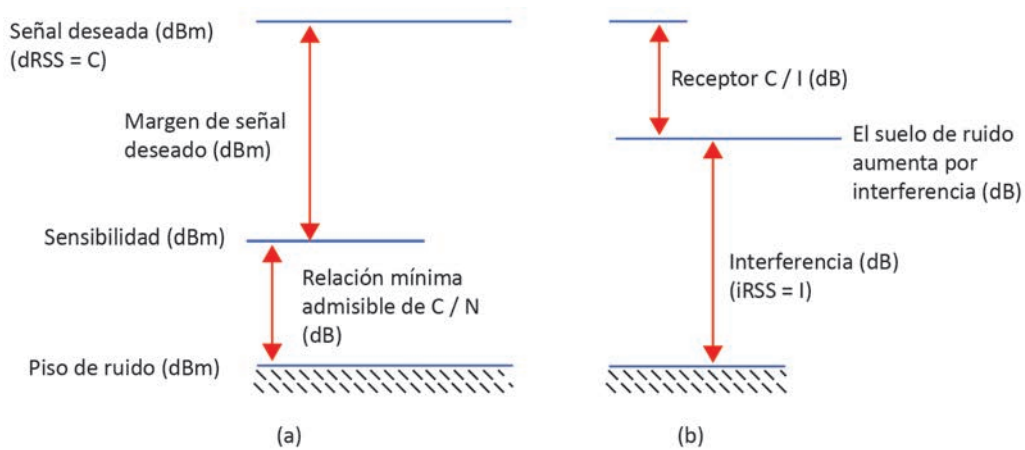
**2. Signal-to-interference ratio (C/I) y potencia radiada (PR).** La C/I es la relación entre la potencia deseada de una canal respecto al total de potencia de las señales interferentes más el ruido, evaluadas en un receptor. La potencia de la señal deseada es medida en una banda igual al ancho de banda de la señal deseada, mientras que la potencia de la señal interferente es medida en el ancho de banda de la señal interferente. La relación de protección (PR) es el mínimo valor de C/I requerido para obtener una recepción con una calidad específica, bajo unas condiciones específicas, y puede ser relacionado por una tabla o por una curva, dependiendo del sistema que se opere (UIT-R, 2012).

**3. ACLR, ACS y ACIR.** La relación de fugas de canal adyacente (*Adjacent Channel Leakage Ratio*, ACLR) es la relación de la potencia media de la señal filtrada en la banda de frecuencia asignada, sobre la potencia media del canal adyacente. Por su parte, la selectividad de canal adyacente (*Adjacent Channel Selectivity*, ACS) es el índice que relaciona



la capacidad de un receptor para recibir la energía de su canal y rechazar la del canal adyacente. Y, finalmente, la tasa de interferencia del canal adyacente (*Adjacent Channel Interference Ratio*, ACIR) es la relación entre la potencia total transmitida de una fuente y la potencia total de la señal interferente.

4. **Probabilidad de interferencia.** Se evalúa desde la sensibilidad del receptor, el piso de ruido y la relación de portadora a interferencia C/I. La probabilidad calcula un evento interferente, que se da cuando la C/I es menor que el valor mínimo permitido. La **Figura 137A** presenta un sistema sin interferencia y su relación con la sensibilidad, mientras que la **Figura 137B** muestra un sistema interferido y la probabilidad de un evento interferente cuando se supera el valor mínimo de C/I.



**Figura 137.** Nivel de señal que se usa para determinar probabilidad de interferencia.

5. **Potencia interferente.** Para los sistemas de televisión fronterizos, según el reporte de la UIT BT2339 (UIT, 2014), se define un nivel de potencia interferente de un transmisor interferente sobre un receptor interferido, como se ve en la **Ecuación 49**, donde  $E_{dB\mu V/m}$  es la intensidad de campo que dispara la interferencia (típicamente  $23_{dB\mu V}$  para la banda de 582-718 MHz),  $G_{dBi}$  es la ganancia de antena isotrópica y  $A_d$  es la directividad de antena. Como resultado, el valor medio de potencia interferente es  $-101.9$  dBm, sin la discriminación de antena.

$$I_{dBm} = E_{dB\mu V/m} + G_{dBi} - A_d - 77.2 - 20\text{Log}(f_{MHz})$$

**Ecuación 49.**

Si se asume un valor de piso de ruido del orden de  $-98.2$  dBm, la relación de interferencia a ruido es de  $-2.8$  dB.

