



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

**PLANIFICACIÓN DE UNA RED EN FRECUENCIA ÚNICA
DE PRUEBA PARA EL SISTEMA DE RADIO DIGITAL DRM+
EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA - TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

MARIO ALBERTO HERNÁNDEZ FLORES

TUTOR:

Dr. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI



MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2012.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Martynyuk Oleksandr
Secretario: Dr. Gómez Castellanos Javier
Vocal: Dr. Matías Maruri José María
1er. Suplente: Dr. Tinoco Magaña Julio César
2do. Suplente: Dr. Martínez López José Ismael

Lugar donde se realizó la tesis:

México, D.F., Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS

Dr. José María Matías Maruri

FIRMA

A todos los que aún están buscando su lugar.

Agradecimientos

Muchas gracias a Mariana y a José María, este trabajo también es suyo.

Quiero agradecer a mi asesor de tesis, el Dr. José María Matías, porque confió en mí y me dio la oportunidad de trabajar bajo su asesoría. Le agradezco porque siempre estuvo presente para aclarar mis dudas sobre el tema y porque nunca retiró su confianza y paciencia ante todas las veces que fallé a lo largo de los dos años de trabajo. Pero especialmente, muchas gracias porque me mostró la importancia que el planteamiento de los objetivos y la programación de las tareas tienen en el trabajo de investigación.

También quiero agradecer a mi compañera, Mariana, porque desde el principio hasta el final siempre estuvo muy cerca del trabajo de esta tesis. Gracias por todo tu apoyo y por tus ánimos, que trajeron luz en los momentos más oscuros y reavivaron mis esperanzas. Pero sobre todo, gracias por todo tu amor y comprensión a pesar de todas mis faltas; y por compartir la vida a mi lado en este camino de dos años.

Gracias a mis padres por todo lo que a lo largo de mi vida me han regalado incondicionalmente, empezando por la vida misma. Gracias por su amor, por su apoyo y por su ejemplo. Sin ustedes no hubiera llegado hasta este punto.

Gracias a Erika y a Raúl por compartir la vida conmigo y por estar siempre allí.

Gracias a Víctor, Gerardo, José, Daniel y Edgar por mostrarme que la vida en la facultad no siempre está dentro del aula. Gracias por todos los buenos y malos ratos.

Gracias a Enrique y a Alfredo por su amistad en estos dos años de la maestría.

Muchas gracias a la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM por los dos años de apoyo económico que me otorgó para que pudiera desarrollar esta tesis.

Gracias a mis sinodales el Dr. José María Matías, Dr. Javier Gómez, Dr. Oleksandr Martynyuk, Dr. Julio César Tinoco y Dr. José Ismael Martínez por el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo y porque sus observaciones contribuyeron a su terminación.

Gracias al Dr. Víctor García porque semestre a semestre ha extendido su confianza en mi trabajo y porque me dio la oportunidad de dar mis primeros pasos en la docencia.

Gracias a todos los profesores que en la licenciatura y en la maestría ayudaron a mi formación no sólo académica, sino también personal y profesional. Especialmente quiero agradecer a la Mtra. Ana García y Colomé y al M.I. Luis César Vázquez porque siempre estuvieron dispuestos a escucharme y a orientarme con sus valiosos consejos.

Y gracias a todos los mexicanos que, de forma anónima e involuntaria, han aportado los recursos económicos para sostener toda mi formación académica. Gracias UNAM.

Resumen

Desde hace varios años ha existido el interés de digitalizar la transmisión de los servicios de radiodifusión. Se han desarrollado varios estándares de radiodifusión digital terrestre, entre ellos, el sistema Digital Radio Mondiale (DRM).

DRM es un sistema de radio digital terrestre que está aceptado por la UIT para operar en todas las bandas de radiodifusión por debajo de 30 MHz. En 2005, el Consorcio DRM extendió el ámbito de DRM a la VHF a través de la definición de un nuevo modo de operación del estándar, que, por tanto, incluye la banda II de VHF mejor conocida como banda de FM. Esta ampliación es conocida como DRM+. Las pruebas de campo de DRM+, que principalmente han evaluado su cobertura y su compatibilidad con FM y DAB, han probado la viabilidad de su uso en todas las bandas de radiodifusión de VHF hasta 230 MHz.

DRM está diseñado para poder operar en redes SFN (Single Frequency Network). Una SFN es una red de dos o más transmisores que transmiten simultáneamente la misma señal en la misma frecuencia, lo que permite una gran mejora en la eficiencia espectral. En 2011 se demostró la viabilidad de operar DRM+ en una SFN de dos transmisores. La forma tradicional de aumentar la cobertura de una estación es usando redes MFN (Multi Frequency Network), que consiste en varias estaciones transmisoras transmitiendo la misma señal en distintas frecuencias. Se ha probado que una SFN usando la misma potencia que una MFN mejora la calidad de recepción y las características de la señal que se recibe. Dicha mejora se denomina Ganancia de Red de la SFN.

El objetivo de esta tesis es planificar una campaña de pruebas de campo que permita hacer un estudio profundo y científico de la Ganancia de Red de una SFN operando con DRM+ en la banda II de VHF. El alcance y contenido de la planificación incluyen la metodología de cálculo y análisis de la Ganancia de Red, la estimación de los requerimientos de cobertura y potencia de la red de transmisión y la metodología para la medición en campo.

Como resultado de esta tesis se proponen dos métodos para calcular la Ganancia de Red. Con un método la Ganancia de Red se calcula como el incremento de cobertura que se obtendría con la SFN en comparación con la MFN. Con otro método, la Ganancia de Red se calcula como la diferencia entre la calidad de audio, que se obtendría con la SFN y con la MFN, en todas las localizaciones al interior del área de medición; y se analiza en función de la intensidad de campo eléctrico y del retardo de recepción de la señal de cada transmisor de la red. También, se determinó la potencia de transmisión que se requeriría para hacer las pruebas usando específicamente tres sitios de transmisión de FM que están ubicados en la Ciudad de México. Y por último, se establecen las condiciones de transmisión y recepción bajo las cuales se deberían realizar las medidas.

Abstract

For several years there has been interest in digitizing the transmission of broadcasting services. Several terrestrial digital broadcasting standards have been developed, including the Digital Radio Mondiale (DRM) system.

DRM is a terrestrial digital sound broadcasting system that is accepted by the ITU for operating in all broadcasting bands below 30 MHz. In 2005, the DRM Consortium extended the scope of DRM to the VHF through of the definition of a new standard operation mode, which therefore includes the VHF band II better known as FM band. This extension is known as DRM+. The field tests of DRM+, which have mainly evaluated its coverage and its compatibility with FM and DAB, have proven the feasibility of its use in all VHF broadcasting bands below 230 MHz.

DRM is designed to be able to operate in SFNs (Single Frequency Networks). A SFN is a network of two or more transmitters that broadcast the same signal simultaneously on the same frequency, allowing a great improvement in spectral efficiency. In 2011, the feasibility of operating DRM+ in a SFN of two transmitters was proved. The traditional way of increasing the coverage of a station is using MFN (Multi Frequency Network), consisting of several transmitting stations broadcasting the same signal at different frequencies. It has been proven that a SFN using the same power as a MFN improves reception quality and characteristics of signal received. This improvement is called Network Gain of the SFN.

The objective of this thesis is planning a campaign of field tests will allow to make an exhaustive and scientific study of the Network Gain of a SFN operating for DRM+ in the VHF Band II. The scope and content of the planning include the methodology of calculation and analysis of the Network Gain, the estimate of coverage and power requirements of the transmission network and the methodology for field measurement.

As a result of this thesis two methods for to calculating Network Gain are proposed. With one method the Network Gain is calculated as the increase in coverage that would be obtained with the SFN in comparison with the MFN. With another method, the Network Gain is calculated as the difference between the audio quality that would be obtained with the SFN and with the MFN in all locations within the measurement area; and it is analyzed as a function of electric field strength and reception delay of the signal of each transmitter in the network. Also, the transmission power that would be needed to make the field trials using three specific FM transmitters that are in Mexico City was obtained. And finally, the transmission and reception conditions under which measurements should be made are established.

Índice General

Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	VIII
Lista de Abreviaturas.....	IX
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes: Redes en Frecuencia Única y Radio Digital Terrestre	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Metodología	4
Capítulo 2. Estado del Arte	5
2.1 Sistemas de Radio Digital Terrestre Basados en OFDM.....	5
2.2 DRM+	6
2.2.1 Características Técnicas de DRM+	7
2.2.2 Pruebas de Campo de DRM+.....	8
2.3 Redes en Frecuencia Única.....	9
2.3.1 Modulación COFDM.....	10
2.3.2 Principios Básicos de las Redes en Frecuencia Única	10
2.3.3 Pruebas de Campo hechas con Redes en Frecuencia Única	13
Capítulo 3. Definición de los Objetivos de la Campaña de Pruebas	16
3.1 Condiciones de Cobertura Requeridas para la Realización de las Mediciones.....	16
3.2 Estudio de la Ganancia de Red.....	18
3.2.1 Método para Calcular la Ganancia de Red como una Medida del Incremento de la Cobertura	19
3.2.2 Método para Calcular la Ganancia de Red como una Medida de la Mejora en la Calidad de Recepción.....	21
3.3 Objetivos del Estudio de DRM+ en la Red en Frecuencia Única.....	24
3.4 Resumen de la Definición de los Objetivos de la Campaña de Pruebas	25
Capítulo 4. Requerimientos de Cobertura y de Potencia de la Red de Transmisión para las Pruebas	28
4.1 Umbral de Campo Eléctrico.....	28
4.2 Predicción de Campo Eléctrico.....	29
4.3 Escenarios Posibles para la Red en Frecuencia Única de Prueba en la Ciudad de México.....	31

4.4 Determinación de la Cobertura de la Red de Transmisión	35
4.5 Resumen de los Requerimientos de Cobertura y de Potencia de la Red de Transmisión para las Pruebas.	42
Capítulo 5. Definición de la Metodología para la Medición en Campo	45
5.1 Descripción General de la Metodología para la Medición en Campo	45
5.2 Planificación de las Medidas	47
5.2.1 Definición de las Zonas de Medida y su Relación con los Escenarios de Transmisión....	47
5.2.2 Distribución de las Medidas dentro del Área de Cobertura	50
5.2.3 Condiciones de Cobertura Esperadas en las Medidas Planificadas	54
5.2.4 Cronología de la Medidas	57
5.3 Parámetros de Medida.....	59
5.4 Resumen de la Definición de la Metodología para la Medición en Campo.....	61
Capítulo 6. Conclusiones	64
Referencias	67

Índice de Figuras

FIGURA 2.1	Diagrama de bloques conceptual de transmisión de DRM.....	7
FIGURA 2.2	Relación entre el retardo de multitrayecto y el intervalo de guarda	11
FIGURA 2.3	Ganancia de Red de una simulación de una red SFN con DTV ...	12
FIGURA 3.1	Cobertura teórica e ideal de la red de transmisión propuesta en la planificación	18
FIGURA 3.2	Variación de la cobertura de la red SFN en función de la potencia de transmisión y los modos de transmisión 4-QAM y 16-QAM	24
FIGURA 4.1	Sitios de transmisión de FM en operación en la Ciudad de México	32
FIGURA 4.2	Predicción de campo eléctrico sobre dos direcciones radiales usando, respectivamente, los sitios de transmisión UAM-C y UAM-A en la Ciudad de México	33
FIGURA 4.3	Sitios de transmisión candidatos a formar el escenario de red que se usó en la planificación	34
FIGURA 4.4	Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_1	38
FIGURA 4.5	Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_2	38
FIGURA 4.6	Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_3	39
FIGURA 4.7	Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_4	40
FIGURA 4.8	Área de cobertura para hacer las mediciones con los modos 4-QAM y 16-QAM	41
FIGURA 5.1	Zonas objetivo para medir la señal de DRM+ en recepción móvil dentro del área de medición de la campaña.....	48
FIGURA 5.2	Ubicación de las medidas estáticas y móviles definidas dentro del área de medición.....	51
FIGURA 5.3	Predicción de campo eléctrico sobre la Ruta 1 en los escenarios de transmisión TX_1, TX_2 y TX_3	55
FIGURA 5.4	Predicción de campo eléctrico sobre la Ruta 8 en los escenarios de transmisión TX_1, TX_2 y TX_3	56

Índice de Tablas

TABLA 2.1	Nivel de robustez vs Capacidad de Transmisión en los dos modos de transmisión de DRM+	8
TABLA 2.2	Parámetros OFDM para DRM+	8
TABLA 4.1	Umbral de campo eléctrico para los dos modos de transmisión de DRM+	28
TABLA 4.2	Valores de los parámetros empleados para la predicción de campo eléctrico	30
TABLA 4.3	Escenarios de red SFN candidatos para hacer la planificación de las pruebas	35
TABLA 4.4	Valores de PIRE usados en la predicción de cobertura con los escenarios de red candidatos para la planificación	37
TABLA 4.5	PIRE para los tres sitios de transmisión que se usaron en la planificación de la campaña de pruebas.....	40
TABLA 4.6	Distancia entre los tres transmisores que se usaron en la planificación de la campaña y la PIRE que se estimó para cada uno de ellos.....	44
TABLA 5.1	Descripción de los cuatro escenarios de transmisión para medir la recepción de la señal de DRM+	46
TABLA 5.2	Descripción de las rutas definidas para las medidas móviles.....	52
TABLA 5.3	Resumen de las características de las medidas estáticas definidas para la campaña	52
TABLA 5.4	Estimación del tiempo requerido para llevar a cabo la campaña de pruebas	59

Lista de Abreviaturas

AAC	Advanced Audio Coding
AM	Amplitud Modulada
AQ	Audio Quality
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
BBC	British Broadcasting Corporation
BER	Bit Error Rate
BST-OFDM	Band Segmented Transmission-OFDM
CD	Compact Disc
CINR	Carrier to Interference plus Noise Ratio
C/N	Carrier to Noise Ratio
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
Cofetel	Comisión Federal de Telecomunicaciones
DAB	Digital Audio Broadcasting
DRM	Digital Radio Mondiale
DTV	Digital Terrestrial Television
DVB-H	Digital Video Broadcasting-Handheld
DVB-SH	Digital Video Broadcasting to Satellite Handheld
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
EBU	European Broadcasting Union
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FAC	Fast Access Channel
FM	Frecuencia Modulada
GPS	Global Positioning System
IBOC	In-Band On-Channel
ISDB-TSB	Integrated Service Digital Broadcasting-Terrestrial Sound Broadcasting
ISI	Inter Symbol Interference
ITS	Institute for Telecommunication Sciences
LOS	Line of Sight
MER	Modulation Error Rate
MFN	Multi Frequency Network
MSC	Main Service Channel
NRSC	National Radio Systems Committee
NTIA	National Telecommunications and Information Administration
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RF	Radio Frequency
RSCI	Receiver Status and Control Interface
SDC	Service Description Channel
SFN	Single Frequency Network
SNR	Signal to Noise Ratio
UHF	Ultra High Frequency
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Sector Radiocomunicaciones, Unión Internacional de Telecomunicaciones
VHF	Very High Frequency

CAPÍTULO 1

Introducción

En este primer capítulo se introduce esta tesis. Primero, se resume el marco conceptual en el cual se considera la tesis; después, se exponen las razones que sustentan su realización y los objetivos que se persiguen con ella; y finalmente, se explica la metodología que se adoptó para la elaboración de la tesis.

1.1 Antecedentes: Redes en Frecuencia Única y Radio Digital Terrestre

La radiodifusión en AM y en FM desde sus inicios han tenido una amplia penetración en la población, puesto que la estación transmisora alcanza extensas áreas donde el radioescucha sólo necesita un receptor de relativamente bajo costo para tener acceso al servicio. Sin embargo, debido a que estos sistemas, bajo ciertas condiciones, presentan pobre calidad de audio y deficiencias en recepción móvil, es natural que en la actualidad se esté trabajando en la digitalización de la transmisión de los servicios de radiodifusión sonora terrestre.

En 1992, la UIT publicó en la recomendación UIT-R BS.774 [1], los requisitos técnicos que debe tener todo sistema de radio digital terrestre para receptores fijos, portátiles y móviles en VHF y UHF. En 1998, en la recomendación UIT-R BS.1348 [2], la UIT extendió los requisitos para frecuencias por debajo de 30 MHz.

Hasta 2011, se han desarrollado cuatro sistemas de radio digital terrestre: Eureka-147 o DAB, DRM, ISDB-T_{SB} e IBOC o HD Radio. Todos ellos ya fueron aceptados por la UIT en las recomendaciones UIT-R BS.1114 [3] y/o UIT-R BS.1514 [4], como Sistema digital A, sistema DRM, Sistema digital F y Sistema digital C, respectivamente. DAB, que surgió hace dos décadas, y DRM son proyectos europeos; HD Radio se desarrolló en Estados Unidos; e ISDBT-T_{SB} se creó en Japón. Estos sistemas ya se adoptaron y operan en algunos países, no obstante, las pruebas de campo continúan en diferentes países buscando su introducción a nuevos mercados.

A este respecto, el 16 de Junio de 2011, la Cofetel publicó el acuerdo por el que México adopta IBOC como su estándar de radio digital terrestre para las bandas

de AM y FM, y se estableció la política para que los radiodifusores lleven a cabo la transición digital voluntariamente¹.

Son varias las ventajas que la radio digital tiene sobre la radio analógica: una mayor calidad de audio, la transmisión de texto e imágenes, una mayor cobertura con menor potencia de transmisión, alta confiabilidad en recepción móvil y portátil, y la capacidad de funcionar en Redes en Frecuencia Única. Las señales de radio digital pueden transmitirse simultáneamente con las señales analógicas, lo que resulta en una transición gradual de tecnologías. Además, algunos estándares son abiertos lo que propicia un rápido desarrollo del estándar y la fabricación de receptores de bajo costo.

DRM+ surgió en Marzo de 2005 tras la decisión del Consorcio DRM, que es el grupo de trabajo que promueve el estándar, de extender el ámbito de DRM a frecuencias superiores a los 30 MHz a través de la definición de un nuevo modo de operación dentro del estándar: el modo E. A esta ampliación se la conoce como DRM+.

En 2007, iniciaron las pruebas de laboratorio y de campo con DRM+ y hoy en día está en proceso su inclusión en la recomendación UIT-R BS.1114 [3]. Los objetivos principales de las pruebas de campo han sido evaluar la cobertura de DRM+ y su compatibilidad con FM y DAB, ya que estos sistemas operan en las mismas bandas. Los resultados aseguran un buen funcionamiento de DRM+ en todas las bandas de radiodifusión en VHF hasta los 230 MHz. Pero, hasta el 2011 sólo se ha hecho una prueba de campo con una Red en Frecuencia Única.

La radio analógica se opera en Redes en Frecuencia Múltiple, en las que dos áreas de servicio deben recibir en canales de frecuencia separados para evitar producir ecos que los receptores no puedan combatir. En cambio, los sistemas digitales por su diseño, tienen la capacidad de trabajar en ambientes de alto nivel de multitrayecto y esto hace posible la instalación de Redes en Frecuencia Única.

Una Red en Frecuencia Única está compuesta por dos o más estaciones transmisoras que transmiten simultáneamente la misma señal en el mismo canal de frecuencia. Estas redes ofrecen varias ventajas, empezando porque emplean solo un canal de frecuencia, lo que, por motivos de gestión del espectro radioeléctrico es muy conveniente.

Las Redes en Frecuencia Única también tienen una mayor eficiencia de potencia que las Redes en Frecuencia Múltiple, pues, empleando la misma potencia de transmisión logran una mayor cobertura. Desde el surgimiento de DAB se han hecho pruebas de campo con Redes en Frecuencia Única, principalmente, para cuantificar la ganancia que éstas tienen sobre las Redes en Frecuencia Múltiple, y para estudiar el desempeño de la recepción dentro de las mismas.

¹ Diario Oficial de la Federación, 16 de Junio de 2011. Versión electrónica www.dof.gob.mx.

En el mundo ya existen Redes en Frecuencia Única instaladas que brindan servicios de radiodifusión, como son los casos de radio digital con DAB en Canadá y el Reino Unido [5], o de televisión digital con el estándar DVB-T en Alemania [6] y España [7]. Pero, otros sistemas de radio digital, como DRM+ y HD Radio, apenas se están probando en campo con Redes en Frecuencia Única.

1.2 Justificación

Los resultados de las investigaciones que se han hecho con Redes en Frecuencia Única revelan que, en general, estas redes tienen un desempeño más eficiente que las Redes en Frecuencia Múltiple, lo que las hace un modelo prometedor. Pero, debido a las características propias del funcionamiento de estas redes, no se ha llegado a un consenso sobre la cuantificación de esta mejoría, que se denomina *Ganancia de Red*. Por ello, es necesario desarrollar más estudios para obtener información útil para la planificación de Redes en Frecuencia Única con sistemas de radiodifusión digital.