## Anexo 7. Estándar IEEE 1900.2 y 1900.5



### **Estándar IEEE 1900.2: “IEEE recommended practice for the analysis of in-band and adjacent band interference and coexistence between radio systems”**

Está dividido en seis partes; comienza por conceptos básicos tales como el análisis de interferencia y coexistencia, eventos de medición y dominios físicos y lógicos que se explicarán en este documento. Posteriormente, se explica la estructura del informe de análisis, el cual contempla los aspectos principales, que son la definición del escenario, los criterios de interferencia que se van a estudiar, la definición de variables, el modelamiento y el análisis, para luego llegar a una conclusión. Las secciones 3 a 6 muestran una explicación detallada de cada uno de los ejes principales del análisis previamente mencionado.

### **Conceptos claves**

**Análisis de interferencia y coexistencia.** Un análisis de interferencia empieza en el momento en que la energía de una fuente es introducida en un sistema de comunicaciones y se encarga de estudiar el efecto de esta energía desde la capa física hasta que el receptor la recibe. El análisis de coexistencia se inicia en el nivel del sistema y estudia la manera en la que un receptor comunica o puede trabajar correctamente, inclusive si existe interferencia introducida por el emisor; se estudian problemas de rendimiento y se hace un análisis de costo/beneficio de la coexistencia buscando soluciones para que el nivel de interferencia sea mínimo.

**Eventos de medición.** Definen las cantidades mínimas o aceptables de referencia para analizar la interferencia o coexistencia. Un evento es un conjunto de datos de muestreo, definidos dentro de un grupo de parámetros que se usan como referencia para caracterizar la existencia de una interferencia; tales parámetros pueden ser potencia, relación señal a ruido, entre otros. Dependiendo del caso, el evento puede centrarse en una variable o en más de una, así como en uno o varios dispositivos de manera simultánea. Dichas variables pueden ser tan simples o complejas como se quieran analizar.

**Evento de interferencia.** Pertenece a los eventos de medición y busca calcular el efecto en el rendimiento de un sistema de recepción generado por un sistema de emisión. El concepto es usado para cuantificar el nivel de interferencia existente (llamamos interferencia perjudicial a aquella que supera los niveles mínimos aceptables previamente establecidos). Dependiendo del servicio, es posible definir variables específicas para analizar la degradación de rendimiento, por ejemplo, bajas en la transmisión de los datos, bajas en la calidad de video o audio, entre otras.





**Estructuras de análisis de interferencia y coexistencia.** El análisis de interferencia y coexistencia considera los efectos de los sistemas de radio emisores sobre los sistemas receptores. Por ello, el marco de referencia que se adopta en este estándar es un sistema cascada, con pasos dependientes entre sí. En la **Figura 86** se describe el proceso analítico: a) la definición de escenario, b) establecer el criterio de referencia de interferencia y coexistencia para el sistema receptor, c) definición de variables para el modelo y d) la medición y el análisis de los resultados obtenidos. Este proceso es recomendado para seguir paso a paso en la elaboración del análisis; además, este orden aplica para realizar la documentación respectiva.

A continuación se describen en detalle los pasos para el análisis de la interferencia y los reportes necesarios.

**Paso 1. Definición del escenario.** La definición del escenario contempla la arquitectura, el despliegue y los sistemas de transmisión. Este escenario debe ser dimensionado de acuerdo con los parámetros y variables que se van a analizar durante el sistema, así como el posible efecto que quiera estudiarse en cada uno de los componentes del mismo.

**Paso 2. Establecimientos de los criterios de interferencia y coexistencia.** En este paso se deben definir y describir las características de interferencia, el nivel de impacto esperado, el evento de interferencia y el criterio de interferencia perjudicial, que para esta sección llamaremos "criterio de interferencia"; esta definición es clave debido a que el objetivo es brindar los criterios más precisos de acuerdo con el escenario con el fin de tener la información más realista posible. Teniendo en cuenta lo establecido se realizará el proceso de análisis y se categorizan cada uno de los posibles casos de interferencia y el nivel donde esta empieza a considerarse perjudicial.

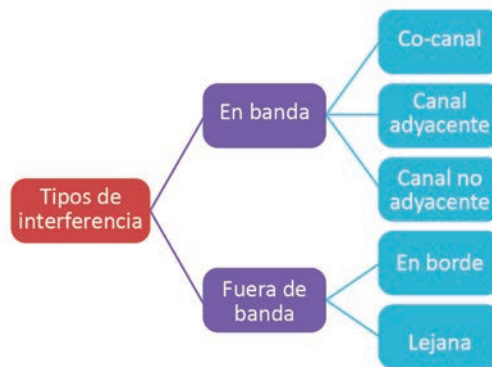
**Pase 3. Selección de variables y comportamientos relevantes.** En este paso se seleccionan todas las variables para analizar y los comportamientos que son relevantes para los escenarios elegidos, así como los criterios de interferencia establecidos en el paso 2. Estas variables serán usadas para el modelamiento, toma de datos y análisis, por lo que es importante definir las de acuerdo con la precisión de los criterios y que estos sean acordes a los ensayos o pruebas que se realicen en el escenario seleccionado. Los comportamientos pueden ser modelados con algoritmos que permitan evidenciar las reacciones e interacciones de los sistemas en cuanto a interferencia.

**Paso 4. Modelamiento, análisis, medición y pruebas.** En este paso se modelan, analizan, miden y prueban los efectos de los emisores, receptores y demás elementos contemplados en el escenario; dicho análisis se realizará de acuerdo con los criterios establecidos y se medirán las variables identificadas.



**Estructura de reporte.** El reporte se estructura como se muestra en la **Tabla 73** en este orden es más fácil realizar un análisis preciso y con los alcances claros.

Entre varias de las secciones del documento cabe destacar las definiciones de los diversos tipos de interferencia contemplados por el estándar; en la **Figura 138** se describen los tipos de interferencia: a) cocanal, b) de canal adyacente, c) en banda, canal no adyacente, d) en bordes de banda (dentro y fuera de la banda) y e) fuera de banda (considerablemente lejana).



**Figura 138.** Tipos de interferencia para el estándar IEEE 1900.2.

**Características de operación.** Hay un diverso número de categorías de la cooperación del espectro dentro del sistema. Los sistemas de cooperación se enmarcan en dos tipos: el primero es el no cooperativo, que no está diseñado para coordinar el uso del espectro; y el segundo es el cooperativo, en el cual estos sistemas pueden adaptarse en una dirección (*1-Sided Adaptation*) en presencia de otros o mutuamente; este tipo de adaptación del espectro puede darse de manera pasiva o activa. Estas categorías se muestran en la **Figura 139**.



**Figura 139.** Tipos de adaptación en sistemas cognitivos basados en IEEE 1900.2.

En el caso de la adaptación pasiva, no hay comunicación entre los sistemas, por ende, la adaptación se realiza con técnicas de detección de presencia de otros y la coordinación de la distribución de etiquetas de espectro. Para la adaptación activa, los sistemas tienen activada una comunicación entre ellos para gestionar el uso del espectro.



Es importante identificar que cuando múltiples sistemas comparten una misma asignación del espectro, estos pueden ser adaptativos o no adaptativos. En ese último caso, los sistemas pueden ser compartidos con otros tratando de diseñar o desarrollar técnicas para ser “usuarios primarios” junto a los sistemas independientes y adaptativos. El escenario del caso de uso puede incluir consideraciones de comportamiento con múltiples sistemas (adaptativos o no adaptativos) que coexisten; sin embargo, el análisis debe especificar el tipo de cooperación de sistema esperado (**Tabla 73**).