En este sentido, en Marzo de 2011 se demostró que DRM+ puede funcionar muy bien en una Red en Frecuencia Única de dos transmisores. Hasta ahora, esta es la única prueba de campo que se ha hecho con una Red en Frecuencia Única con DRM+ y tal vez por esta razón su alcance fue solo de viabilidad y no se hizo un estudio con mayor profundidad.

Por lo anterior, el objeto de esta tesis es planificar una campaña de pruebas de campo cuyo objetivo principal sea cuantificar y analizar la Ganancia de Red que tendría una Red en Frecuencia Única trabajando con el estándar DRM+ en la banda II de VHF (comúnmente conocida como banda de FM).

1.3 Objetivos

El trabajo desarrollado en esta tesis consiste en planificar una campaña de pruebas de campo con una Red en Frecuencia Única con el estándar DRM+ en la banda de FM, cuyos objetivos es estudiar la Ganancia de Red y otros aspectos del desempeño de la Red en Frecuencia Única. Sin embargo, esta tarea de planificación involucra fines más específicos, por esto, se establece que:

El objetivo general de la tesis es proponer una metodología de medición para estudiar en campo el rendimiento de una Red en Frecuencia Única trabajando con DRM+. Mientras que, los objetivos particulares de la tesis son:

- ◆ Proponer un método para el cálculo y análisis de la Ganancia de Red y fijar las condiciones que deben considerarse para su evaluación en campo.
- ◆ Determinar la relación entre la potencia de transmisión y el área de cobertura de la red de transmisión requerida para realizar la campaña de pruebas.

- ◆ Determinar las condiciones topográficas y de emplazamientos de transmisión propicias para realizar pruebas de campo con una Red en Frecuencia Única en la Ciudad de México.
- ◆ Proponer una metodología para medir en campo la Ganancia de Red.
- ◆ Proponer una metodología de medición en campo para estudiar algunos aspectos del desempeño de DRM+ en una Red en Frecuencia Única, entre ellos, el nivel de campo eléctrico y la variabilidad de la señal en la recepción.

1.4 Metodología

El primer paso de la planificación fue precisar los objetivos de la campaña de pruebas de campo. El objetivo principal de esta campaña de pruebas es estudiar la Ganancia de Red, pero también estudiar algunos parámetros del desempeño de DRM+ en una Red en Frecuencia Única. Este paso se realizó después de revisar los resultados de algunas de las pruebas hechas con Redes en Frecuencia Única y los parámetros de planificación que se tienen de DRM+.

La siguiente tarea fue establecer las características de la red de transmisión destinada para las pruebas. Con el propósito de hacer una planificación con bases realistas, se evaluaron las condiciones de cobertura de los sitios de transmisión de FM la Ciudad de México. Para esto, se hicieron predicciones de campo eléctrico con el software libre Radio Mobile ver.11.05 y se plantearon las características de cobertura que se buscan para la realización de las medidas. Entonces, mediante la evaluación de diferentes escenarios de sitios transmisores se obtuvo la solución a las necesidades de condiciones de medida, y en consecuencia, se determinaron los requerimientos de potencia para la campaña.

Finalmente, se definió la metodología para la medición en campo de la campaña de pruebas. Se establecieron las condiciones de transmisión y recepción en las que se va a medir la señal de DRM+ para cumplir con los objetivos que se definieron para la campaña. Se ubicaron las zonas específicas sobre el área de medición para llevar a cabo la recepción estática y móvil de la señal. Asimismo, se hizo una estimación del tiempo total requerido para la realización de la campaña y se establecieron qué parámetros de medida que se registrarían y los equipos de medición que serían necesarios para este fin.

Además de este capítulo, el trabajo escrito de la tesis comprende otros cinco.

En el segundo capítulo se resume el Estado del Arte de DRM+ y de las Redes en Frecuencia Única. Los capítulos del tres al cinco tratan acerca de los objetivos de la campaña de pruebas, de los requerimientos de cobertura y potencia de la red de transmisión y de la metodología de medición en campo, respectivamente. Y por último, el capítulo seis recoge las principales conclusiones derivadas de esta tesis.

CAPÍTULO 2

Estado del Arte

En este capítulo se resume el estado del arte de DRM+ y de las Redes en Frecuencia Única. El capítulo comienza describiendo muy brevemente los sistemas de Radio Digital Terrestre; continúa presentando las características de DRM+ y los resultados más importantes de sus pruebas de campo; y por último, explica los principios básicos de las Redes en Frecuencia Única y los resultados y conclusiones más relevantes de las pruebas de campo que se han hecho con estas redes.

En adelante, en este documento al término Red en Frecuencia Única se le denominará SFN, por su nombre en inglés Single Frequency Network.

2.1 Sistemas de Radio Digital Terrestre Basados en OFDM

Hasta el 2011, se han desarrollado cuatro sistemas de Radio Digital Terrestre: Digital Audio Broadcasting (DAB), Digital Radio Mondiale (DRM), Integrated Service Digital Broadcasting Terrestrial for Sound Broadcasting (ISDB-T_{SB}) e In-Band On-Channel (IBOC). En el diseño de los cuatro estándares, la modulación de la señal está basada en OFDM y esto permite que sean operados en redes SFN (Ver la sección 2.3.1).

En 1988, surgió en Europa el proyecto para crear el primer sistema de radio digital terrestre: *Eureka-147*, que después sería nombrado DAB (ETSI ETS 300 401 [8], UIT-R BS.1114 [3], UIT-R BO.1130 [9]). DAB puede trabajar en todas las frecuencias de VHF y UHF y el ancho de banda de su señal es de 1.536 MHz. El estándar provee 4 modos de transmisión cuyos parámetros definen la frecuencia de trabajo y la distancia de los transmisores de la red SFN [8].

El sistema DRM (ETSI ES 201 980 [10], UIT-R BS.1514 [4]) fue desarrollado a partir de 1998 por el Consorcio DRM. DRM define 9 o 10 KHz como ancho de banda para su señal. Pero, puede emplear también el doble, es decir, 18 o 20 KHz, para transmitir servicios de audio de mayor calidad; o la mitad, o sea, 4.5 o 5 KHz, para el modo *simulcast*, es decir, una transmisión simultánea con la señal analógica. El estándar DRM especifica cuatro modos de robustez, con diferentes parámetros COFDM [10].

ISDB es el nombre que se da a la familia de estándares de radiodifusión digital desarrollada en Japón, cuyo sistema de radio digital es el ISDB-T_{SB} (STD-B29², UIT-R BS.1114 [3]), cuyas especificaciones fueron definidas en 1998. El estándar utiliza un método de modulación llamado Band Segmented Transmission – OFDM (BST-OFDM), que divide la señal en segmentos. Se pueden hacer transmisiones de uno o tres segmentos. El estándar define anchos de banda de canal de 6, 7 u 8 MHz y un segmento ocupa un catorceavo del ancho de banda del canal [11].

El sistema IBOC, comercialmente denominado *HD Radio* (NRSC-5-B [12], UIT-R BS.1514 [4], UIT-R BS.1114 [3]), fue diseñado en 2001 en los Estados Unidos por la compañía iBiquity Digital Corporation. HD Radio puede transmitirse simultáneamente con la señal analógica, en el llamado modo híbrido, cuyo ancho de banda total en AM es de 30 KHz y en FM de 400 KHz. También puede sustituir totalmente a la transmisión analógica, operando en el modo llamado totalmente digital, con un ancho de banda de 20 KHz en AM y de 400 KHz en FM ([13], [14]).

Desde sus inicios DAB se comenzó a probar en redes SFN. DRM también ha sido probado en estas redes. En Noviembre de 2010 se publicaron los resultados interinos de la primera prueba de campo con HD Radio en una red SFN. Y DRM+ fue probado por primera y única vez en una red SFN en Abril de 2011.

2.2 DRM+

El Consorcio DRM, fundado en 1998, es una organización internacional integrada por radiodifusores, proveedores de red, fabricantes de equipo, universidades, uniones de radiodifusión e institutos de investigación, que tiene por objetivo apoyar y promover el desarrollo de DRM.

En 1999, DRM comenzó a probarse en campo y en 2003 fue estandarizado por la ETSI. DRM es el único estándar aceptado por la UIT para operar en todas las bandas de radiodifusión por debajo de 30 MHz y el único para onda corta.

En 2005 el consorcio decidió extender las capacidades de DRM a la banda de VHF, y así, se definió un modo OFDM más dentro del estándar, el modo E, también conocido como DRM+. En el estándar de la ETSI [10] se especifica que DRM+ puede operar hasta los 174 MHz, sin embargo, las pruebas en campo han demostrado su funcionamiento para todas las bandas de radiodifusión de VHF hasta los 230 MHz [15]. Hoy en día existe la petición, respaldada por el trabajo en campo, por parte del Consorcio DRM para agregar a DRM+, como el Sistema Digital G, en la recomendación UIT-R BS.1114 [3].

² Hasta 2011, en la página web del ARIB: www.arib.or.jp sólo existe la versión en japonés.

2.2.1 Características Técnicas de DRM+

DRM+ provee una calidad de audio comparable a la de CD. Además, puede transmitir datos asociados al programa de audio, mensajes de texto, imágenes y servicios de información, por ejemplo, tráfico, noticias o clima. También proporciona una guía electrónica de programación para difundir la calendarización de los programas. Transmite hasta 4 servicios de audio y/o de datos, en un canal de 100 KHz y con una tasa de bits de hasta 185 Kbits/s.

El diagrama de bloques conceptual de la figura 2.1 sintetiza la arquitectura de DRM+.

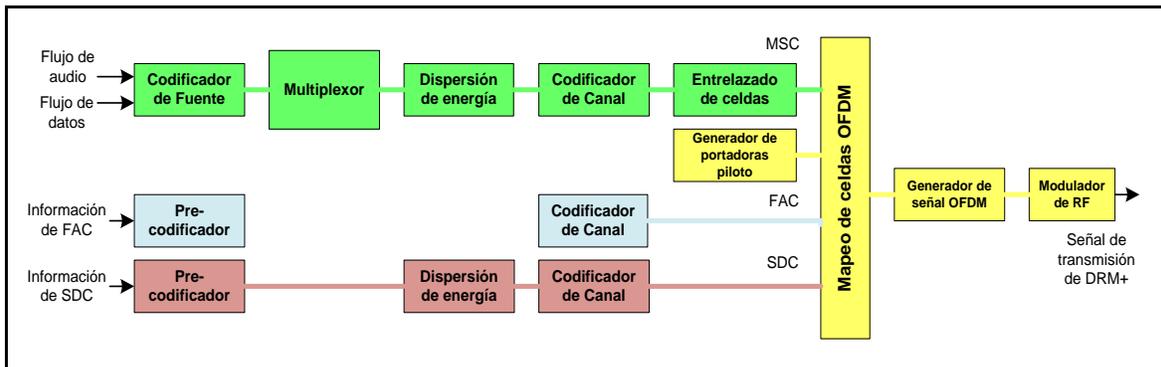


FIGURA 2.1. Diagrama de bloques conceptual de transmisión de DRM.

DRM+ emplea el codificador Advanced Audio Codec (AAC). Todos los datos son transportados en un multiplex que comprende tres canales: el Main Service Channel (MSC), Fast Access Channel (FAC) y el Service Description Channel (SDC). El MSC transporta los servicios de audio y datos; el FAC contiene los parámetros de canal requeridos para la demodulación del multiplex y la información de los servicios contenidos en éste; y en el SDC va la información que se necesita para decodificar el MSC y algunos atributos específicos de los servicios del multiplex.

Para la codificación de canal y la modulación de la señal, DRM+ emplea COFDM, cuyas subportadoras se modulan en 4-QAM y 16-QAM, con diferentes tasas de codificación, lo que resulta en un equilibrio entre capacidad y robustez de la señal. Esta relación está en la tabla 2.1. Para contrarrestar las deficiencias del canal de radio móvil, DRM+ aplica un entrelazado en tiempo y frecuencia a las celdas QAM [16].

Los parámetros de OFDM especificados para DRM+ determinan en buena medida las capacidades de transmisión del sistema, pero también definen las características de diseño de la red SFN. La tabla 2.2 lista los valores de los parámetros de OFDM de DRM+.

TABLA 2.1. Nivel de robustez vs capacidad de transmisión en los dos modos de transmisión de DRM+.

Nivel de Protección	Modulación de MSC: 4-QAM		Modulación de MSC: 16-QAM	
	Tasa del Código (R)	Tasa de Bits [Kbits/s]	Tasa del Código (R)	Tasa de Bits [Kbits/s]
0	0.25	37.3	0.33	99.5
1	0.33	49.8	0.41	122.6
2	0.4	59.7	0.5	149.3
3	0.5	74.6	0.62	186.6

TABLA 2.2. Parámetros OFDM para DRM+.

Parámetro	Valor
Ancho de banda de la señal	96 KHz
Número de subportadoras K	213
Espacio entre las subportadoras $1/T_u$	444 4/9 Hz
Duración de la trama de transmisión T_f	100 ms
Número de símbolos por trama de transmisión N_s	40
Duración del símbolo $T_s=T_u+T_g$	2.5 ms
Duración útil del símbolo T_u	2.25 ms
Duración del intervalo de guarda T_g	250 μ s

2.2.2 Pruebas de Campo de DRM+

En este apartado se exponen los resultados más importantes de las principales pruebas de campo que se han realizado hasta ahora con DRM+. Este estándar se ha probado ampliamente en la banda II de VHF (87.5-108 MHz), porque existe la tendencia global de digitalizar FM, pero en Europa también se han realizado pruebas en la banda I (47-68 MHz) y en la banda III (174-230 MHz).

La primera transmisión de prueba con DRM+ se dio en Noviembre de 2007 en Hanover, Alemania, operando a 18 W en 95.2 MHz. Sólo se midió en recepción fija y se evaluaron subjetivamente los canales adyacentes de FM, concluyendo que DRM+ no causó interferencias perceptibles sobre éstos [17].

En 2008 y en 2009, la Universidad de Ciencias Aplicadas de Kaiserslautern hizo pruebas en la banda II, en el sur de Alemania. Un resultado fue que para conseguir la compatibilidad entre DRM+ y FM en el mismo canal, la señal de DRM+ debió estar 5 dB por debajo que la de FM, y en el canal adyacente (± 100 KHz) debió estar de 5 a 15 dB abajo. Para una separación igual o mayor a 200 KHz la incompatibilidad ya no fue un problema [18]. Además, DRM+ tuvo un potencial de cobertura mayor que FM, porque en recepción fija la potencia para recibir una calidad de audio de FM apenas tolerable fue por lo menos 20 dB mayor a la potencia con la que se recibió un BER máximo de 10^{-4} en DRM+ [19].

En 2009, se hizo una transmisión de exhibición en París en la banda I. Se transmitió con 400 W y se recibió en un punto fijo a 10 km de distancia, y con esto, DRM+ probó ser una opción para estaciones que no pueden integrarse a un multiplex de DAB [20]. En 2010, se hizo una transmisión similar en Colombo, Sri Lanka. En ésta, se transmitió con 47 W y se recibió en 4 rutas radiales que atravesaron zonas urbanas y rurales. El alcance fue de 5 a 9 km y se recibió correctamente con un campo eléctrico igual o superior a 35 dB μ V/m [21].

En 2010, el Instituto de Tecnología en Comunicaciones de la Universidad de Hanover realizó paralelamente pruebas en la banda II y en la banda III. En la banda II, se transmitió con 30 W en los modos 4-QAM y 16-QAM; y se concluyó que con 4-QAM se recibió bien con un campo eléctrico mínimo de 30 dB μ V/m y una SNR calculada de 10 dB hasta 30 km de distancia. Con 16-QAM, la recepción fue posible con 46 dB μ V/m y una SNR aproximada de 18 dB a un alcance de 15 km [22]. Por otro lado, en la banda III con 30 W y con 4-QAM se recibió bien hasta 30 km con un campo eléctrico mínimo de 35 dB μ V/m y una SNR calculada de 12 dB, sin embargo, con la misma potencia con 16-QAM el alcance fue de 15 km y se recibió bien con 48 dB μ V/m y una SNR de 12 dB [23].

También en 2010, la Universidad de Kaiserslautern hizo pruebas en la banda III. Los resultados mostraron que DRM+ y DAB son compatibles para operar en esta banda. Asimismo, la recepción móvil de DRM+, en comparación con DAB y DAB+, fue aceptable pudiéndose recibir a velocidades de hasta 230 km/h [24].

A inicios de 2011 Radio María realizó pruebas en el Norte de Italia en la banda I. Con 40 W en el modo 4-QAM el área de cobertura alcanzó un radio de 28 km con excelente recepción en el 90% de la trayectoria medida. Todas las deficiencias en la cobertura se debieron a los túneles y cruceros subterráneos. El umbral de MER estuvo entre 10 y 13 dB [25]. En este mismo periodo se hicieron pruebas de alta potencia en Edimburgo, Escocia. Los resultados confirmaron que el modo 4-QAM es más robusto que el modo 16-QAM porque tuvo mayor área de cobertura. DRM+ probó que es capaz de proveer una excelente cobertura con una buena calidad usando niveles de potencia reducidos en comparación con FM [26].

En Mayo de 2011 se realizaron pruebas en New Delhi, India. Se emplearon los modos 4-QAM y 16-QAM transmitiendo con 500 W y se recibió en 4 rutas radiales. Nuevamente, DRM+ se demostró que DRM+ es capaz de proveer una buena cobertura con menor potencia en comparación con FM [27].

2.3 Redes en Frecuencia Única

En una red de radiodifusión los transmisores que sirven a áreas adyacentes operan en diferentes canales de frecuencia para no producir ecos que los receptores analógicos no puedan combatir. Esta es una regla básica de operación de una Red de Frecuencia Múltiple, o MFN, por el término inglés Multi Frequency

Network. Sin embargo, paralelamente al surgimiento de la radio digital también nació la idea de operación de un nuevo modelo de red: Red en Frecuencia Única.

Una red SFN está compuesta por dos o más transmisores que emiten la misma señal simultáneamente en la misma frecuencia. La principal atracción de una red SFN es que es más eficiente en el uso del espectro y de la potencia de transmisión que una red MFN.

Antes de abordar los principios que definen a una red SFN se explica en qué consiste COFDM, característica de diseño que permite que DRM+, entre otros estándares digitales, puedan operar en una red SFN.

2.3.1 Modulación COFDM

Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM), es un método de modulación que hace uso de un gran número de subportadoras, hasta miles, para la transmisión de la información. Su diseño fue pensado para contrarrestar los efectos provocados por el multitrayecto, como son los desvanecimientos selectivos en frecuencia y la interferencia intersímbolo (ISI), que causan problemas de recepción en las transmisiones de portadora única.

En COFDM el flujo de datos es codificado para su protección contra errores y después se divide en subflujos que modulan digitalmente a las subportadoras, cuya información es constante a lo largo de un símbolo COFDM de duración Δt . Las subportadoras no se interfieren entre sí ya que son ortogonales. Para cumplir con esta condición las subportadoras están separadas Δf , que equivale al inverso de Δt , de tal forma que los puntos nulos del espectro de una subportadora coincidan con la frecuencia de las subportadoras adyacentes.

Para prevenir la ISI se añade un intervalo de guarda, t_g , al final de cada símbolo. Así, todas las señales que debidas al multitrayecto lleguen al receptor en un tiempo menor a t_g , contribuyen constructivamente a la señal original transmitida y en caso contrario causarán interferencia. Entonces, el intervalo de guarda debe ser mayor al máximo retardo de eco estimado. En la figura 2.2 la señal retardada 1 contribuirá positivamente a la señal original, mientras que la señal retardada 2, causará ISI porque su retardo de recepción, respecto de la señal original, es mayor al intervalo de guarda.

2.3.2 Principios Básicos de las Redes en Frecuencia Única

La capacidad de una señal COFDM para superar la interferencia debida al multitrayecto permite que se pueda distribuir el mismo programa de radio a través de varios transmisores usando el mismo canal de frecuencia. De esta forma, en una red SFN la señal que llega al receptor es el resultado de la superposición de las señales provenientes de todos los transmisores de la red, además del multitrayecto provocado por el entorno.

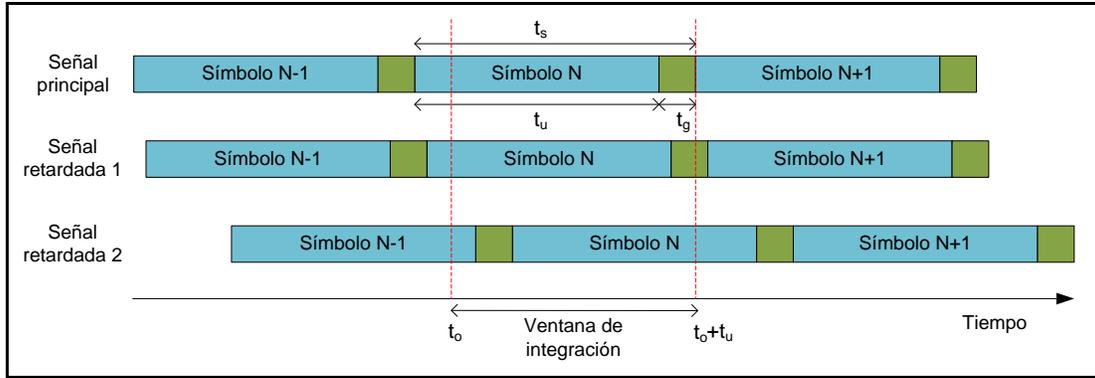


FIGURA 2.2. Relación entre el retardo de multitrayecto y el intervalo de guarda.