**Tabla 73.** Estructura del reporte de análisis de interferencia y coexistencia.

1. Guía de referencias rápidas
2. Material introductorio
3. Definición de escenario
3.1. Pregunta de estudio
3.2. Beneficios e impactos de la propuesta
3.3. Escenario y modelo de uso
3.3.1. Relaciones de frecuencia
3.3.2. Modelo de uso
3.3.3. Características del modelo de uso
3.3.3.1. Espacio y potencia
3.3.3.2. Temporal
3.3.3.3. Frecuencia
3.3.3.4. Otras variables ortogonales
3.3.4. Relaciones de sistemas
3.3.4.1. Consideración de sistemas
3.3.4.2. Equipos sin radio ni acoplamiento de antenas
3.3.4.3. Distancia de protección
3.3.4.4. Área de análisis geográfico
3.3.4.5. Impacto de interferencia
3.3.4.6. Mitigación de interferencia
3.3.4.7. Línea Base
3.3.5. Caso de análisis
4. Criterio de interferencia
4.1. Características de interferencia
4.1.1. Nivel de impacto
4.2. Evento de medición
4.3. Evento de interferencia
4.4. Criterio de interferencia dañina

Continúa en la próxima página



**Continuación de la Tabla 73.** Estructura del reporte de análisis de interferencia y coexistencia.

5. Variables
5.1. Análisis: modelamiento, simulación, medición y pruebas
5.1.1. Selección de enfoque del análisis
5.2. Matriz de reducción
5.3. Ejecución de análisis
5.4. Cuantificación de beneficios e interferencia
5.5. Opciones de análisis de mitigación
5.6. Incertidumbre del análisis
6. Conclusiones
6.1. Beneficios e impactos
6.2. Sumario

**Estándar IEEE 1900.5: “Policy language and Architectures for managing cognitive radio for dynamic spectrum access application”.** El estándar 1900.5 busca definir un lenguaje unificado para el manejo de radio cognitiva y acceso dinámico al espectro con el fin de que dispositivos de radiocomunicaciones puedan entablar comunicaciones coherentes sobre el uso eficiente del espectro y su posterior coordinación. En la **Figura 140** se muestra la arquitectura del estándar y las relaciones que hay entre los diferentes componentes que son descritos a continuación (IEEE, 2011):

**PMP (Policy Management Point).** Convierte políticas de información de alto nivel en información estándar para que puedan ser aplicadas a diversos dispositivos en la red. Otras funciones son el manejo de grupos de políticas, validación y chequeo de políticas y distribución de políticas.

**PR (Policy Repository) (opcional).** Mantiene una copia de la información guardada en el PMP.

**PCR (Policy Conformance Reasoner).** El PCR es el encargado de tomar la decisión de acceso dinámico basado en asunciones lógicas y en las políticas descritas por el PMP.

**PE (Policy Enforcer).** Es el punto donde las políticas deben ser ejecutadas, es decir, se debe asegurar que los dispositivos cumplan los requerimientos y decisiones tomadas por el PCR.

**SSRC (System Strategy Reasoning Capability).** La arquitectura define una entidad capaz de razonar las decisiones tomadas con base en las políticas, así como la configuración y reconfiguración de la red. En términos generales, es consciente del ambiente de radiofrecuencia de los dispositivos que tiene asociados y usa dicha información para generar estrategias de uso del espectro.