En una red SFN las múltiples señales arriban al receptor con diferentes retardos porque los transmisores están ubicados a diferentes distancias del receptor. El receptor sólo puede hacer un uso positivo de las señales que arriben con una diferencia de retardo menor al intervalo de guarda, de lo contrario, las señales causarían lo que se conoce como auto-interferencia en una red SFN. Para evitar este efecto negativo debe haber una separación máxima entre cualquier par de transmisores de una red SFN, la cual está dada por:

$$d_{\max}[\text{Km}] = c [\text{Km/s}] \cdot t_g[\text{s}] \quad (1)$$

Donde:

- c Es la velocidad de la luz en el vacío
- t_g Es el intervalo de guarda

Según la tabla 2.2, el t_g en DRM+ tiene un valor de 250 μs . Considerando un valor de 3×10^8 m/s para c , la separación entre los transmisores de una red SFN operando con DRM+ debe ser menor a 75 km para evitar la autointerferencia [15].

Con el objetivo de cuantificar la mejoría que una red SFN tiene sobre una red MFN se define un parámetro que suele denominarse *Ganancia de Red* que, debido a la operación propia de la red SFN, involucra un efecto aditivo y otro estadístico. El efecto aditivo se debe a que ante la existencia de más de una señal útil sus intensidades han de sumarse ([28],[29]). El efecto estadístico se debe a que los transmisores están en diferentes ubicaciones, por lo tanto, sus señales están poco correlacionadas y la probabilidad de que tengan desvanecimientos simultáneos es muy baja. Como resultado, la señal resultante varía espacialmente menos que la señal de cualquiera de los transmisores, y con esto, se consigue una mayor probabilidad de recepción.

Como un ejemplo de este parámetro, la figura 2.3 tiene los resultados de la simulación de una red SFN de tres transmisores con el estándar DTV [28]. La suma de las tres señales incrementó en 5 dB la intensidad de campo eléctrico recibida, en comparación con la intensidad de campo de cualquiera de las señales

para cualquier probabilidad de cobertura. En tanto que con la suma estadística este incremento resultó creciente en función de la probabilidad de cobertura. En este estudio dicho incremento en el campo eléctrico fue la Ganancia de Red. Por ejemplo, para un 99% de cobertura se obtuvo una Ganancia de Red de 16 dB.

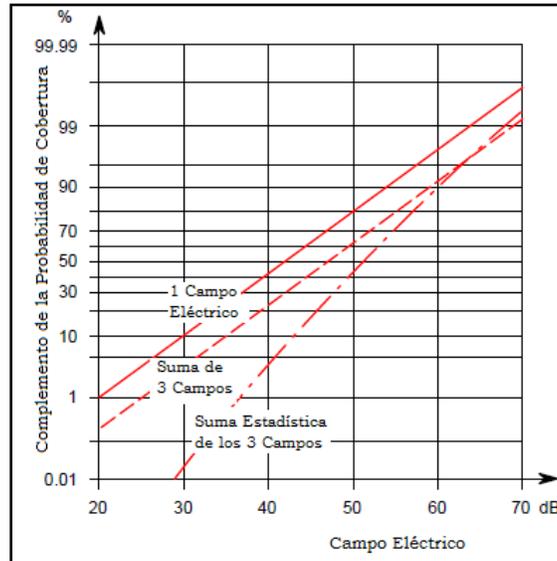


FIGURA 2.3. Ganancia de Red de una simulación de una red SFN con DTV [28].

Como resultado del comportamiento de las señales en una red SFN, la cobertura de ésta es mayor a la suma de las coberturas individuales de sus transmisores [5]. O visto de otro modo, una red SFN puede operar con menor potencia y la distribución de campo eléctrico sobre el área total de servicio será más homogénea comparada con la de una red MFN [30]. Sin embargo, la Ganancia de Red varía para diferentes puntos de recepción, dependiendo de la relación de la intensidad de las señales recibidas desde los transmisores de la red SFN [29].

Por otra parte, la eficiencia espectral de una red SFN es muy importante por razones de la regulación del espectro radioeléctrico. Ante problemas de cobertura, en una red SFN, basta con instalar un transmisor adicional, respetando la condición del tiempo de guarda, sin necesidad de asignarle un nuevo canal de frecuencia. Además, la distribución de un programa de radio en un área muy amplia, como sería por ejemplo un país, en una red SFN requeriría solamente de un canal de frecuencia.

Entre los inconvenientes de las redes SFN están:

- ◆ No es posible dividir el área de servicio en áreas locales porque una condición para la operación de la red SFN es la transmisión de información idéntica.
- ◆ Los transmisores requieren una alta precisión en frecuencia, pues los errores pueden causar pérdidas de ortogonalidad entre las subportadoras de COFDM o reducir la tolerancia de la señal al efecto Doppler.

- ♦ Los transmisores necesitan una alta sincronización de tiempo, pues los errores pueden reducir el intervalo de guarda, y en consecuencia, afectar el desempeño de la red SFN.

Finalmente, es importante apuntar que aunque las señales deben transmitirse al mismo tiempo, bajo ciertas circunstancias, retardar artificialmente una de las transmisiones es benéfico, por ejemplo, en el límite del área de cobertura donde puede emplearse un repetidor de baja potencia para extender la cobertura. Por lo tanto, este retardo esta es otra variable en el diseño de una red SFN.

2.3.3 Pruebas de Campo hechas con Redes en Frecuencia Única

En este apartado se describen las principales pruebas de campo realizadas hasta ahora con redes SFN, abordando los resultados más relevantes relacionados con la Ganancia de Red y la recepción en la red SFN.

En 1993 y 1994 en Alemania se probó DAB en una red de 5 transmisores, separados entre 45 y 80 km, transmitiendo con 1 KW. En comparación con un sólo transmisor, con la red SFN se redujeron los errores en la recepción porque se tuvo un incremento en la intensidad de la señal y una reducción, entre 1 y 2 dB, en su variabilidad [31].

En 1994, la BBC probó DAB en una red SFN en Londres. Con 2 transmisores, separados entre 20 y 30 km y operando a 1 KW, la intensidad de campo superada en el 99% de las ubicaciones fue mayor por 6 dB, en comparación con un transmisor [32]. En otras pruebas, usando 2 transmisores a 10 W se obtuvo un nivel de señal promedio mayor, entre 3 dB y 10 dB, y una desviación estándar menor, entre 1 dB y 2.5 dB, que con uno de los dos transmisores. Además, con un transmisor el BER tuvo valores superiores a 10^{-3} y con los 2 transmisores disminuyó hasta 10^{-5} [33].

En Berlín se probaron 3 transmisores ubicados en forma triangular, separados unos 30 km, sin emplear un estándar de radiodifusión en particular. La Ganancia de Red, que se definió como la diferencia entre el valor de campo eléctrico que fue superado un cierto porcentaje de mediciones con la red SFN y con un solo transmisor, tuvo un máximo de 6 dB cuando las 3 estaciones aportaron en igual intensidad a la recepción, o sea, en el centro del triángulo [34].

En 2002, en El Reino Unido se probó DRM en 26 MHz con 3 estaciones operando a 10 W y separadas 10 Km. Hubo áreas que fueron pobremente servidas con un solo transmisor, pero que fueron bien servidas cuando se operaron 2 transmisores. Para lograr esto se agregó un retardo entre ambas transmisiones para pasar de un desvanecimiento plano a un desvanecimiento selectivo en frecuencia [35].

En 2005, la Deutsche Welle probó DRM en onda corta con una transmisión con 30 KW desde Rusia y otra desde Portugal a 90 KW, cuyas señales se recibieron en Alemania. Con los 2 transmisores activos el campo eléctrico recibido subió entre 10 y 15 dB, mientras que, el MER subió entre 8 y 10 dB, en comparación con la transmisión única desde Rusia. Se vio que a mayor diferencia entre el tiempo de llegada de las señales se midió un MER menor, y cuando la diferencia sobrepasó el tiempo de guarda, el MER se fue a cero y se presentaron errores de audio [36].

Alrededor de 2003 en Madrid se estudió la relación BER vs C/N en recepción portátil en un entorno urbano en el área cubierta por una red SFN de 3 transmisores que opera con DVB-T [7]. Se concluyó que la ganancia de red contribuyó a la potencia total recibida, pero al mismo tiempo incrementó el C/N mínimo requerido para alcanzar un valor de BER máximo. Esto se debió al efecto de los ecos de la SFN, en especial si la diferencia entre la potencia de éstos fue menor a 15 dB [37].

En el País Vasco, España, se probaron 2 transmisores con DVB-H y se vio que cuando la potencia de recepción de ambas señales fue igual, ante la aparición de la segunda señal, el campo eléctrico aumentó 3 dB y el MER disminuyó 7 dB. Sin embargo, cuando la diferencia entre la potencia de las 2 señales fue en aumento, el MER también se incrementó, pero el BER disminuyó de forma exponencial [38].

En 2008, en Francia se ejecutó una campaña por más de un año para investigar la Ganancia de Red con el estándar DVB-SH. Con una red SFN de 2 transmisores se recibió un mayor nivel de señal, que con cualquiera de éstos por separado, y esto llevó a que se tuviera una disminución en el valor de C/N. Además, la calidad de recepción con la red SFN fue buena, cuando la calidad de cada transmisor fue pobre y similar; y fue excelente, cuando ambas fuentes por separado dieron una buena calidad [39].

Cerca de 2007, en Bélgica se realizó una campaña para calcular la Ganancia de Red de una red SFN con DVB-H compuesta por 3 estaciones que estuvieron separadas 2 km y que operaron en promedio a 38 dBW. La Ganancia de Red se definió como el aumento del valor de campo recibido con la red SFN comparado con el valor recibido con sólo una estación. En las cercanías del conjunto de estaciones se calculó una ganancia de 2.26 dB, en tanto que en una zona alejada, su valor fue de 2.39 dB [40]. Después, se hizo un segundo análisis para calcular la Ganancia de Red de la misma forma pero tomando en cuenta los valores de CINR (Carrier to Interference-plus-Noise Ratio) y se obtuvo un valor de sólo 0.3 dB. Entonces, se concluyó que una red SFN no sólo aumenta el nivel de señal útil, sino que también aumenta la interferencia debido a la recepción de varias señales [41].

Más tarde, se hizo otro estudio con los datos obtenidos en esa misma campaña. Esta vez, la Ganancia de Red se definió como el MER medido con la red SFN

menos el MER medido con un solo transmisor, y se estudió como función de la diferencia de intensidad de la señal de las tres estaciones. La diferencia entre la intensidad de campo de las señales en las zonas muy alejadas de los 3 transmisores y en las zonas intermedias entre 2 de ellos fue menor a 3 dB, mientras que, en las cercanías de cada transmisor fue superior a 9 dB. En general, la Ganancia de Red, que resultó entre 0 y 5 dB, fue positiva cuando la diferencia de intensidad fue menor a 9 dB; y fue negativa cuando esta diferencia fue mayor a 9 dB. Por otro lado, en las cercanías de cada transmisor se obtuvo una buena calidad de recepción cuando se transmitió su señal respectiva, y con la red SFN la calidad no se vio disminuida; sin embargo, en el resto del área de medición la red SFN sí mejoró la calidad. Se concluyó que la Ganancia de Red depende de la posición relativa del receptor a los transmisores [42].

En 2010, iBiquity Digital Corporation construyó 2 estaciones en Baltimore para probar HD-Radio en una red SFN. En los resultados interinos [43] sólo se presenta la evaluación de la recepción en la zona de traslape de la cobertura de ambas estaciones, concluyendo que se recibió bien cuando las señales llegaron alineadas en tiempo.

Por otra parte, DRM+ se probó en una red SFN como tal, por primera vez en la primavera de 2011 en Hanover, Alemania. Se utilizaron 2 transmisores, separados a 9.2 Km que operaron a 2 W por separado y a 1 W en la red SFN. Con la red SFN se recibió en un diámetro aproximado de 20 Km y se extendió el área que fue cubierta por un solo transmisor. Por otro lado, una de las dos señales se retardó 31 μ s para conseguir un desvanecimiento selectivo en frecuencia en el área de traslape de ambas coberturas. En esta área de traslape, con la red SFN aumentó el nivel de campo eléctrico, y se redujeron la desviación estándar y la tasa de errores. Estos efectos se intensificaron cuando se agregó el retardo de transmisión. Por lo tanto, se concluyó que es recomendable retardar una transmisión para combatir el desvanecimiento plano, que podría disminuir el desempeño, y se demostró la viabilidad de trabajar DRM+ en redes SFN para extender el rango de cobertura y servir a áreas con señal comprometida [44].

Resumiendo, de la descripción de todas estas pruebas con redes SFN puede concluirse que la Ganancia de Red se calculó evaluando diferentes parámetros, todos ellos relacionados entre sí, y comparándolos tanto para la red SFN como para la operación de un solo transmisor. Entre estos parámetros están el nivel de señal, la variabilidad de la señal, la extensión del área de cobertura y la tasa de errores de recepción. Dependiendo del parámetro de evaluación que se haya seleccionado la Ganancia de Red resultó entre 2 y 10 dB.

CAPÍTULO 3

Definición de los Objetivos de la Campaña de Pruebas

A partir de este punto se expone el trabajo de planificación de la campaña de pruebas de campo. En este capítulo se definen y fundamentan los objetivos que se persiguen con la realización de las pruebas. Es importante mencionar que estos objetivos determinaron, en buena medida, los requerimientos de la red de transmisión, la cual se expone en el capítulo 4; y sentaron las bases para definir la metodología para la medición en campo, la cual se aborda en el capítulo 5.

El propósito principal del trabajo de campo es estudiar la Ganancia de Red real de una red SFN operando con el estándar DRM+, es decir, calcular la mejora de una red SFN con respecto a una red MFN transmitiendo con DRM+. Para ello, se propone una metodología para calcular la Ganancia de Red y se establecen las condiciones de recepción en las que debe aplicarse dicha metodología. Asimismo, las mediciones de la campaña que se propone abrirán la posibilidad para estudiar aspectos del desempeño de DRM+ en una red SFN.

3.1 Condiciones de Cobertura Requeridas para la Realización de las Mediciones

Para tener una mayor claridad en la explicación de los objetivos, conviene primero presentar las condiciones de cobertura que se requieren en el área de medición para llevar a cabo esta campaña de pruebas.

Se propone que la red de transmisión para la campaña esté compuesta por tres transmisores. Un condicionante importante para la realización de cualquier campaña de pruebas es el requerimiento de recursos económicos, entonces, si la planificación se hace con un número reducido de transmisores es más factible que la campaña se realice. No obstante, la razón técnica es que tres sitios es el número mínimo, pero suficiente, para estudiar la Ganancia de Red en un ambiente de radiodifusión realista.

Esto se sustenta en que en el área de cobertura de una red SFN un receptor se ve beneficiado de un número n de señales, sin embargo, en la práctica n es sólo el

número de señales cuyo nivel no es despreciable en la recepción. Entonces, por cuestiones de la relación entre el área objetivo y la ubicación de los sitios, sin importar la densidad de sitios de la red, en la mayoría de situaciones reales n tendrá un valor máximo de cuatro, al interior del área, y de uno o dos en los límites de cobertura. Esto se demuestra en [45], donde se hizo una planificación de cobertura con una red SFN de 11 transmisores con DRM+, con base en potencias y frecuencias reales para las estaciones en la banda II de VHF en un estado de Alemania. Este estudio dejó ver que la mayor parte del interior del área cubierta estaría servida por tres o cuatro de las estaciones, mientras que, en sus márgenes sólo servirían una o dos de ellas.

En la planificación se consideró que la cobertura de cada transmisor de la red de prueba se extenderá hasta los puntos donde se reciba cierto valor de intensidad de campo eléctrico. En los documentos de planificación de radiodifusión dicho valor de campo se denota como E_{med} . Este parámetro es el mínimo valor de campo eléctrico necesario para permitir una calidad de recepción deseada, bajo condiciones específicas de recepción, en presencia del ruido natural y hecho por el hombre, pero en ausencia de interferencia desde otros transmisores [46]. Es decir, E_{med} es el umbral de campo eléctrico para tener una buena recepción de la señal de DRM+.

Con base en lo anterior, la figura 3.1 muestra la cobertura de la red de tres transmisores de prueba trabajando en modo de red MFN y en modo de red SFN. La cobertura de cada red representa un caso ideal y teórico, porque los sitios de transmisión están separados la misma distancia y porque haciendo uso de una antena omnidireccional los tres tienen un radio de cobertura idéntico. No obstante, aunque en la realidad este caso sea imposible de conseguir, es útil para hacer notar las condiciones de cobertura que son importantes en el estudio de la Ganancia de Red.

En este caso, en la red MFN el área total de cobertura es la suma del área de cobertura de cada transmisor. En un principio esto también es válido en la red SFN. Sin embargo, dado que en ésta los transmisores operan en la misma frecuencia y transmiten al mismo tiempo, la superposición de las señales sí cobra importancia, porque ésta puede hacer que la cobertura mejore en toda esta área y además conseguir extender el área de cobertura.

En la red MFN los desvanecimientos de la única señal útil que se recibe pueden llevar a que algunas ubicaciones, dentro del área que se supone cubierta, tengan una baja calidad de recepción. Pero, en la red SFN, la recepción de una o dos señales útiles más puede compensar dichos desvanecimientos en estas ubicaciones y también aumentar el valor mediano de campo, con lo que probablemente se elevaría la calidad de recepción, y por lo tanto, en conjunto se mejoraría la cobertura dentro de toda el área. En la figura 3.1 el color azul indica la mayor parte de la zona que presentaría estas características.

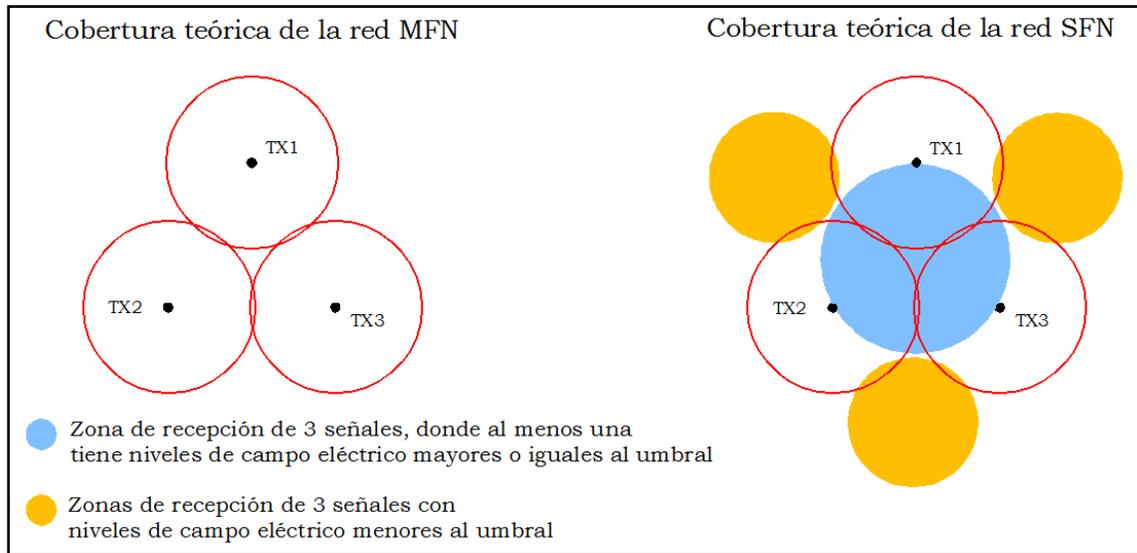


FIGURA 3.1. Cobertura teórica e ideal de la red de transmisión propuesta en la planificación.

La red SFN puede no sólo mejorar la recepción en porcentaje de tiempo y ubicaciones, sino también ampliar el área de cobertura que se tiene con la red MFN. Esto se debe a que la recepción de dos o tres señales en ubicaciones que estén fuera del área de cobertura de los transmisores puede resultar en una calidad de recepción satisfactoria. El color anaranjado sitúa estas zonas en el área de medición con la red SFN.

Sin haber definido aún la Ganancia de Red, es evidente, que si se quiere hacer un estudio comparativo entre una red SFN y una red MFN en las pruebas deben considerarse estas zonas. Por lo tanto, en la planificación se procuró la existencia de estas características de cobertura y la metodología de medición está dirigida a evaluar la recepción en estas zonas, tanto en la red MFN, como en la red SFN.