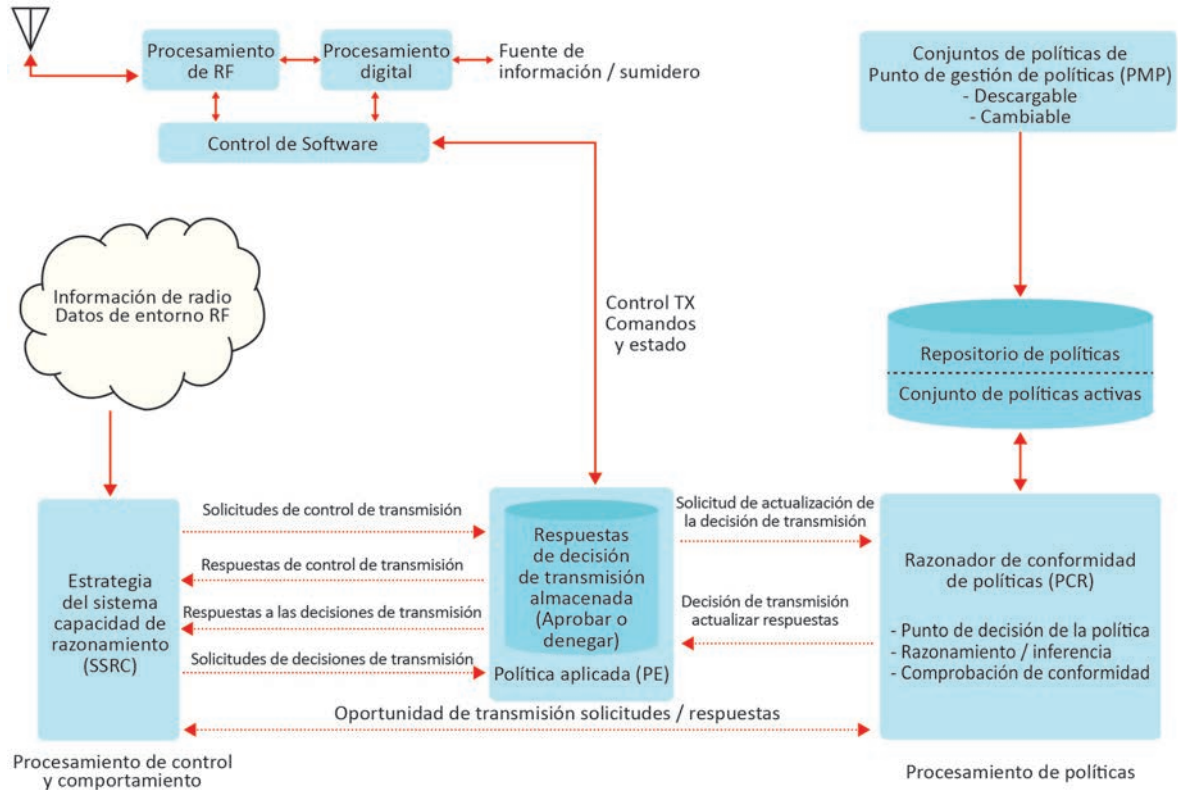


Figura 140. Arquitectura del estándar IEEE 1900.5 (IEEE, 2011).

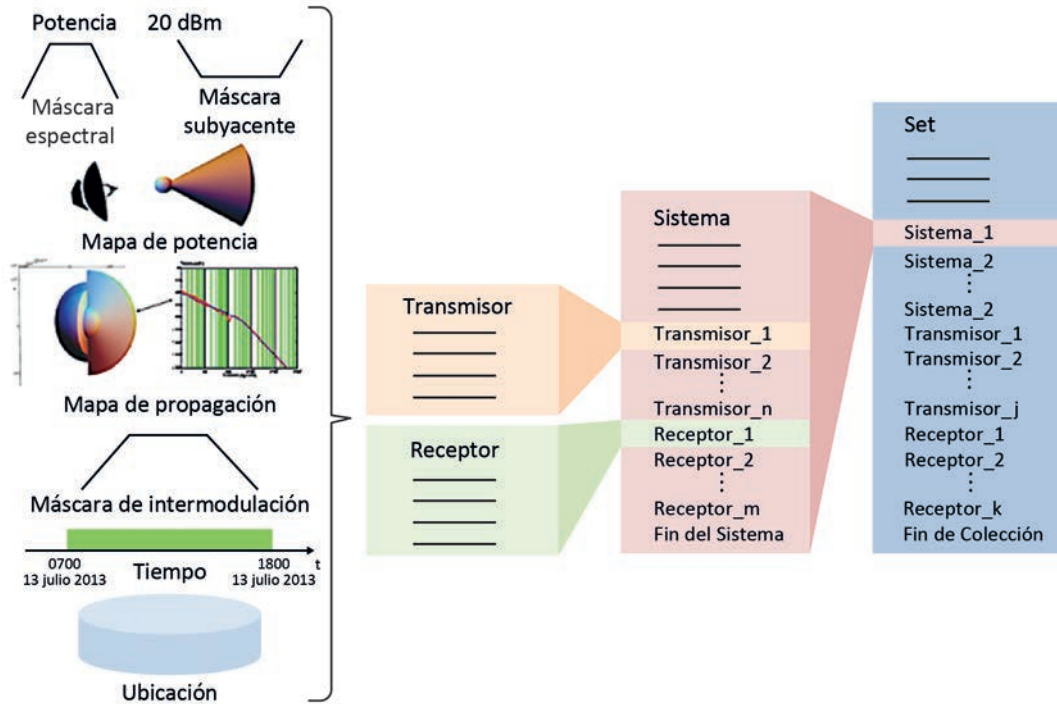
**Modelos de consumo de espectro (SCM).** Los modelos de consumo de espectro definen los límites en los que se pueden realizar transmisiones de radiofrecuencia. Estos modelos buscan responder algunas de las siguientes preguntas: ¿cómo los sistemas emiten radiación electromagnética?, ¿cuál es la interferencia de un transmisor sobre un receptor?, ¿cómo son las características de un sistema y cómo estas cambian en el tiempo y el espacio?, ¿cuáles son los comportamientos de un sistema que permiten compartir su espectro?