3.2 Estudio de la Ganancia de Red

El objetivo principal de la campaña es estudiar la Ganancia de Red de la red SFN. En síntesis, en esta planificación la Ganancia de Red se concibe como el parámetro que va a cuantificar la mejoría que la red SFN conseguiría respecto del desempeño de la red MFN, por lo tanto, su cálculo se basa en comparar la recepción con cada una de estas redes.

El propósito de cuantificar esta Ganancia de Red es demostrar la ventaja de trabajar con redes SFN, y además, generar resultados que sean útiles en la planificación de redes SFN con DRM+.

3.2.1 Método para Calcular la Ganancia de Red como una Medida del Incremento de la Cobertura

En esta planificación la Ganancia de Red es la medida del efecto que producirá la recepción de más de una señal útil sobre la calidad de recepción en una transmisión de DRM+. Para medir este efecto se va a contrastar la calidad de recepción que se obtendrá con la transmisión de una señal (Red MFN) con la calidad que se obtendrá con la transmisión de dos o más señales (Red SFN).

Con base en las características de operación de la red SFN se prevé que el beneficio real de esta red sea una mejora de la calidad de recepción que se obtenga con la red MFN. Entonces, en este estudio se propone un primer método para calcular la Ganancia de Red como la diferencia entre la cobertura de la red SFN y la cobertura de la red MFN.

Un parámetro que se ha empleado recurrentemente en pruebas con DRM ([47], [48]) y con DRM+ ([22],[26]) para medir la cobertura es el llamado *AudioQ*, o simplemente *AQ*, por Audio Quality. Este parámetro provee valores objetivos de la calidad del servicio y por esto se usará en el cálculo de la Ganancia de Red. El AQ está definido como sigue:

$$AQ [\%] = \frac{\text{Número de tramas de audio decodificadas correctamente}}{\text{Número de tramas de audio transmitidas}} \times 100 \quad (2)$$

Se va a hacer una evaluación estática y móvil de la recepción de DRM+. Por esto, se definieron ubicaciones y rutas específicas para realizar las mediciones de la señal (Ver capítulo 5). Para hacer el análisis de los datos de las medidas móviles y hacer un estudio homogéneo de la Ganancia de Red en toda el área de medición, las rutas de medida se dividirán en *segmentos* de longitud constante. En ([34], [39], [42]) también se analizó la Ganancia de Red con una división en segmentos.

Un segmento tendrá una buena calidad de recepción si su AQ es igual o superior a 98%. Esto es porque se ha encontrado que en recepción estática con un AQ por debajo de este valor una persona promedio comienza a detectar degradación en la calidad de audio subjetiva de DRM. Este valor se ha usado en muchas de las pruebas del Consorcio DRM [47]. En [48] también se usó un 98% como el umbral de buena calidad en recepción móvil en una transmisión de DRM.

La longitud de los segmentos debe ser adecuada con relación al parámetro AQ, de tal manera, que el umbral de AQ de 98% permita en lo posible discernir si la causa de que algún segmento tenga una mala recepción fue la superposición de las señales, en el caso de la red SFN, un problema de propagación o de ruido. Y en caso contrario, si la buena cobertura del segmento se debió a la contribución de las tres señales.

El codificador AAC define una duración de trama de audio de 20 ms y 40 ms [10]. DRM+ define una super trama de audio de 200 ms, que está contenida en dos tramas de transmisión, ya que una trama de transmisión dura 100 ms.

Suponiendo que en las transmisiones de prueba, una trama de audio tuviera una duración de 40 ms, habría 5 tramas de audio en cada super trama de audio. Entonces, con una velocidad promedio de 50 Km/h, en un segmento de 100 m se necesitarían 4 tramas de audio para tener un AQ por debajo de 98%, es decir, menos de una super trama de audio. Considerando que los errores en DRM se producen en ráfagas [48] y que DRM+ entrelaza las celdas QAM de tres super tramas de audio parece ser un umbral de error adecuado. Sin embargo, esta longitud se puede modificar, según sea conveniente, en la etapa de análisis de los datos. En [26] también se dividieron los datos en cuadros de 100 m x 100 m para dibujar los mapas de cobertura de DRM+.

El método para calcular la Ganancia de Red, vista ésta como una medida del incremento de la cobertura de la Red SFN en comparación con la cobertura de la red MFN, la cual se denota como G_{CO} , por $G_{COBERTURA}$, se basa en la siguiente expresión:

$$G_{CO}[\%] = \frac{N_{SFN} - N_{MFN}}{M} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

N_{SFN}	Es el número de segmentos de ruta que tuvieron una buena calidad de recepción con la red SFN
N_{MFN}	Es el número de segmentos de ruta que tuvieron una buena calidad de recepción con la red MFN
M	Es el número total de segmentos de ruta medidos en ambas redes.

En ambas redes la señal se medirá en los mismos M segmentos de ruta distribuidos en toda el área de medición. Sin embargo, en el cálculo de la Ganancia de Red sólo se considerarán los N segmentos que tengan una buena calidad de recepción en cada red. Es decir, el incremento de la cobertura que se prevé tener con la red SFN se calculará como la diferencia entre el porcentaje del total de segmentos (M) que con la red SFN, en un primer caso, y con la red MFN, en un segundo caso, presenten un valor de AQ por lo menos del 98%.

Un análisis secundario, derivado de este método, consiste en calcular la diferencia entre el porcentaje de los segmentos con un $AQ \geq x\%$ para cada red, siendo $x < 98$. Con esto no se está comparando directamente la cobertura de la red SFN con la de la red MFN, pero puede conocerse la mejoría que produce la red SFN en función de la calidad de audio dentro del área de medición. En este sentido, porque la calidad de recepción, o AQ, depende de las características de la señal que se recibe, se propone emplear un segundo método para calcular la Ganancia de Red como la diferencia entre la calidad de recepción conseguida con

ambas redes y analizarla en función de los parámetros de señal que se reciben al interior del área de medición.

3.2.2 Método para Calcular la Ganancia de Red como una Medida de la Mejora en la Calidad de Recepción

En ([34], [40], [42]) se demostró que la Ganancia de Red, la cual se definió de forma distinta en cada caso, varió según la posición del receptor. Esto es porque en una red MFN, las características de la señal que se recibe dependen, principalmente, de la distancia al transmisor, del modo de recepción, ya sea éste fijo o móvil, y del entorno en que se recibe. Sin embargo, en el caso de una red SFN, estos factores de dependencia se multiplican porque se reciben hasta n señales útiles, o sea, en cada ubicación se recibe en n diferentes canales de propagación, de modo que la recepción varía en toda el área de cobertura.

La recepción de varias señales en una red SFN es en realidad un efecto de multitrayecto, y por esto, en las transmisiones de prueba el valor mediano de campo y la variabilidad de la señal resultante en cualquier segmento, dependerán de la intensidad de campo y del retardo de recepción de las señales que se reciban desde los tres transmisores.

Por otro lado, en los sistemas de radio digital la transición de tener una calidad de recepción perfecta a una interrupción de audio ocurre en un rango relativamente corto de decibeles, así que, resulta necesario proveer una intensidad de campo eléctrico adecuada en un alto porcentaje de ubicaciones dentro del área de servicio [32]. Para la planificación de DRM+ en recepción móvil este porcentaje es de 99% [15]. Entonces, tanto en la red MFN, como en la red SFN, un segmento dado tendrá un AQ satisfactorio sólo si la intensidad de campo está por encima del umbral de campo en un porcentaje alto de la longitud del segmento de ruta. Se prevé que como consecuencia de la operación de la red SFN la variabilidad de la señal que se recibirá será menor a la de la señal que se recibirá en la red MFN. Esto lo confirmó la prueba de red SFN para DRM+ en Hannover, Alemania [44].

La Ganancia de Red, definida como la mejora en la calidad de recepción conseguida por la red SFN en un segmento específico dentro del área de medición, se denotará como G_{CA} , por $G_{CALIDAD}$, y se calculará con la siguiente expresión:

$$\boxed{G_{CA (R,S)} [\%] = AQ_{(R,S)SFN} [\%] - AQ_{(R,S)MFN} [\%]} \quad (4)$$

Donde:

- | | |
|-----------------|--|
| $AQ_{(R,S)SFN}$ | Es la calidad de recepción del segmento (R,S) con la red SFN |
| $AQ_{(R,S)MFN}$ | Es la calidad de recepción del segmento (R,S) con la red MFN |

Es decir, con esta expresión la Ganancia de Red se calcula como la diferencia entre el AQ obtenido con ambas redes en cada segmento de ruta. Entonces, cada segmento presentará una Ganancia de Red diferente. En el análisis de los datos cada segmento estará identificado por las literales R y S . La R se referirá al número de la ruta de medida y la S se referirá al número de segmento, numerado a partir del arranque de las medidas en la ruta R .

La razón de ser de este método no es sólo conocer la mejora en la calidad que la red SFN producirá en cada segmento, sino analizar esta mejora en la calidad como una función de la relación de las tres señales que se reciben.

Para realizar dicho análisis, en cada segmento (R,S) puede obtenerse la diferencia entre la intensidad de campo más alta de las tres y la suma de las otras dos intensidades de campo, denotada como $\Delta E_{med (R,S)}$:

$$\Delta E_{med (R,S)} [dB] = E_{med i (R,S)} [dB\mu V/m] - (E_{med j (R,S)} + E_{med z (R,S)}) [dB\mu V/m] \quad (5)$$

Donde:

i, j, z	Son los índices que identifican a cada transmisor de la red: TX i , TX j y TX z ; $i = \{1,2,3\}$; $j = \{1,2,3\}$; $z = \{1,2,3\}$; $i \neq j \neq z$.
$E_{med i (R,S)}$	Es el valor mediano de campo más alto de los tres que se reciban en el segmento (R,S) y corresponde a TX i .

Con un análisis de la G_{CA} en función de ΔE_{med} , es decir, contrastando las estadísticas generadas con la expresión (4) con las que se generen con la expresión (5) en toda el área de medición, pueden conocerse los valores de campo eléctrico requeridos para incrementar el AQ. Con esto, pueden planificarse las zonas de traslape del área de cobertura de cada transmisor.

Sin embargo, como ya se explicó, la calidad de recepción en la red SFN se ve involucrada en un efecto de mutitrayecto, por lo tanto, ésta no sólo estará determinada por la relación entre la intensidad de campo de las señales que se reciban, sino también por el retardo relativo de recepción entre dichas señales. Para complementar los resultados de dicho análisis, se propone obtener la diferencia entre el Modulation Error Rate (MER) que se obtendrá con la red SFN y con la red MFN, y analizarla en función de la relación de la intensidad de campo de las señales, es decir, en función de ΔE_{med} . Entonces, para cada segmento de ruta dicha diferencia se calculará como sigue:

$$\Delta MER_{med (R,S)} [dB] = MER_{med (R,S) SFN} [dB] - MER_{med (R,S) MFN} [dB] \quad (6)$$

Donde:

$MER_{med (R,S) SFN}$	Es el valor mediano de MER en el segmento (R,S) con la red SFN
$MER_{med (R,S) MFN}$	Es el valor mediano de MER en el segmento (R,S) con la red MFN

El MER se define en la especificación de la ETSI sobre la Interfaz para el Control y Estado del Receptor de DRM (RSCI) [49], mediante una referencia a la especificación de DVB, como una medida de Relación Señal a Ruido que dará una indicación exacta de la habilidad de un receptor para demodular la señal. El método para calcular el MER en DRM es el siguiente:

$$\text{MER [dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_k |s_k|^2}{\sum_k |s_k - r_k|^2} \right) \quad (7)$$

Donde:

- s_k Son los valores de los puntos ideales del diagrama de constelación
- r_k Son los valores de las celdas recibidas después de la estimación de canal

El cálculo involucra las k celdas n-QAM del canal MSC, que están contenidas en una trama de transmisión de DRM+.

En la red MFN la señal se verá afectada por el ruido y el multitrayecto del entorno, pero, siempre que no haya señales que interfieran, en cualquier segmento el MER aumentará si la intensidad de campo eléctrico que se reciba también aumenta. Sin embargo, en el caso de la red SFN, la recepción de las tres señales, a pesar del aumento de energía recibida que ello significaría, puede provocar problemas como desvanecimientos selectivos en frecuencia que pueden llevar a una capacidad deficiente para demodular correctamente la señal, y como consecuencia de este hecho una disminución en el MER.

Esta es la razón de analizar la diferencia entre el MER que se mida con la red SFN y el MER que se mida con la red MFN, o sea, los resultados que se obtengan con la expresión (6), en función de ΔE_{med} en toda el área de medición. Dicho análisis revelará en qué medida la relación de la intensidad de campo y del retardo de recepción de las tres señales que se reciban en la red SFN tienen un efecto benéfico o perjudicial sobre la calidad de recepción.

Una evaluación completa del retardo de recepción de las tres señales que se reciben en la red SFN está fuera del alcance de la campaña. Por esto, en las medidas sólo se tomará en cuenta el retardo de recepción que resulta de la posición del receptor y no se van a introducir retardos a las transmisiones.

Por todo lo anterior, la metodología de medición, básicamente, está dirigida a evaluar la recepción bajo tres condiciones en la red SFN:

- ◆ Cuando el campo eléctrico de las señales sea similar, pero bajo. Por ejemplo, en los límites de cobertura de los transmisores.
- ◆ Cuando el campo eléctrico de las señales sea similar, pero alto. Por ejemplo, en el centro de la zona de traslape de los transmisores.
- ◆ Cuando el campo eléctrico de alguna señal sea alto, pero el de las otras dos sea bajo. Por ejemplo, en la cercanía de uno de los transmisores.

3.3 Objetivos del Estudio de DRM+ en la Red en Frecuencia Única

Tal como se mencionó, la campaña de pruebas tiene dos clases de objetivos: el cálculo de la Ganancia de Red y algunos cálculos del desempeño de DRM+ en una red SFN. En los apartados anteriores se expusieron los objetivos acerca de la Ganancia de Red de la red SFN. Por su parte, en este apartado, se exponen los objetivos específicos acerca del desempeño de DRM+ operando en la red SFN.

Primeramente, hay que apuntar que la planificación contempla hacer las pruebas empleando los dos modos de transmisión definidos en el estándar DRM+: 4-QAM y 16-QAM, para comparar su rendimiento en la red SFN. En pruebas hechas en la banda II ([22], [26], [27]) se ha comparado el desempeño de ambos modos en una red MFN, concluyendo siempre que con la misma potencia de transmisión el modo 4-QAM tiene un mayor alcance de recepción que el modo 16-QAM.

El umbral de campo eléctrico es mayor para 16-QAM que para 4-QAM, entonces, si se emplea la misma potencia de transmisión es complicado asemejar las condiciones de cobertura en la red SFN en ambos modos. Esta situación se ilustra en la figura 3.2 con el planteamiento de un caso de transmisión teórico.

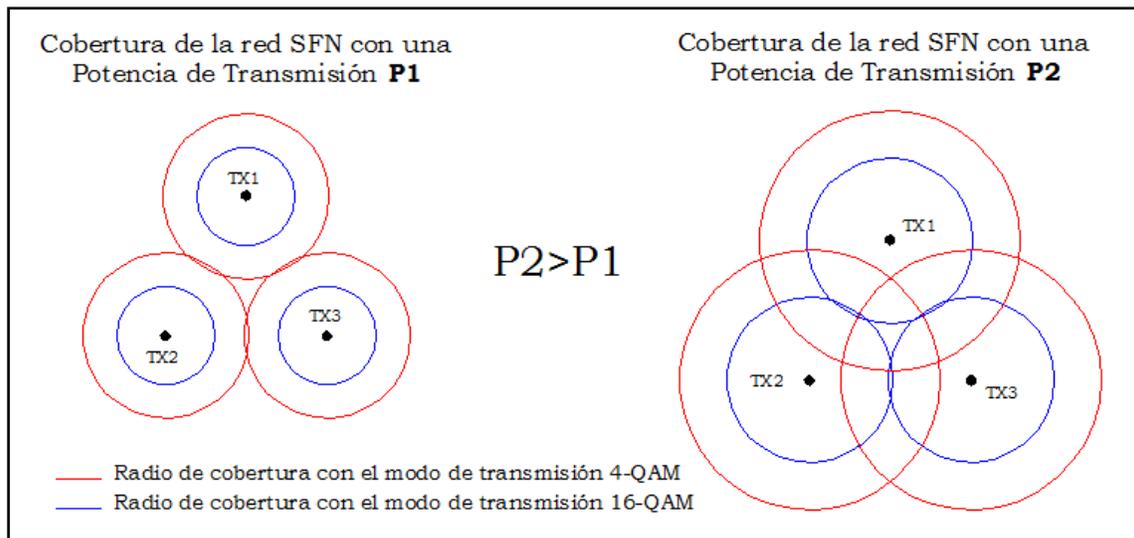


FIGURA 3.2. Variación de la cobertura de la red SFN en función de la potencia de transmisión y los modos de transmisión 4-QAM y 16-QAM.

Dependiendo de la potencia de transmisión las condiciones de cobertura del modo 16-QAM pueden ser insuficientes para estudiar la recepción en la red SFN, o para el modo 4-QAM, la cobertura de los transmisores puede traslaparse tanto que se estudiaría la Ganancia de Red en una situación poco realista. Por ello, se decidió que la potencia de transmisión para el modo 16-QAM sea mayor que para el modo 4-QAM. Con una diferencia en potencia exactamente igual a la diferencia entre ambos umbrales de campo se obtienen condiciones de cobertura muy

similares para las dos transmisiones (Ver capítulo 4). Así puede compararse directamente el desempeño de ambos modos de transmisión en una red SFN.

Para complementar el estudio comparativo entre el desempeño de ambas redes, se busca cuantificar la disminución de la profundidad de los desvanecimientos que sufrirá la señal con la red SFN en comparación con la red MFN. La importancia de medir esta disminución es porque es la causa principal de que el AQ mejore en la red SFN, y además, trae como consecuencia una reducción en la variabilidad estadística de la señal. Para calcular la disminución de esta profundidad se propone la siguiente expresión:

$$\Delta E_{99\% (R,S)} [\text{dB}] = E_{\text{exc } 99\% (R,S) \text{ SFN}} [\text{dB}\mu\text{V/m}] - E_{\text{exc } 99\% (R,S) \text{ MFN}} [\text{dB}\mu\text{V/m}] \quad (8)$$

Donde:

$E_{\text{exc } 99\% (R,S) \text{ SFN}}$	Es el valor de intensidad de campo eléctrico que será excedido en el 99% de la longitud del segmento (R,S) con la red SFN
$E_{\text{exc } 99\% (R,S) \text{ MFN}}$	Es el valor de intensidad de campo eléctrico que será excedido en el 99% de la longitud del segmento (R,S) con la red MFN

El valor de campo eléctrico que sea superado en el 99% de la longitud de un segmento de ruta (R,S), prácticamente, será el valor de campo más bajo que se haya recibido en cualquier punto de todo el segmento. Por lo tanto, la expresión (8) dará como resultado la diferencia entre el valor de campo de las ubicaciones que en ese segmento hayan sufrido el desvanecimiento más profundo de la señal con la red SFN y con la red MFN.

Con este análisis de los desvanecimientos de la señal y con el cálculo de la G_{CO} y de la G_{CA} para los modos 4-QAM y 16-QAM se hará un estudio profundo del desempeño de DRM+ en redes SFN en la banda II.

Finalmente, también se pretende analizar la calidad de recepción en función del campo eléctrico y de SNR que se reciban, con el propósito de calcular los umbrales de recepción, precisamente, de campo eléctrico y de SNR en los modos de recepción fijo y móvil, para las transmisiones con el modo 4-QAM y con el modo 16-QAM, tanto en la red MFN, como en la red SFN.

3.4 Resumen de la Definición de los Objetivos de la Campaña de Pruebas

En este capítulo se definieron y fundamentaron los objetivos de la campaña de pruebas que se planificó en esta tesis. La definición de estos objetivos sentó las bases para determinar las características de la red de transmisión para las pruebas y la definición de la metodología de medición en campo, que son etapas de la planificación que se abordan en los siguientes capítulos.

El objetivo principal de las pruebas de campo es medir la Ganancia de Red que tendría una red SFN operando con el estándar DRM+ en la banda II de VHF. Sin embargo, este propósito conllevó a formular objetivos secundarios que están relacionados con el análisis del desempeño de DRM+ en una red SFN.

La red de transmisión para las pruebas estará compuesta por tres transmisores, porque este número es suficiente para estudiar la Ganancia de Red en un ambiente de radiodifusión realista. El área de cobertura de cada transmisor se extenderá hasta donde se reciba un valor de campo igual al umbral de campo eléctrico para cada modo de transmisión definido en DRM+.

El área total de cobertura de la red MFN sería equivalente a la suma del área de cobertura de cada transmisor. Sin embargo, en la red SFN, la superposición de las tres señales puede hacer que la cobertura mejore al interior del área de cobertura de la red MFN, y además, ampliar esta área. En consecuencia, la metodología de medición se definió de tal modo que se pudiera evaluar la recepción en zonas donde se dé un traslape de las señales de los transmisores.

En esta planificación, la Ganancia de Red se concibe como la medida del efecto que produce la recepción de dos o más señales útiles sobre la calidad de recepción de DRM+. Por las características de operación de la red SFN se prevé que este efecto sea benéfico.

Para hacer el estudio de la Ganancia de Red en toda el área de medición, se propone dividir las rutas de medida en segmentos de una longitud de 100 m. Un segmento se identificará con las literales R y S (R para el número de ruta y para el número de segmento). En un segmento se tendrá una buena calidad de recepción, o AQ, si se decodifican correctamente por lo menos el 98% de las tramas de audio de DRM+ que se transmitan.

Se proponen dos métodos para calcular la Ganancia de Red. En el primero de ellos, la Ganancia de Red se denota como G_{CO} y se calcula como la diferencia entre la cobertura conseguida por cada red:

$$G_{CO}[\%] = \frac{N_{SFN} - N_{MFN}}{M} \times 100$$

N es el número de segmentos de ruta que tendrán una buena calidad de recepción con la red respectiva, y M es el total de segmentos medidos en ambas redes.

En el segundo método, la Ganancia de Red, que se denota como G_{CA} , se calcula como la diferencia entre la calidad de recepción obtenida con cada red dentro de toda el área de medición:

$$G_{CA(R,S)} [\%] = AQ_{(R,S)SFN} [\%] - AQ_{(R,S)MFN} [\%]$$

Con la red SFN el AQ dependerá de las características de la señal resultante de la superposición de las tres señales que se reciban, entonces, en cada segmento (R,S) se tendrá un AQ diferente, y por lo tanto, una G_{CA} distinta.

La recepción en la red SFN es en realidad un efecto de multitrayecto, por esto, la señal resultante dependerá de la intensidad de campo y del retardo de recepción de las tres señales que se reciban. En este sentido, para fines de planificación de redes SFN con DRM+, se propone analizar la diferencia en la calidad de recepción en toda el área de medición en función de estas tres señales. Para esto, se definieron las siguientes relaciones de los parámetros de señal en cada segmento:

$$\Delta E_{med (R,S)} [dB] = E_{med i (R,S)} [dB\mu V/m] - (E_{med j (R,S)} + E_{med z (R,S)}) [dB\mu V/m]$$

$$\Delta MER_{med (R,S)} [dB] = MER_{med (R,S) SFN} [dB] - MER_{med (R,S) MFN} [dB]$$

La primera relaciona la intensidad de campo de las tres señales que se reciban, específicamente, se calcula la diferencia entre el valor mediano de campo más alto de los tres y la suma de los otros dos. Mientras que, con la segunda se calcula la diferencia entre el valor de MER mediano con la red SFN y con la red MFN. Del análisis de G_{CA} en función de ΔE_{med} y del análisis de ΔE_{med} en función de ΔMER_{med} , se conocerá en qué medida la relación de las tres señales es benéfica o perjudicial para el desempeño de la red SFN.

En el estándar DRM+ están definidos dos modos de transmisión: el 4-QAM y el 16-QAM. La campaña de pruebas tiene como objetivo comparar el desempeño de ambos modos en una red SFN. Debido a que cada modo tiene su propio umbral de campo eléctrico, si la transmisión se hace con la misma potencia para ambos modos es complicado conseguir las condiciones de cobertura propicias para estudiar la Ganancia de Red en ambos casos. Para conseguir condiciones de cobertura muy similares, la potencia de transmisión para el modo 16-QAM será mayor que la del modo 4-QAM. Esta diferencia en potencia será igual a la diferencia entre el valor del umbral de campo para cada modo.

Otro objetivo es calcular la reducción en la profundidad de los desvanecimientos que la señal presentará con la red SFN en comparación con la red MFN. Para esto se usará la siguiente expresión:

$$\Delta E_{99\% (R,S)} [dB] = E_{exc 99\% (R,S) SFN} [dB\mu V/m] - E_{exc 99\% (R,S) MFN} [dB\mu V/m]$$

Con esta expresión se calculará la diferencia entre el valor de campo más bajo recibido en todo el segmento (R,S), es decir, el valor que sea superado en el 99% de la longitud del segmento, con la red SFN y con la red MFN.

Finalmente, se tiene el objetivo de calcular los umbrales de campo eléctrico y de SNR en recepción fija y móvil para los dos modos 4-QAM y 16-QAM, tanto con la red SFN, como con la red MFN.

CAPÍTULO 4

Requerimientos de Cobertura y de Potencia de la Red de Transmisión para las Pruebas

En este capítulo se expone la metodología que se siguió para obtener los requerimientos de potencia que crearán las condiciones de recepción propicias para la campaña de pruebas, de acuerdo a los objetivos que se expusieron en el capítulo 3.

El propósito es que la metodología de medición sirva para ejecutar esta campaña en cualquier ciudad, pero con el fin de obtener los requerimientos de potencia de la red de transmisión se hizo un ejercicio de planificación aplicado a la Ciudad de México, cuyo resultado es la relación de potencia de los tres transmisores de la red que se necesita para generar una cobertura favorable para hacer las medidas.

En este sentido, un beneficio de esta tesis es que plantea la planificación para realizar la campaña específicamente en la Ciudad de México, por tanto, si más adelante se realizan pruebas con el estándar IBOC en redes SFN en la ciudad, pueden aprovecharse y/o adaptarse algunos elementos de esta planificación.

4.1 Umbral de Campo Eléctrico

De acuerdo a los parámetros para la planificación de DRM+ en la banda II [15], los valores del umbral de campo eléctrico son los que se presentan en la tabla 4.1. Estos valores corresponden a los umbrales para recepción fija y móvil con los modos 4-QAM y 16-QAM; y fueron calculados a partir de resultados de pruebas de laboratorio y de campo e información de recomendaciones de la UIT.

TABLA 4.1. Umbral de campo eléctrico para los dos modos de transmisión de DRM+.

Modo de Recepción	Modo de Transmisión	
	4-QAM, R=1/3	16-QAM, R=1/2
Fija	17.32 dB μ V/m	23.92 dB μ V/m
Móvil	42.27 dB μ V/m	49.57 dB μ V/m

Los resultados de algunas de las pruebas de DRM+ en la banda II presentan el valor de campo más bajo con el que se obtuvo una buena calidad en recepción

móvil. A este respecto, para el modo 4-QAM este valor resultó ser de 30 dB μ V/m en [22], de 35 dB μ V/m en ([21], [44]) y de 42 dB μ V/m en [27]; mientras que, para el modo 16-QAM este valor fue de 46 dB μ V/m en [22]. La discrepancia entre los valores para el modo 4-QAM se debe principalmente al entorno en que se realizaron las pruebas porque éste determina en gran medida la variabilidad de la señal que se recibe.

La potencia de transmisión que se usará en la red de prueba se estimó mediante una predicción de campo eléctrico. Para esto, se estableció que el umbral de campo eléctrico será de 42 dB μ V/m y de 49 dB μ V/m, para los modos 4-QAM y 16-QAM, respectivamente.

Se decidió trabajar con estos umbrales, porque además de que en su cálculo ya se tomaron en cuenta los resultados de las pruebas, por ser los valores más altos, respectivamente para cada modo de transmisión, los resultados de la predicción de cobertura serán los más conservadores, y por ende, los más certeros, considerando que en la realidad hay situaciones de recepción que pueden ser muy negativas. Por ejemplo, la presencia de desvanecimientos de señal en recepción móvil y los altos niveles de ruido y de multitrayecto que existen en un entorno urbano como el de la Ciudad de México.

4.2 Predicción de Campo Eléctrico

Para desarrollar la planificación se emplearon tres sitios de transmisión de FM ubicados en la Ciudad de México. Estos tres sitios se seleccionaron de entre todos los sitios de FM de la ciudad y esta decisión se basó en su conveniencia para proveer las condiciones de cobertura adecuadas para el estudio de la recepción en la red SFN. Para evaluar las características de cobertura de los sitios de transmisión se hicieron predicciones de campo eléctrico.

Las predicciones de campo eléctrico se hicieron con el software libre *Radio Mobile ver.11.05*³. Este software hace uso del modelo de propagación por radio ITS Irregular Terrain Model, o también llamado Modelo Longley-Rice. Este modelo está basado en teoría electromagnética y análisis estadístico, tanto de las características del terreno, como de mediciones de radio, para predecir la atenuación media de una señal de radio como una función de la distancia y la variabilidad de la señal en tiempo y espacio [50]. Cabe mencionar que Radio Mobile no toma en cuenta la morfología del terreno, o sea, los edificios, los árboles, etc., sólo considera el perfil del terreno. Radio Mobile se ha utilizado para realizar la predicción de cobertura en la planificación de varias de las pruebas de campo que se han realizado con DRM [48] y con DRM+ ([21], [27], [44]).

Los valores que se dieron a los parámetros que se definen en Radio Mobile están en la tabla 4.2.

³ Página Web Oficial: www.cplus.org/rmw/english1.html

TABLA 4.2. Valores de los parámetros empleados para la predicción de campo eléctrico.

Parámetro	Valor
Conductividad del terreno	5 mS/m ⁴
Permitividad del terreno	15 ⁴
Refractividad del terreno	301 unidades N ⁵
Clima	Templado continental ⁵
Polarización	Vertical
Altura de la antena transmisora	50 m
Altura de la antena receptora	1.5 m
Rango de frecuencia	88 108 MHz
Pérdidas adicionales por ciudad o bosque	0%
Probabilidad de tiempo	95 %
Probabilidad de localización	95 %
Probabilidad de situación	95 %

Se decidió que la antena de transmisión fuera omnidireccional con una ganancia de 0 dBi, buscando obtener la potencia de transmisión necesaria para cubrir cierta área objetivo. Entonces, como conclusión de los resultados de la predicción de campo se obtuvo el valor de PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) requerida en cada una de las tres estaciones transmisoras. No obstante, en las transmisiones de prueba, naturalmente, se emplearán antenas con patrones de radiación prácticos pero que necesariamente cubran dicha área objetivo.

A pesar de que se hicieron predicciones de campo desde diferentes sitios de transmisión ubicados en la Ciudad de México, se definió una altura constante de 50 m para las antenas, con el fin de tener objetividad en la obtención de las características de transmisión de la red y porque se considera que este valor es un dato realista para la realización de las pruebas. En [48] la antena se posicionó a 40 m de altura sobre el mástil; en [17] su altura fue de 70 m sobre la tierra, y en [27] fue de 74 m. Por otro lado, la antena transmisora de FM del *IMER* está a 50 m sobre la tierra, mientras que la de *Radio UNAM* está a 73 m sobre la tierra.

En lo que respecta de la antena receptora, ésta se situó a una altura de 1.5 m porque para hacer mediciones móviles la antena se monta en una camioneta. Este valor es razonable considerando que en [26] la altura de la camioneta fue de 1.5 m, en ([21], [22], [23]) fue de 2 m y en [27] fue de 2.5 m.

La precisión de un canal de frecuencia en la banda de FM para las pruebas está fuera del alcance de esta tesis, puesto que la planificación se limita a establecer las características de cobertura generadas con los transmisores. Sin embargo, esto no es una limitación importante en los resultados de la potencia de

⁴ Constantes para un terreno promedio [50].

⁵ Para condiciones atmosféricas promedio [50].

transmisión, porque según la predicción el valor de campo que se recibiría en cualquier ubicación varía alrededor de 0.2 dB en función de las frecuencias de esta banda.

Se definió un 95% para la probabilidad en tiempo, localización y situación, para obtener como resultado los valores de campo que estarían por encima del umbral en un alto porcentaje de tiempo y en un alto porcentaje de ubicaciones. Al respecto, en una prueba con DRM+ se usó 95% en tiempo y 95% en localizaciones [27]; y en otra, 50% en tiempo y 95% en localizaciones [21].

Este porcentaje en tiempo prácticamente no influye en los resultados de la predicción porque Radio Mobile no toma en cuenta el efecto del entorno de recepción. Sin embargo, en la realidad, aunque la variabilidad de la señal en tiempo no es tan alta como lo es en localización, en entornos urbanos habrá una diferencia de varios dB entre el valor de campo que será superado el 50% del tiempo y el valor que será superado el 95% del tiempo en recepción estática. En la predicción, un cambio de 50% a 95 % en la probabilidad en tiempo provoca una disminución de 0.1 y 0.2 dB en el valor de campo que se recibiría en cualquier ubicación. En contraparte, el mismo cambio en la probabilidad de localización y de situación, resulta en una reducción del orden de 14 dB a 15 dB.

4.3 Escenarios Posibles para la Red en Frecuencia Única de Prueba en la Ciudad de México.

Se evaluaron los sitios de FM de la Ciudad de México porque representan una situación realista en la planificación, ya que estas ubicaciones han probado ser propicias para proveer servicios de radiodifusión, y además, en la ejecución de pruebas con redes SFN, seguramente, se emplearán estos sitios por la infraestructura con la que cuentan y por los intereses de los radiodifusores.

En la figura 4.1, sobre un mapa de elevaciones de la Ciudad de México, se ubican los sitios de transmisión de FM en operación. Las marcas rojas corresponden a sitios de concesionarios y las marcas verdes a sitios de permisionarios.

En la selección de los tres sitios de transmisión con los que se haría la planificación de las pruebas, al conjunto de cualesquiera tres sitios de FM de la ciudad se le denominó *escenario de red*. Se usó este término porque cada grupo de tres sitios transmisores tiene características propias y diferentes del resto, las cuales llevan a diferentes requerimientos de potencia de transmisión para conseguir una misma área de cobertura.

Los dos criterios iniciales que se usaron para distinguir los escenarios de red que serían potenciales para ser considerados en la planificación son:

- ◆ La distancia entre los transmisores.
- ◆ La topografía del entorno de los transmisores.

La distancia entre los sitios del escenario determinará la potencia de transmisión, pero, dicha distancia debe ser menor a 75 km para evitar que se provoque autointerferencia en la red SFN. Se considera que una distancia de 10 a 30 km es suficiente para estudiar el desempeño de una red SFN con DRM+. Porque, por un lado, las transmisiones de prueba con DRM+, dependiendo de la potencia y del modo de transmisión, han tenido un alcance con buena recepción entre 5 y 30 km; y además, con esta distancia se abarca buena parte de cualquier ciudad. Por ejemplo, la distancia entre el transmisor del IMER y el de Radio UNAM en la Ciudad de México es de 30 km (Ver figura 4.1). Esta situación es conveniente porque el área de cobertura comprenderá varios entornos de recepción, en función del grado de urbanización, y esto permitirá calcular la Ganancia de Red en ambientes con diferente grado de multitrayecto.

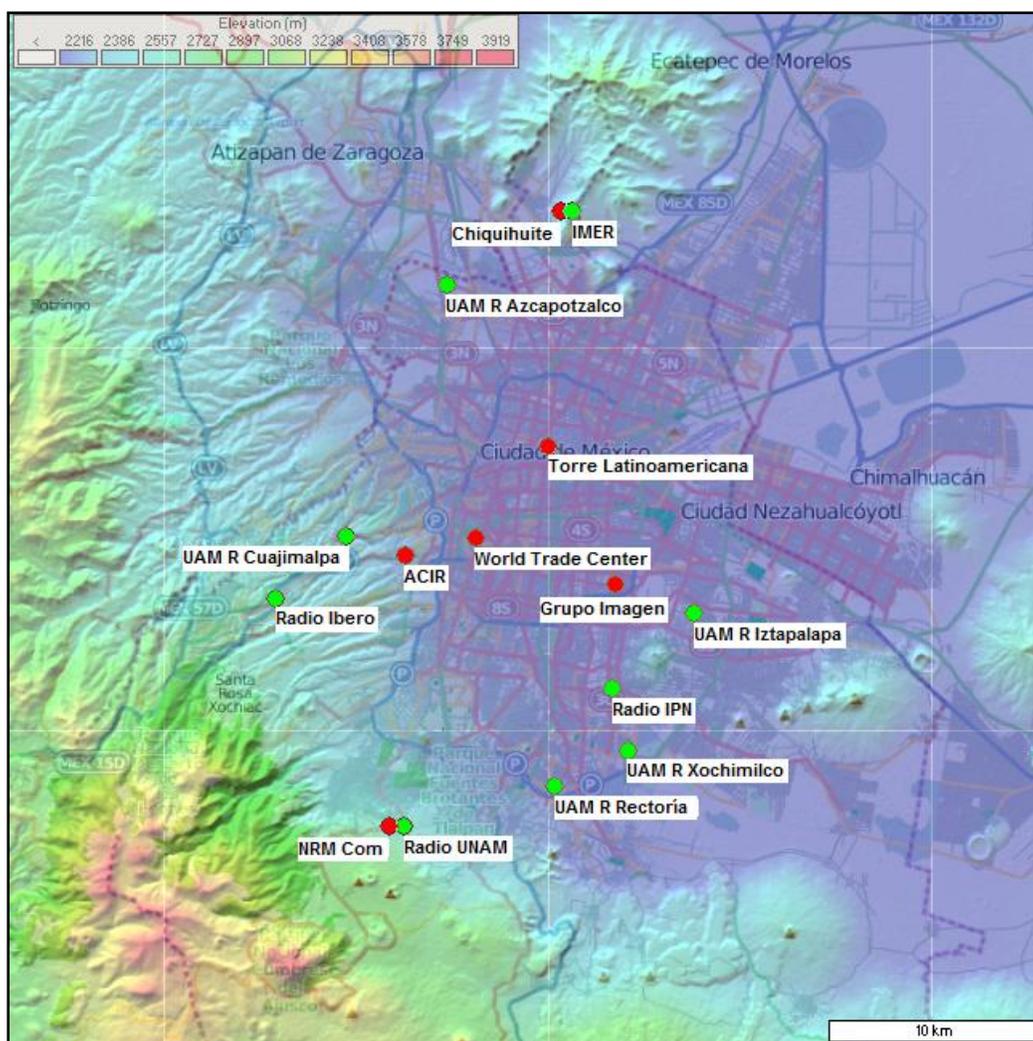


FIGURA 4.1. Sitios de transmisión de FM en operación en la Ciudad de México.

Respecto de las condiciones topográficas, en esta prueba de campo se busca que el entorno de recepción sea en lo posible llano para garantizar la viabilidad de las

mediciones y la fiabilidad de sus datos. Contar con datos fiables es especialmente importante en el estudio de la recepción en la red SFN, ya que los obstáculos en el terreno se pueden despreciar como una causa de los desvanecimientos de la señal e investigar con mayor precisión si éstos se debieron al efecto de los ecos de señal. Por ello, un buen escenario de red será aquel que comprenda un área con niveles de altitud sin demasiada variación.

La Ciudad de México tiene zonas montañosas al norte, al oeste y al sur (Ver la figura 4.1). A pesar de que los transmisores que están ubicados en estas zonas son muy útiles para conformar el escenario de red para la planificación, debido a su amplia distancia a otros transmisores y por su buena provisión de LOS (Line of Sight) sobre el área de medición, la topografía de sus alrededores no es la más adecuada para proveer las condiciones de cobertura propicias con la red SFN. Por esta razón dichos sitios no se consideraron en la planificación.

Sólo para ejemplificar la situación que implica usar estos sitios de transmisión, en la figura 4.2 se compara la recepción desde los sitios de transmisión UAM Radio Cuajimalpa (UAM-C) y UAM Radio Azcapotzalco (UAM-A) que se tiene sobre una dirección radial para cada uno, usando el modo 4-QAM y una PIRE de 60 W.

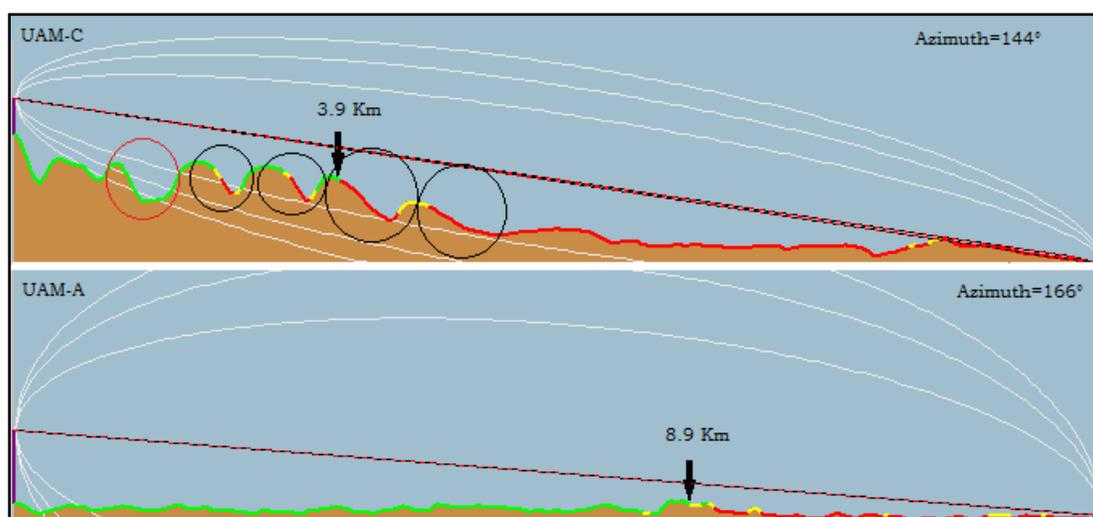


FIGURA 4.2. Predicción de campo eléctrico sobre dos direcciones radiales usando, respectivamente, los sitios de transmisión UAM-C y UAM-A en la Ciudad de México.⁶

En la figura se aprecia que en el enlace desde el sitio UAM-A el terreno es más llano que el del enlace del sitio UAM-C. Como consecuencia, el modo 4-QAM en el primer caso se recibe hasta una distancia de 8.9 km, mientras que, en el segundo sólo se recibe hasta los 3.9 km. Para conseguir un alcance de 8.9 km desde el sitio UAM-C se necesita una PIRE de 150 W, y aún en este caso, las ubicaciones que están marcadas dentro de los círculos negros no tendrían buena recepción, para mejorar ésta tendría que elevarse aún más la potencia.