Los modelos de consumo de espectro están descritos en el IEEE 1900.5.2 y buscan definir las interacciones de las diversas entidades que usan el espectro (el ente regulatorio, los usuarios licenciados, los usuarios no licenciados, los usuarios comerciales y los "corredores de bolsa de espectro", entre otros).

Estos modelos buscan proveer medios para capturar los detalles más relevantes de los parámetros que afectan el consumo de espectro. También permiten realizar cálculos de compatibilidad de dos sistemas que deseen usar el mismo espectro sin depender de bases de datos externas y buscan asegurar que el resultado del modelo de compatibilidad sea lo más cercano posible al evento que se va a generar. Esto se logra mediante la recolección de parámetros como la potencia total, las máscaras espectrales, el mapa de potencia y de propagación, la ubicación, la directividad, la mínima densidad de flujo elec-



tromagnético, las políticas, entre otros. La **Figura 141** presenta una descripción de cómo se debería crear un modelo de consumo de espectro según el estándar IEEE 1900.5.2.



**Figura 141.** Construcción de un modelo de consumo de espectro. Fuente: (Mohan, 2016).

Las herramientas de *software* que usan SCM buscan entregar análisis de compatibilidad entre diversos sistemas o transmisores, con el fin de predecir si un sistema puede ingresar a una banda o frecuencia a realizar transmisiones y bajo qué parámetros estaría permitida dicha transmisión (Mohan, 2016).



Con la identificación de la banda de 614-698MHz para su uso futuro en los servicios de IMT en la Región 2 presentada, en el Congreso Mundial de Comunicaciones CRM 2015 de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT), por parte de Colombia y otros países latinoamericanos, surgió la necesidad de realizar diversos estudios respecto al uso armónico de esta banda al interior de los países y en sus fronteras. Dicha banda está actualmente atribuida a los servicios de televisión y la introducción de servicios LTE generará múltiples escenarios de interferencia entre dichos servicios. Con el fin de mitigar estos problemas, los investigadores de la Escuela Colombiana de Ingeniería, apoyados por expertos de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia desarrollaron un proyecto de investigación con el objetivo de determinar los requerimientos técnicos, administrativos y regulatorios de la convivencia de las tecnologías de Televisión Digital Terrestre (TDT) y servicios móviles LTE en ambientes transfronterizos, tomando como base el caso Colombia-Brasil.

Como resultado, este libro presenta un modelo metodológico donde se introducen los procedimientos que deberían llevar a cabo los países que comparten frontera, para la implementación de acuerdos binacionales que garanticen la coexistencia de los servicios mencionados. Adicionalmente, la investigación permitió la formulación de un modelo de propagación ajustado para las zonas fronterizas de Colombia en la región amazónica, el cual contempla las implicaciones de las selvas tropicales frente a la cobertura en los servicios de las bandas de UHF y VHF.



**UNIREMINGTON®**  
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA REMINGTON  
RES. 2661 MEN JUNIO 21 DE 1996