⁶ Verde si Campo ≥ 42 dB μ V/m; Amarillo si 42 dB μ V/m $>$ Campo 39 dB μ V/m; Rojo si Campo 39 dB μ V/m.

La conclusión más importante a resaltar es que los transmisores que están en un terreno accidentado requieren un incremento de potencia para mejorar la recepción en sus alrededores, situación que por sí sola no es la más eficiente. Sin embargo, este incremento extenderá la cobertura hasta zonas más alejadas, pudiendo llegar incluso a las cercanías de otro transmisor de la red, y entonces, dicha solución afectará las condiciones de traslape del área de cobertura de los transmisores que están previstas para medir la recepción en la red SFN.

En la figura 4.3 sólo aparecen los sitios transmisores que se consideraron como candidatos para conformar el escenario de red que se usó en la planificación de la campaña.

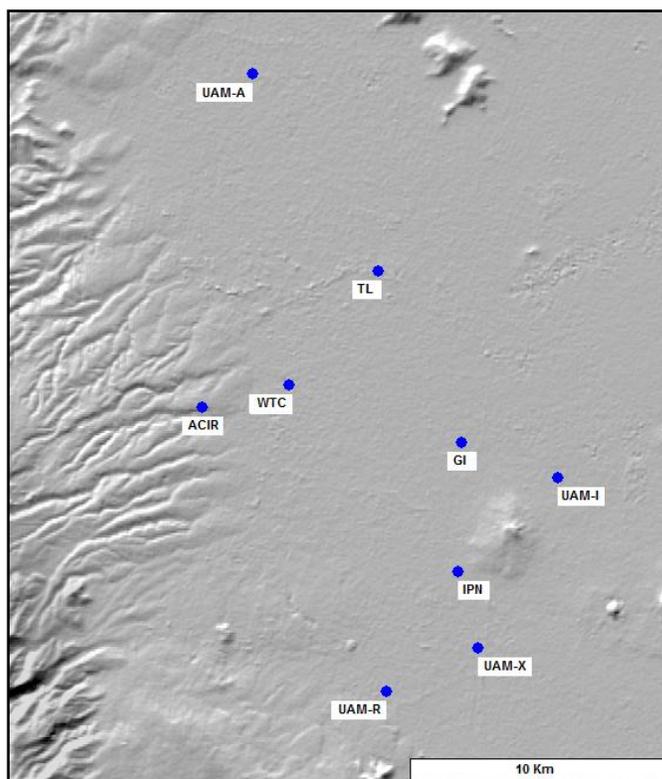


FIGURA 4.3. Sitios de transmisión candidatos a formar el escenario de red que se usó en la planificación.⁷

El número de escenarios de red que pueden formarse con todos estos sitios supera fácilmente la decena, sin embargo, se busca que las ubicaciones de los transmisores de la red formen un triángulo de dimensiones aproximadamente regulares para obtener un área de cobertura conveniente para el estudio de la Ganancia de Red.

Finalmente, sólo se eligieron como candidatos para la elección del escenario de red los cuatro casos que se resumen en la tabla 4.3. Esta selección final se hizo

⁷ Cada sitio tiene un nombre relacionado con el permisionario o concesionario, o con su ubicación.

considerando que las dimensiones del arreglo triangular son diferentes para los cuatro casos, y que la forma y las dimensiones de dichos arreglos se pueden obtener con otros escenarios de red que no están en la tabla 4.3. Por lo tanto, con la comparación de la cobertura de estos cuatro escenarios de red se están contrastando prácticamente todas las diferentes condiciones de cobertura que se pueden generar con todos los escenarios posibles. Como resultado se hizo una evaluación completa de los transmisores de FM con los que se obtendrían los requerimientos de cobertura y potencia para la red de pruebas.

4.4 Determinación de la Cobertura de la Red de Transmisión

En este apartado se expone la evaluación que se hizo de los cuatro escenarios de red de la tabla 4.3 para seleccionar el que se empleó para determinar el área de cobertura y después aplicar la metodología de medición.

Los cuatro escenarios de red pueden servir para evaluar la recepción en la red SFN, puesto que ya se han hecho pruebas de campo con redes SFN con diferentes distancias entre los sitios de transmisión. Sin embargo, cada uno de los cuatro tiene sus particularidades y por eso se eligió el que es más apropiado para la planificación de esta campaña de pruebas. En la realidad, no siempre es posible disponer de los sitios que técnicamente son los mejores para las pruebas, no obstante, las conclusiones de esta comparación pueden servir como criterios para decidir acerca de las condiciones de cobertura que son convenientes para realizar pruebas de campo con una red SFN.

TABLA 4.3. Escenarios de red SFN candidatos para hacer la planificación de las pruebas.

Nombre del Escenario de Red	Sitios de Transmisión del Escenario de Red	Distancia entre los Sitios de Transmisión [Km]
SFN_1	ACIR UAM-I UAM-A	ACIR – UAM-I: 14.2 ACIR – UAM-A: 13.2 UAM-I – UAM-A: 19.8
SFN_2	ACIR TL IPN	ACIR – TL: 8.7 ACIR – IPN: 11.9 TL – IPN: 12.1
SFN_3	WTC TL UAM-I	WTC – TL: 5.6 WTC – UAM-I: 11.1 TL – UAM-I: 10.7
SFN_4	WTC TL GI	WTC – TL: 5.6 WTC – GI: 7.1 TL – GI: 7.5

La diferencia primordial entre los cuatro escenarios es su forma triangular y el área que ésta encierra. Esta característica del escenario, en combinación con la relación entre la potencia de los tres transmisores, hacen que, en la medida de lo posible, se consigan las características de cobertura que se persiguen para desarrollar la planificación. En la red SFN estas características básicamente son:

- ◆ Obtener zonas donde las señales se superpongan con una intensidad de campo alrededor del umbral. Estas zonas son interesantes en el análisis de la Ganancia de Red.
- ◆ Evitar que las zonas de traslape del área de cobertura de los transmisores sean demasiado extensas, puesto que en estas zonas cada señal proveería por sí sola una buena calidad, y por lo tanto, el análisis de la Ganancia de Red pierde cierta utilidad.
- ◆ Procurar que las zonas de traslape se extiendan similarmente sobre el área de cobertura de cada uno de los tres transmisores. Esto se busca para evitar que existan grandes zonas donde sólo se reciba con buena calidad desde un transmisor, ya que esto también contribuye poco al análisis de la Ganancia de Red.

Por otro lado, para comparar el desempeño de los modos 4-QAM y 16-QAM en la red SFN, se va a medir la Ganancia de Red en una situación de cobertura aproximadamente igual para la transmisión con ambos modos. El umbral de campo para 16-QAM es mayor que el umbral para 4-QAM, entonces, si se usara una misma potencia de transmisión para los dos modos, con el modo 4-QAM se cubriría un área mayor. En la predicción, para cubrir un área muy similar con ambos modos, la potencia del modo 16-QAM debe ser mayor por 7 dB que la del modo 4-QAM, o sea, exactamente la diferencia entre los dos umbrales de campo eléctrico. Sin embargo, está claro que los resultados corresponden a una predicción de campo y es seguro que las medidas en campo van a dar resultados distintos. Para calcular la diferencia de potencia entre los dos modos en unidades lineales se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta\text{PIRE}_{\text{modos}} = 10^{\frac{\Delta\text{Umbral}_{\text{modos}}[\text{dB}]}{10}} \quad (9)$$

Donde:

$\Delta\text{PIRE}_{\text{modos}}$	Es la razón de PIRE de los modos 16-QAM y 4-QAM, medida en unidades lineales.
$\Delta\text{Umbral}_{\text{modos}} [\text{dB}]$	Es la diferencia de umbral de campo eléctrico de los modos 16-QAM y 4-QAM, medida en decibeles.

La diferencia entre el umbral de campo de cada modo es de 7 dB. Entonces, si se usa esta expresión se obtiene que la PIRE para el modo 16-QAM debe ser 5.012 veces la PIRE del modo 4-QAM. Esta relación de potencias se fijó en 5 veces.

Se hicieron predicciones de cobertura con los cuatro escenarios de red usando diferentes relaciones de potencia entre sus tres sitios transmisores y se apuntaron las ventajas y desventajas que cada escenario presenta respecto de la evaluación de la Ganancia de Red. Para medir la Ganancia de Red objetivamente, se busca que todas las ubicaciones dentro del área de medición estén cubiertas por alguno de los tres sitios, tal como operan las redes MFN. Por lo tanto, para cada escenario se buscó una relación de potencia de los tres sitios transmisores

tal que se cumpliera con esto, pero a su vez, sin traslapar demasiado el área de cobertura de cada uno de los tres sitios.

En la tabla 4.4 están los valores de PIRE, que usando el modo 4-QAM, se determinaron como apropiados para los tres sitios transmisores de cada escenario de red. Con estos valores se generaron las cuatro figuras subsiguientes (figura 4.4 – figura 4.7), las cuales corresponden a cada uno de los escenarios de red SFN. En la imagen de la izquierda de cada figura se ilustra el área de cobertura de los tres sitios de transmisión, mientras que, en la imagen de la derecha, se observan las zonas donde se recibiría la señal de cada transmisor con una intensidad de campo eléctrico hasta por 3 dB por debajo del umbral.

TABLA 4.4. Valores de PIRE usados en la predicción de cobertura con los escenarios de red candidatos para la planificación.

Escenario de Red	PIRE [W] (Sitio Transmisor)		
SFN_1	180 (ACIR)	110 (UAM-I)	130 (UAM-A)
SFN_2	70 (ACIR)	25 (TL)	45 (IPN)
SFN_3	7 (WTC)	7 (TL)	50 (UAM-I)
SFN_4	7 (WTC)	7 (TL)	11 (GI)

El escenario de red SFN_1 (figura 4.4) encierra un área amplia entre sus tres transmisores y por esto requiere de potencias más altas que el resto de los escenarios. Las zonas de traslape del área de cobertura de dos transmisores superan los 5 o 6 km de ancho, por ejemplo, si se mide sobre la línea imaginaria que une a ACIR con UAM-I. Las zonas en las que se recibe un valor de campo hasta 3 dB por abajo del umbral también se extienden hasta cubrir casi todo el triángulo del escenario. El SFN_1 es un escenario que por sus dimensiones permite realizar una campaña de pruebas intensiva con un análisis de datos muy amplio.

Por otro lado, al oeste de la línea imaginaria que une a UAM-A con ACIR (círculo amarillo) es complicado hacer mediciones a causa de la orografía. Además, debido a un cerro que está al este de UAM-A la recepción de la señal de este sitio a partir de unos 8 km de distancia se limita sólo a las ubicaciones que estén en ángulo de azimuth no menor a 106° (al sur de la línea amarilla superior). También, por un cerro que está al suroeste de UAM-I, la recepción de su señal a partir de 2 km de distancia se limita a las ubicaciones que estén en un ángulo de azimuth no menor a 250° (al norte de la línea amarilla inferior). Entonces, el área de medición con SFN_1 se extendería, con el punto rojo como centro, a un radio de 6 km hacia el Oeste, de 8 km al Sur y de 10 km al Norte y al Este.

El escenario SFN_2 (figura 4.5) tiene zonas de traslape del área de cobertura de los sitios transmisores más reducidas en área en comparación con las del SFN_1. Por ejemplo, sobre la línea imaginaria que une a TL con IPN el área de traslape tiene un ancho de 3.5 km. Al igual que con SFN_1, con este escenario de red se

recibirían señales con una intensidad de campo hasta 3 dB por debajo del umbral en prácticamente toda el área que encierran los tres sitios de transmisión.

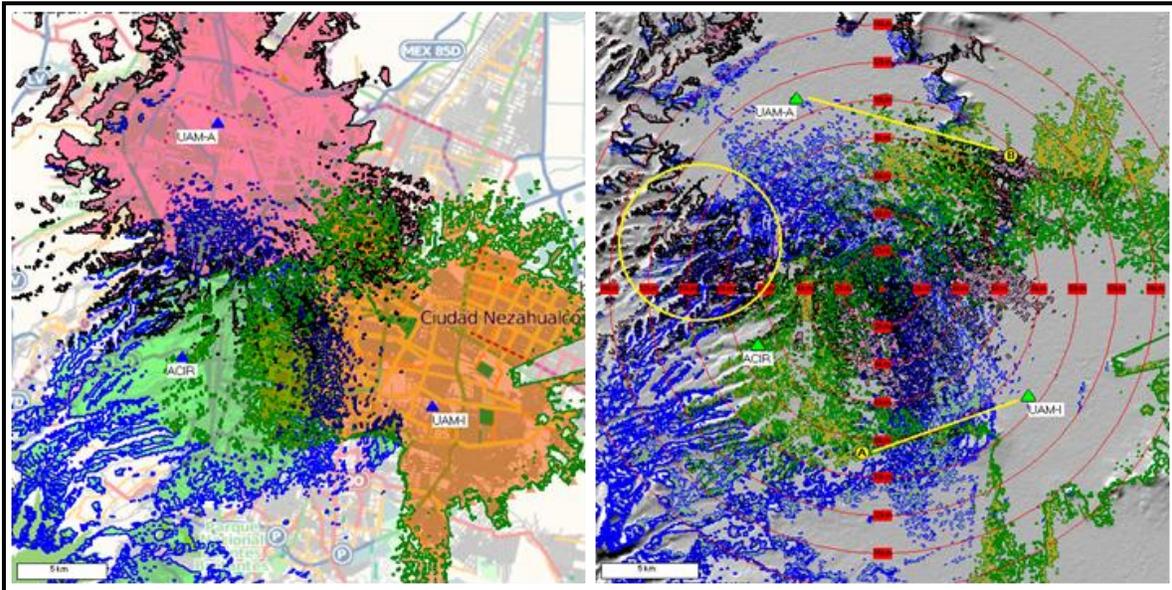


FIGURA 4.4. Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_1.

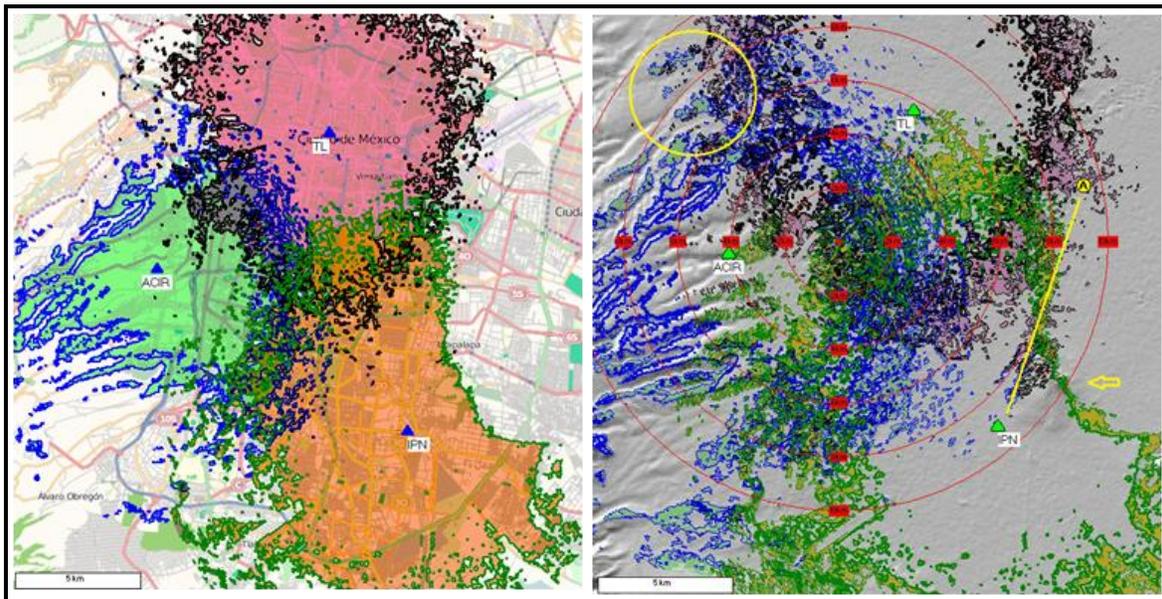


FIGURA 4.5. Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_2.

El SFN_2 tiene al sitio TL, que está al noreste del sitio ACIR. El terreno intermedio entre ACIR y TL no está tan accidentado como el que está entre ACIR y UAM-A (que pertenecen a SFN_1), por esta razón, en esta zona puede medirse mejor la superposición de dos señales con el escenario SFN_2, salvo por la parte lejana del círculo amarillo. Sin embargo, el área de medición de SFN_2 está

limitada hacia el este, porque un cerro (flecha amarilla) provoca que la señal de IPN no se reciba en ubicaciones que están en un ángulo de azimuth mayor a 20° (al oeste de la línea amarilla). Con esto, usando al escenario SFN_2 se mediría la recepción de la señal, teniendo al punto rojo como centro, en un radio de 6 km hacia el Oeste, de 8 km al Norte y al Este, y de 10 km al Sur.

En el escenario SFN_3 (figura 4.6) los sitios de transmisión WTC y TL guardan una distancia relativamente corta, respecto a la distancia que separa a ambos del sitio UAM-I. La potencia de WTC y de TL no puede aumentarse demasiado porque el área que los divide podría llegar a estar cubierta totalmente por ambos transmisores; entonces, la potencia de UAM-I debe ser mayor para poder cubrir toda el área que encierran los tres sitios transmisores. Este hecho hace que haya una diferencia grande entre la potencia de transmisión de WTC o de TL y UAM-I.

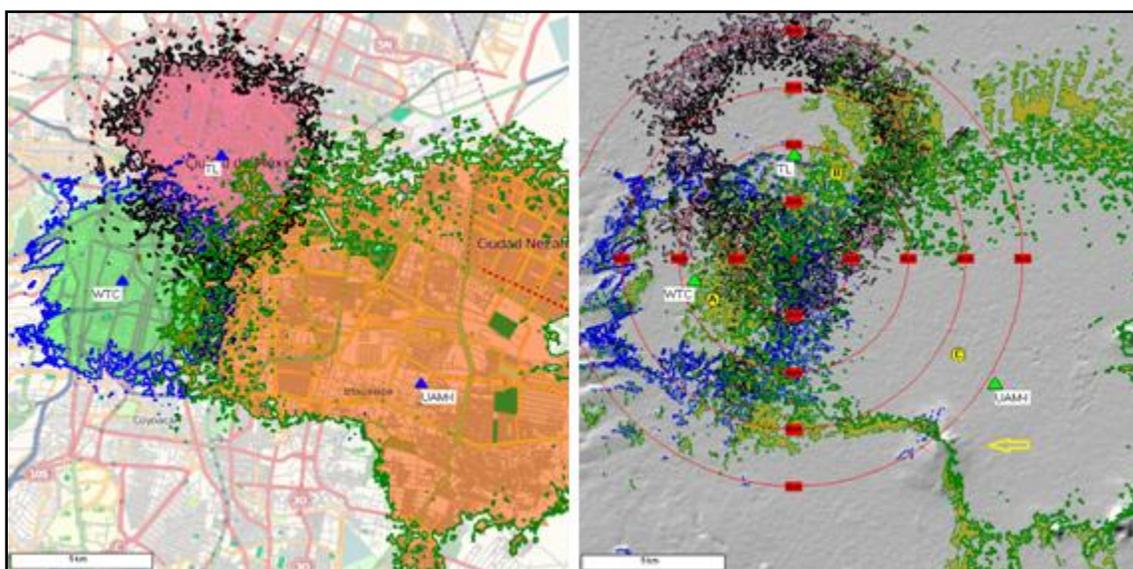


FIGURA 4.6. Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_3.

Los valores de potencia que se usarían con el escenario SFN_3 son relativamente bajos, y a pesar de que puede esto puede parecer una ventaja para la realización de la campaña de pruebas, este escenario fue descartado para la planificación. La razón es que el área de medición sólo se extendería en un radio de entre 4 y 6 km en cualquier dirección. Se consideró que estas dimensiones son insuficientes para realizar una campaña con los objetivos que se plantearon, y además, que en un área más amplia se haría el estudio en condiciones de recepción más realistas para una red SFN.

Finalmente, el escenario SFN_4 (figura 4.7) tiene prácticamente las mismas características que el escenario SFN_3, sin embargo, las distancias entre sus tres sitios son más simétricas. Esto se refleja en que la potencia requerida por los transmisores es similar y en que prácticamente toda el área al interior del arreglo triangular es de interés para la medición de la recepción. Por las mismas razones

que se descartó el escenario SFN_3, el escenario SFN_4 tampoco se consideró para hacer la planificación.

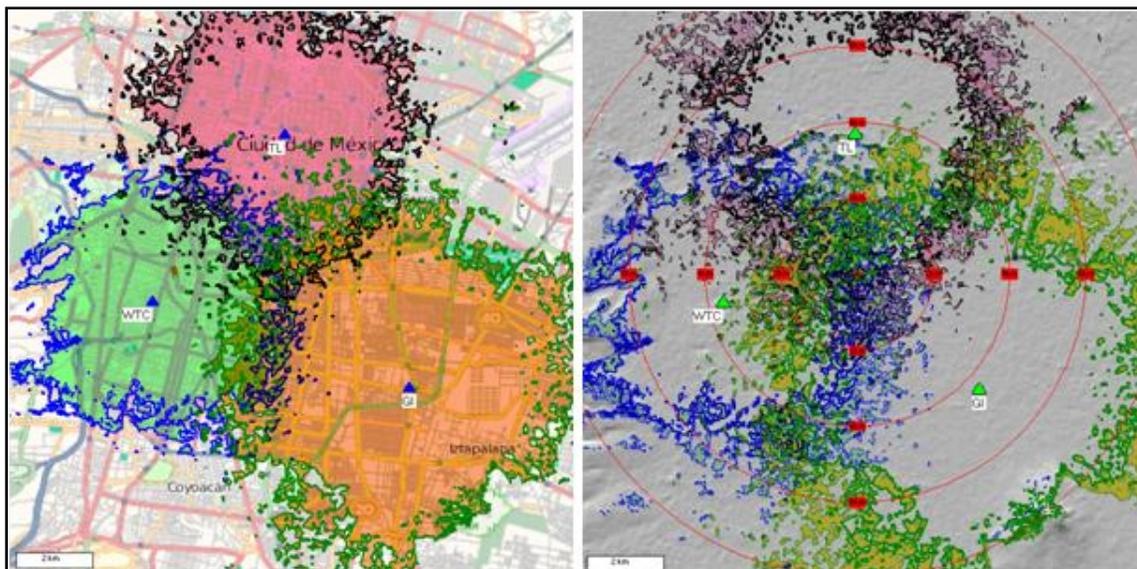


FIGURA 4.7. Predicción de cobertura para el escenario de red SFN_4.

El área de la que se dispondría para realizar las medidas con los escenarios SFN_1 y SFN_2 tiene prácticamente la misma extensión, la cual permite hacer un estudio profundo de la Ganancia de Red. Esto se debe a que se obtendrá una gran cantidad de datos con las medidas que se planifiquen y porque, por un lado, estos datos darán una amplia información de la relación de las tres señales individuales que se reciban en la red SFN; y por otro lado, los datos se tomarán en diversos entornos urbanos de recepción. El escenario de red SFN_2 se seleccionó para realizar la planificación de las medidas, ya que su uso implicaría una reducción de potencia de transmisión frente al uso del escenario SFN_1.

La potencia de transmisión que se determinó como apropiada para cada uno de los tres sitios de transmisión del escenario SFN_2 para la ejecución de la campaña está en la tabla 4.5:

TABLA 4.5. PIRE para los tres sitios de transmisión que se usaron en la planificación de la campaña de pruebas.

Sitio Transmisor	PIRE [W]	
	Modo 4-QAM	Modo 16-QAM
ACIR	70	350
IPN	45	225
TL	25	125

Con estos valores de potencia los tres sitios en conjunto cubren toda el área al interior del triángulo que forman y algunas zonas exteriores, por lo tanto, en toda esta área es posible realizar un estudio de la Ganancia de Red. La figura 4.8

ilustra la cobertura que, de acuerdo a la predicción de campo, se tendría sobre la ciudad para la realización de las medidas.

Cabe mencionar que pudieron fijarse otras relaciones entre la potencia de los sitios para lograr un área de cobertura de características similares. Por ejemplo, con una PIRE de 60 W para ACIR, de 40 W para IPN y de 30 W para TL. Pero se decidió subir la potencia de ACIR y de IPN, debido a que el primero es el sitio que menor alcance presentó de los tres usando la misma potencia de transmisión; y porque el segundo requiere tener un mayor alcance por la restricción de recepción que el cerro le impone hacia el este.

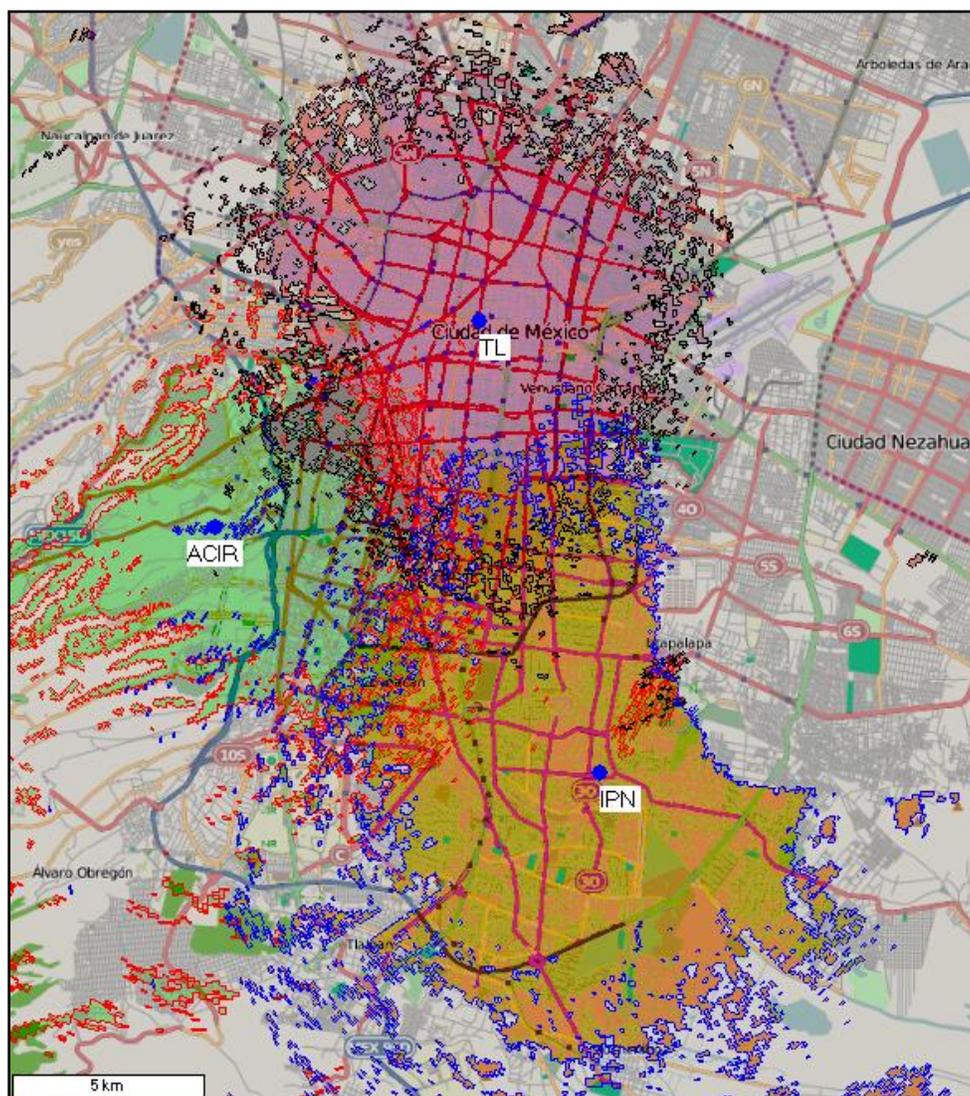


FIGURA 4.8. Área de cobertura para hacer las mediciones con los modos 4-QAM y 16-QAM.⁸

⁸ Con los valores de la tabla 4.5 la cobertura con los dos modos de transmisión de DRM+ es prácticamente idéntica, por lo tanto, la figura representa ambos casos.

Finalmente, hay que apuntar que los valores de potencia que se proponen en la tabla 4.5 pueden conseguirse utilizando un equipo transmisor de baja potencia de FM de la marca Nautel⁹. Por ejemplo, el modelo VS1 de 1KW de potencia, que se usó en [27]. Nautel es miembro del Consorcio DRM y en prácticamente todas las pruebas de campo con DRM+ se han utilizado sus equipos transmisores [51].

4.5 Resumen de los Requerimientos de Cobertura y de Potencia de la Red de Transmisión para las Pruebas.

En este capítulo se definieron los requerimientos de cobertura y potencia de la red de transmisión que se usaría para la campaña de pruebas de campo. En resumen, para un conjunto de tres sitios de transmisión se determinó la potencia que se necesita en cada uno de ellos para generar las condiciones de cobertura adecuadas, de acuerdo a los objetivos de la campaña, en el área donde quedará definida la metodología de medición.

Los tres sitios se seleccionaron entre todas las estaciones trasmisoras de FM que se ubican en la Ciudad de México. En este sentido, la utilidad de la planificación de la campaña es que está planteada sobre las condiciones de la ciudad y por esto, puede aprovecharse y/o adaptarse para realizar pruebas con redes SFN.

Para evaluar y comparar los sitios de FM se hicieron predicciones de campo eléctrico con el software libre Radio Mobile ver.11.05, el cual está basado en el modelo de propagación ITS Irregular Terrain Model o Modelo Longley-Rice. Para esto, se estableció, con base en los parámetros de planificación de DRM+, que el umbral de campo eléctrico para el modo de transmisión 4-QAM sería de 42 dB μ V/m y que para el modo 16-QAM sería de 49 dB μ V/m.

Los parámetros que están definidos en el software se fijaron de tal forma que la predicción de campo fuera objetiva y general. En todos los casos, se estimó con una antena transmisora omnidireccional con ganancia de 0 dBi y situada a una altura de 50 m; y se calculó con una antena receptora de altura de 1.5 m. Por otro lado, no se fijó un canal de frecuencia específico dentro de la banda de FM.

El objetivo de evaluar los sitios de FM fue seleccionar el trío que presentara las condiciones más apropiadas para la planificación. En este sentido, a cualquier conjunto de tres sitios de transmisión se le llamó escenario de red, puesto que cada conjunto tiene características particulares. Los dos criterios generales que se usaron para seleccionar el escenario de red fueron la distancia entre sus sitios de transmisión y la topografía del entorno donde éstos se ubican.

Los sitios que están ubicados en terrenos accidentados se descartaron para ser candidatos para formar un escenario de red por dos razones. Primero, porque se quiere que los datos obtenidos con las medidas sean fiables y un terreno con

⁹ Página web oficial: www.nautel.com.

demasiados obstáculos no puede garantizar esta condición. Y segundo, porque estos sitios necesitan potencias de transmisión altas para proveer una buena calidad de recepción en sus cercanías, pero, esto conlleva a que el área de cobertura se extienda, y en el caso de la red SFN, pueda traslaparse demasiado con el área de cobertura de otro sitio.

Se formaron cuatro escenarios de red que son representativos de prácticamente todas las relaciones de la forma triangular y las dimensiones del área de medición que pueden obtenerse con todos los sitios de FM que están ubicados en terrenos llanos. Los cuatro escenarios servirían para realizar las pruebas de campo con la red SFN, sin embargo, se compararon sus características de área de cobertura para determinar el caso que da más ventajas para realizar las medidas con base en los objetivos de la campaña que se plantearon.

Básicamente, se persiguieron tres objetivos para el área de cobertura que son importantes para la medición de la Ganancia de Red: que las señales se superpongan con niveles de campo próximos al umbral para ambos modos de transmisión; que no hayan zonas extensas de traslape entre las coberturas de los sitios, y que no hayan zonas extensas donde sólo se reciba desde un transmisor.

Para lograr que las condiciones de cobertura sean muy similares para la transmisión con los modos 4-QAM y 16-QAM, la potencia que se usará con el modo 16-QAM será mayor por 7 dB (diferencia entre los dos umbrales de campo) que la que se usará con el modo 4-QAM. En otros términos, la potencia que se usará con 16-QAM será 5 veces la que se usará con 4-QAM.

Para los cuatro escenarios se probaron diferentes relaciones entre la potencia de sus tres sitios, de tal manera que se cubriera toda el área al interior de la red, pero que las tres áreas de coberturas individuales no se traslaparan demasiado. De la comparación de los escenarios se concluyó que una distancia promedio de 14 km y 11 km entre los tres sitios, ofrece un área de medición suficientemente amplia para hacer el estudio de la Ganancia de Red. Esto se debe a que en esta área se obtendrá un gran cantidad de datos de las medidas que se planifiquen, conteniendo información de la relación de las características de las tres señales que se reciban desde los transmisores, y de los efectos de diferentes entornos urbanos de recepción.

A pesar de que el escenario de red que se seleccionó tiene ciertas limitaciones debidas al terreno, el área de medición de la que se va a disponer se extiende, teniendo como centro al punto donde se une el área de cobertura de los tres transmisores, sobre un radio de 6 km al Oeste, de 8 km al Norte y al Este, y de 10 km al Sur.

En la tabla 4.6 se presentan la distancia entre los tres sitios transmisores de la red y la potencia de transmisión que se requeriría en cada uno de ellos, para

generar el área de cobertura sobre la que se definió la metodología de medición (Ver capítulo 5).

TABLA 4.6. Distancia entre los tres transmisores que se usaron en la planificación de la campaña y la PIRE que se estimó para cada uno de ellos.

Sitio Transmisor	PIRE [W]		Distancia entre los tres Sitios de Transmisión [Km]
	Modo 4-QAM	Modo 16-QAM	
ACIR	70	350	ACIR – TL: 8.7
IPN	45	225	ACIR – IPN: 11.9
TL	25	125	TL – IPN: 12.1

CAPÍTULO 5

Definición de la Metodología para la Medición en Campo

En este capítulo se expone la metodología para la medición en campo que se definió para la campaña de pruebas. Las directrices de la metodología están basadas en los objetivos de las pruebas, pero también en las posibilidades para medir que se tienen en la zona de la ciudad donde se ubica la red de transmisión. En resumen, en este capítulo se explican en qué situaciones de transmisión y recepción se va a realizar la medición de la señal de DRM+, qué parámetros de la señal se van a medir y cómo se van a medir.

El capítulo comienza con la descripción general de la metodología de medición, continúa con la distribución de las ubicaciones de las medidas sobre el área de medición, y termina, con el planteamiento de las condiciones para la medición de los parámetros de la señal.

5.1 Descripción General de la Metodología para la Medición en Campo

Para cumplir el objetivo principal de la campaña, que es medir la Ganancia de Red, se va a contrastar la recepción de la señal de DRM+ transmitida desde sólo un transmisor, con la señal transmitida desde los tres transmisores simultáneamente en red SFN, tal como se explicó en el capítulo 3. Para esto, la red de transmisión se va a operar en dos modos, denominados aquí, respectivamente, como *modo de transmisor único* y *modo SFN*. Con el modo de transmisor único se va a hacer la evaluación de la recepción en una red MFN, y dado que son tres sitios transmisores, la red se va a configurar para trabajar en cuatro diferentes escenarios de transmisión.

En la tabla 5.1 se resumen los cuatro escenarios de transmisión, cuya configuración se definió en función de cuántos y cuáles transmisores estarán en funcionamiento para realizar las medidas en turno. En síntesis, las medidas con el modo de transmisor único se van a llevar a cabo transmitiendo desde cada uno de los tres sitios de transmisión por separado (Escenarios de transmisión TX_1,

TX_2 y TX_3), mientras que, las medidas del modo SFN se van a realizar con los tres transmisores operando simultáneamente (Escenario de transmisión SFN).

TABLA 5.1. Descripción de los cuatro escenarios de transmisión para medir la recepción de la señal de DRM+. ¹⁰

Nombre del Escenario de Transmisión	Modo de Operación de la Red en el Escenario de Transmisión	Descripción del Escenario de Transmisión
TX_1	Transmisor único	Sólo el sitio <i>ACIR (TX1)</i> está activo
TX_2	Transmisor único	Sólo el sitio <i>TL (TX2)</i> está activo
TX_3	Transmisor único	Sólo el sitio <i>IPN (TX3)</i> está activo
SFN	SFN	Los tres sitios de transmisión están activos

La señal de DRM+ se va a medir en recepción estática y en recepción en movimiento. En cada una de las medidas definidas sobre el área, tanto estática, como móviles, se va a medir la señal con los cuatro escenarios de transmisión de la tabla 5.1. La recepción estática se va a realizar en ubicaciones específicas distribuidas en toda el área de medición, en tanto que, la recepción móvil se va a llevar a cabo siguiendo ciertas rutas. En los dos tipos de recepción se van a medir los mismos parámetros de la señal de DRM+ empleando una camioneta provista de todo el equipo necesario para registrar las medidas (Ver sección 5.3).

Para registrar las medidas estáticas la camioneta permanecerá estacionada por un lapso de 3 minutos en cada una de las ubicaciones previstas. Para las medidas estáticas de la señal de DRM se recomienda una duración de varios minutos para tomar en cuenta la influencia de factores externos como el tráfico que pasa cerca de la unidad de medidas [52]. Se decidió esta duración porque se considera adecuada para evaluar la variabilidad de la señal en tiempo, debido a que ésta no es muy alta, pero también porque este tiempo se ha usado en otras pruebas con DRM ([48], [53]) y en pruebas de SFN con DTV ([37], [54]).

Por otra parte, las medidas móviles se estarán registrando en la totalidad del recorrido que se siga con la camioneta. Obviamente, la longitud de las rutas, la velocidad de la camioneta y las condiciones de tráfico y semáforos de la ciudad, determinarán la cantidad de los datos que se registren, independientemente del escenario de transmisión que se empleé. Por esta razón, tal como se explicó en el capítulo 3, en el análisis de estas medidas las rutas se van a dividir en segmentos. La situación es distinta en el caso de la recepción estática, en la cual el total de los datos que se tengan estará determinado por el número de medidas estáticas que se realicen.

¹⁰ Se dio otro nombre a los tres sitios (TX1, TX2 y TX3) para asociarlos de mejor manera en la red.

5.2 Planificación de las Medidas

Hasta ahora se han establecido las pautas muy generales que definen la metodología de medición, no obstante, en los siguientes apartados se abordan aspectos más concretos, como son las zonas dentro del área de cobertura de la red donde se planificaron las medidas y su localización específica en la infraestructura vial de la ciudad. También se calcula el tiempo que llevaría hacer las medidas para programarlas eficientemente y para estimar el tiempo total que requeriría la ejecución de la campaña de pruebas.

5.2.1 Definición de las Zonas de Medida y su Relación con los Escenarios de Transmisión

Las rutas de medida se planificaron de tal forma que con éstas se haga una evaluación suficiente de la recepción móvil en el área de cobertura de la red MFN, para que mediante el uso de las expresiones (3) y (4), se obtengan resultados generales y completos acerca de la Ganancia de Red de una red SFN operando con DRM+.

Un segundo aspecto que también se consideró en la planificación es que se espera que las medidas móviles puedan proveer datos útiles para estudiar la relación que tienen las características de intensidad de campo eléctrico y de retardo de recepción de las tres señales que se reciban en el escenario SFN con la calidad de recepción. Hay que tener presente que el multitrayecto debido al entorno va a provocar una variación no prevista de las características de las tres señales que se reciban en toda el área de medición. Por esta razón, se definieron rutas de medida en las cuales, si se omitiera la presencia de este multitrayecto, las características de las señales que se reciban guardarían cierta relación que será estudiada en el análisis de la Ganancia de Red.

A este respecto, en la sección 5.2.3, se exponen los valores de intensidad de campo eléctrico de la señal, que de acuerdo a la predicción realizada con el software Radio Mobile, se recibirán en las rutas de medida que se definieron.

Sin considerar el multitrayecto natural, la diferencia máxima entre el retardo de recepción de las señales que se recibirán con el escenario SFN está determinada por la máxima distancia que existe entre los sitios de transmisión de la red. De acuerdo a la tabla 4.3, dicha distancia es de 12.1 km (distancia entre TX1 y TX3). Con esta distancia habría una diferencia máxima de 40.33 μ s entre la recepción de las señales en cualquier ubicación. Según [30] en una red SFN el retardo de los ecos naturales está usualmente limitado a 20-30 μ s, por lo tanto, la dispersión temporal resultante de ambos efectos de multitrayecto difícilmente superará los 250 μ s, que es el intervalo de guarda de DRM+. No obstante, con los datos de las medidas se analizarán los efectos del esparcimiento del retardo de señal de DRM+ sobre la calidad de recepción.

Este análisis es importante ya que los efectos negativos del multitrayecto también se presentan en el dominio de la frecuencia. La superposición de varias señales produce reducciones periódicas en el espectro, cuya dimensión depende básicamente del espaciamiento de retardo. Si el ancho de banda de la señal es mucho mayor comparado con inverso del espaciamiento de retardo, estos desvanecimientos afectarán sólo una pequeña fracción del espectro, pero, conforme el espaciamiento de retardo sea menor, dicha fracción será mayor, hasta llegar a un valor para el cual el espectro sufra una degradación como un todo. Entonces, cuanto menor sea el ancho de banda ocupado por la señal, las consecuencias del multitrayecto pueden llegar a ser más dramáticas [55].

En la figura 5.1 se ilustran las zonas dentro del área de medición en las que, se definieron las rutas para medir la señal de DRM+ en recepción móvil.

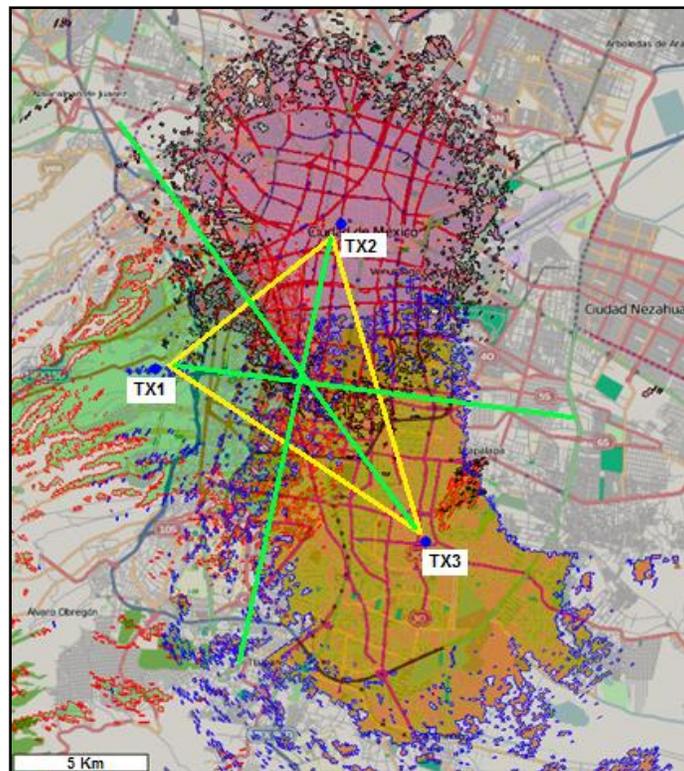


FIGURA 5.1. Zonas objetivo para medir la señal de DRM+ en recepción móvil dentro del área de medición de la campaña.

Se definieron tres rutas trazadas en amarillo, las cuales parten de un sitio de transmisión para llegar a otro. Teóricamente, conforme se avance sobre estas rutas el campo eléctrico que se reciba desde el transmisor al que se dirija la camioneta aumentará con relación al campo eléctrico que se reciba desde el transmisor del cual se haya iniciado el recorrido. Debido a que la distancia al transmisor de destino se irá acortando, lo mismo sucederá con el retardo de recepción de su señal, mientras que, el retardo de la señal del transmisor de

inicio se irá incrementando. Por otra parte, el campo eléctrico y el retardo de recepción de la señal del tercer transmisor no cambiarán demasiado a lo largo de todo el recorrido.

Cada una de las tres rutas que están trazadas en verde inicia en un sitio transmisor y se aleja de él radialmente en una orientación tal que sigue toda la zona de traslape del área de cobertura de los otros dos sitios de transmisión. Conforme la camioneta se aleje del transmisor del que haya partido, el campo eléctrico de la señal de éste irá disminuyendo y su retardo de recepción irá aumentando, mientras tanto, se espera que estos parámetros varíen en igual proporción para las otras dos señales a lo largo de todo la ruta.

El objeto de medir en cada ruta con los tres escenarios de transmisor único es conocer la calidad de recepción con la red MFN en toda el área, pero también contar con las características de los tres canales de propagación en todos los segmentos de ruta, con el fin de realizar un estudio profundo mediante el uso de las expresiones (5), (6) y (8), sobre la recepción de DRM+ en una red SFN. En cada escenario de transmisor único se evaluará la recepción de la señal en tres direcciones radiales a su transmisor respectivo, y en dos recorridos que rodean los límites del área de cobertura del mismo, lo que supone un estudio amplio y suficiente de la cobertura de la red MFN.

En estas circunstancias, en cada segmento de ruta de medida se tendrá un valor de AQ (Parámetro definido para medir la calidad de audio de DRM, ver capítulo 3), para cada uno de los escenarios de transmisión TX_1, TX_2 y TX_3, entonces, en el cálculo de la Ganancia de Red, a través del uso de las expresiones (3) y (4), se usará el valor más alto entre los tres para representar el valor de AQ del segmento de ruta en la red MFN. Este criterio se decidió porque, pese a que en una red MFN se espera que el transmisor más cercano al receptor sea el que provea la mejor calidad de servicio, no en todas las ubicaciones sucede esto, especialmente en la frontera del área de cobertura de dos transmisores vecinos.

En lo que respecta a las medidas estáticas, éstas se planificaron para evaluar en recepción fija la señal de DRM+, tanto en la red MFN, como en la red SFN, y obtener resultados de su comparación. Con la medición en los escenarios TX_1, TX_2 y TX_3, en cada ubicación se tendrán tres medidas de la intensidad de campo eléctrico con diferentes distancias al transmisor, por tanto, la totalidad de las medidas estáticas es una muestra suficiente para evaluar la recepción de la señal en la red MFN.

La variabilidad de la señal en recepción estática es mucho menor que la variabilidad de la señal en recepción móvil, por lo que con las medidas estáticas se medirá el incremento del nivel de campo eléctrico que se logra en el escenario SFN, como resultado de la contribución de las señales recibidas en los tres escenarios de transmisor único. No obstante, también se calcularán los umbrales

de recepción en los modos de transmisor único y en el modo SFN, y así, estudiar los efectos que las señales recibidas tienen sobre la calidad de recepción del escenario SFN.

Las medidas estáticas se pueden llevar a cabo en varios puntos aleatorios dentro del área de cobertura de los transmisores, pero para aprovechar los recorridos que se van a hacer para las medidas móviles, y debido a que las rutas se trazaron en las zonas que son interesantes en el estudio de la Ganancia de Red, las ubicaciones designadas medir la recepción estática se definieron a lo largo de todas las rutas.

5.2.2 Distribución de las Medidas dentro del Área de Cobertura

La planificación de las medidas se hizo con base en tres aspectos: las orientaciones de recorrido que se describieron sobre la figura 5.1, la infraestructura vial con la que dispone la ciudad y el área de cobertura que se espera tengan los tres sitios de transmisión de la red.

En la figura 5.2 se muestra la distribución de las medidas estáticas y móviles sobre una fotografía satelital de la zona donde se ubica la red de transmisión. La imagen está sombreada en tres colores para señalar los límites del área de cobertura de los tres sitios de transmisión. Específicamente, el verde, el rojo y el azul, corresponden a los transmisores TX1, TX2 y TX3, respectivamente. Por otro lado, las zonas de color más oscuro, que se ubican entre las áreas de color, indican el traslape de las áreas de cobertura.

La campaña no está dirigida a evaluar la recepción de la señal de DRM+ per se, sino a medir la señal en las zonas que tienen relevancia en el estudio de la Ganancia de Red, por lo que no es necesario hacer mediciones sobre trayectorias circulares o de forma compleja. Sin embargo, debido a que por razones obvias en la ciudad es imposible trazar rutas de medida rectilíneas, los trayectos que recorrerá la camioneta incluyen primordialmente las vías primarias cuyo sentido se ajuste en lo posible a la orientación de cada ruta.

Las ubicaciones para las medidas estáticas se distribuyeron en intervalos aproximadamente uniformes a lo largo de las rutas, previamente definidas, pero también tomando en cuenta las condiciones de cobertura debidas a los niveles de campo eléctrico de las señales en las zonas que atraviesa la ruta. Es decir, las ubicaciones se repartieron en las zonas de color, las zonas oscuras y las zonas sin color.

La tabla 5.2 resume las características de cada una de las rutas que se planificaron para las medidas móviles, y la tabla 5.3 resume las características del conjunto de ubicaciones que se definieron para las medidas estáticas. En total se definieron 9 rutas para las medidas móviles. Tres rutas inician en un sitio transmisor y terminan en otro (rutas 1, 2 y 3), mientras que, las otras seis rutas

son radiales a los sitios transmisores. A su vez, en total se definieron 64 ubicaciones para llevar a cabo las medidas estáticas.

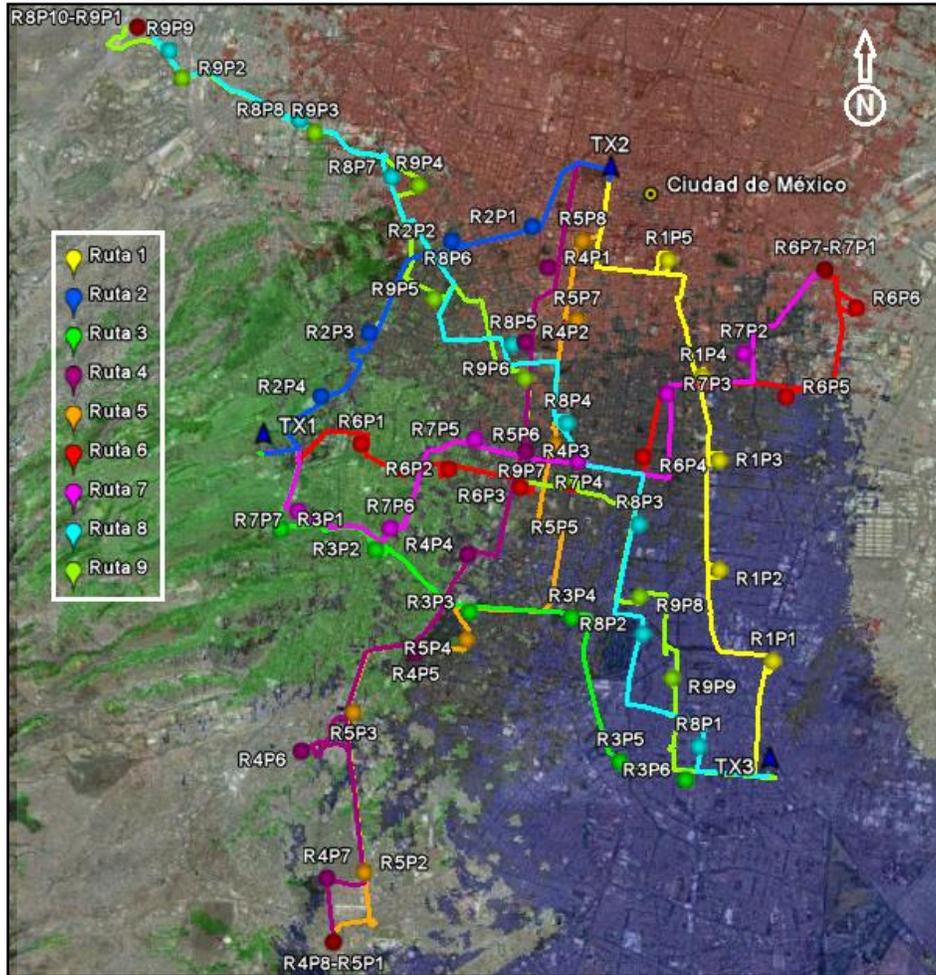


FIGURA 5.2. Ubicación de las medidas estáticas y móviles definidas dentro del área de medición. ^{11,12}

Las rutas 1, 2 y 3 se van a transitar, una tras otra, en un sentido tal que el recorrido inicie en un sitio transmisor dado y termine en ese mismo sitio transmisor. Esto se definió así con el fin de tener una ruta continua y cerrada para programar eficientemente la realización de las medidas. Por la misma razón, cada transmisor está asociado a un par de rutas radiales. Una ruta radial parte de su sitio transmisor respectivo y su punto final, es a su vez el inicio de la otra ruta radial (por ejemplo la ubicación R4P8-R5P1 es el inicio de la ruta 5), que tiene como destino el mismo sitio transmisor. Con la ruta radial de ida se medirá la recepción con el modo 4-QAM y con la de vuelta se hará lo propio con el modo 16-QAM, en ambos casos con el mismo escenario de transmisión. A este respecto,

¹¹ La fotografía se obtuvo con el Software *Google Earth V.6.0.3.2197*.

¹² Los nombres de las ubicaciones están compuestos por el número de ruta y el número del punto en la ruta. Por ejemplo, R9P6 es la ubicación 6 de la Ruta 9.

en la tabla 5.2 se observa la asignación del modo de transmisión de la señal de DRM+ que se va a recibir en cada una de las 9 rutas.

TABLA 5.2. Descripción de las rutas definidas para las medidas móviles.

Ruta	Longitud Aproximada [Km]	Número de Medidas Estáticas	Descripción de la Ruta
1	18.0	5	Va de TX3 a TX2; recibe 4-QAM y 16-QAM
2	12.2	4	Va de TX2 a TX1; recibe 4-QAM y 16-QAM
3	17.0	6	Va de TX1 a TX3; recibe 4-QAM y 16-QAM
4	22.4	8	Radial a TX2; va de TX2 a R4P8-R5P1; recibe 4-QAM
5	22.3	8	Radial a TX2; va de R4P8-R5P1 a TX2; recibe 16-QAM
6	19.4	7	Radial a TX1; va de TX2 a R6P7-R7P1; recibe 4-QAM
7	19.2	7	Radial a TX1; va de R6P7-R7P1 a TX1; recibe 16-QAM
8	27.4	10	Radial a TX3; va de TX2 a R8P10-R9P1; recibe 4-QAM
9	29.9	9	Radial a TX3; va de R8P10-R9P1 a TX3; recibe 16-QAM
Total: 187.8 Km		Total: 64	

TABLA 5.3. Resumen de las características de las medidas estáticas definidas para la campaña.

Número de Ubicaciones según las Condiciones de Cobertura			Número de Ubicaciones para cada Modo de Transmisión	
Cobertura de sólo un Sitio (Sitio Transmisor)			4-QAM	16-QAM
Cobertura de Dos o Tres Sitios			Sin Cobertura	
10 (TX1)	11 (TX2)	9 (TX3)	22	12
Total: 64 Ubicaciones para Medidas Estáticas			Total: 79 Medidas Estáticas	

En la tabla 5.2 se observa que las dos rutas radiales a cada transmisor tienen aproximadamente la misma longitud y el mismo número de ubicaciones para medidas estáticas. Con esto queda claro que el número de medidas estáticas que contiene una ruta es proporcional a su longitud.

Otro aspecto a apuntar es que hay una diferencia entre la longitud de las rutas radiales de los tres sitios transmisores. Por un lado, a la ruta 6 se le impuso un límite porque, tal como se describió en la sección 4.4, la región del Este está fuera de la recepción de la señal de TX3, lo que implica que en el escenario SFN una medición más extensa, prácticamente, sólo evaluaría la recepción de la señal de TX1. Por otro lado, para planificar la ruta 8 se emplearon varios tramos de los ejes viales de la ciudad, que están contruidos en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, ya que no hay vías diagonales, lo que resultó en una longitud mayor para las rutas 8 y 9. A pesar de estas situaciones, en el mapa se observa que con el

conjunto de todas las rutas se hará una amplia evaluación de la recepción al interior y al exterior del área de cobertura de la red.

Por otra parte, como se aprecia en la tabla 5.3, las ubicaciones para las medidas estáticas están distribuidas proporcionalmente para evaluar las condiciones de cobertura en la red SFN. Cerca de la mitad de las 64 ubicaciones está dividida aproximadamente igual entre la cobertura de cada uno de los tres sitios transmisores, lo que indica una evaluación consistente de toda la red. La otra mitad, 34 ubicaciones, está destinada a medir la señal en las zonas donde el nivel de campo de una señal no es dominante sobre el de las otras señales: 22 ubicaciones están en puntos donde se espera sean los límites de la cobertura de dos y tres sitios transmisores, y 12 ubicaciones están fuera del área de cobertura de la red, pero en regiones con posibilidades de recibir dos señales cuyo nivel de campo esté unos decibeles por debajo del umbral.

Asimismo, la evaluación de los modos 4-QAM y 16-QAM también es equitativa. Aunque, como se ve en la tabla 5.3, hay una diferencia de 15 unidades entre el total de las ubicaciones y el total de las medidas estáticas. Esto se debe a que las medidas de las rutas 1,2 y 3, que suman 15, se van a hacer tanto con el modo 4-QAM, como con el modo 16-QAM, a diferencia del resto de las rutas, en las que sólo se medirá con uno de los dos modos.

Todas las medidas se van a llevar a cabo en un ambiente urbano, sin embargo, al interior del área de medición hay regiones con diferentes grados de urbanización e infraestructura. Las medidas no se planificaron directamente con el propósito de diferenciar los efectos de las características del entorno sobre la recepción de la señal, no obstante, los resultados de las medidas inherentemente revelarán dichos efectos, lo que será benéfico para el análisis de la Ganancia de Red.

En la planificación se evitaron en lo posible algunas de las situaciones que pudieran afectar la recepción, tales como, vías con demasiados cruces subterráneos, que en [25] se demostró afectan la recepción de DRM+, las vías con circulación de trolebuses y las zonas industriales (al norte del punto R8P10-R9P1 comienza una importante zona industrial de la ciudad). Sin embargo, no es posible eliminarlos del todo y esto es adecuado porque las pruebas se realizarían en un ambiente de propagación realista. Por otro lado, en [48] se demostró que el tráfico vehicular aumenta la variabilidad de la señal y el nivel de ruido. A este respecto, las medidas móviles se harán sobre vías primarias, mientras que, en los alrededores de las ubicaciones de las medidas estáticas la densidad de tráfico será menor, ya que son puntos donde es permisible estacionar la camioneta.

La longitud total de las rutas supera los 180 km y considerando que sus medidas y las 79 medidas estáticas se realizarán con los cuatro escenarios de transmisión y con los modos 4-QAM y 16-QAM, se dedicó la sección 5.2.4 para exponer los detalles de la organización de la ejecución de toda la campaña de pruebas.

5.2.3 Condiciones de Cobertura Esperadas en las Medidas Planificadas

En este apartado se exponen las condiciones de cobertura que se recibirían en las medidas que se definieron, de acuerdo a los resultados de la predicción de campo eléctrico hecha con Radio Mobile. Los valores de campo eléctrico estimados indudablemente van a cambiar en la realidad por el efecto del entorno urbano, sin embargo, de ser necesario, un aumento en la potencia de transmisión lograría una cobertura en toda el área que está al interior de la red, y por lo tanto, los resultados de las medidas seguirían la tendencia que aquí se explica.

En la figura 5.3 están los niveles de campo eléctrico que se recibiría en la ruta 1 y en la figura 5.4 están los niveles que se recibirían en la ruta 8, en los dos casos en incrementos de 100 m sobre la totalidad del recorrido. Cada figura tiene tres gráficas que corresponden respectivamente a la recepción en los escenarios de transmisión TX_1, TX_2 y TX_3. En la escala vertical de la gráfica se da la diferencia, medida en dB, entre el valor de campo eléctrico que se recibiría en un segmento determinado respecto al umbral de campo. O sea, si el valor de campo está por encima de 0 dB, el nivel de campo recibido en el segmento de ruta sería superior al umbral. Cabe mencionar que las gráficas describen, tanto al modo 4-QAM, como al modo 16-QAM.

En el escenario TX_3 desde el arranque de las medidas sobre la ruta 1 hasta un recorrido de 4 km se recibiría un nivel de campo superior al umbral por lo menos por 15 dB, y de igual manera sucederá en el escenario TX_2 a partir de los 12 km y hasta el final de la ruta. Por esta razón, se espera que en el escenario SFN en estos dos tramos de la ruta, e incluso en kilómetros aledaños, el nivel de campo de la señal que se reciba esté dado esencialmente por la contribución de esta señal dominante, ya sea de TX3 o de TX2, puesto que dicha señal, con relación a las otras dos señales tendrá un nivel de campo superior entre 20 y 40 dB.

Sin embargo, en el tramo entre R1P2 y R1P5, la diferencia entre el nivel de las señales de TX2 y TX3 será menor a 15 dB porque ambas señales tendrán un valor de campo eléctrico alrededor del umbral. Entonces, entre estas dos ubicaciones la señal de TX1, que a lo largo de toda la ruta proveerá un nivel de campo en promedio 5 dB por debajo del umbral, será comparable con estas dos señales. En consecuencia, en dicho tramo el retardo relativo de las tres señales tendrá los valores más bajos de todo el trayecto y no habrá una señal aparentemente dominante, por lo que la superposición de las tres señales cobra importancia en el estudio de la recepción en la red SFN.

Por su parte, la ruta 8 inicia en TX3 por lo que en los segmentos iniciales, la señal de este sitio transmisor se recibirá con una intensidad de campo eléctrico alta, específicamente, hasta un trayecto de 13 km el campo eléctrico superará el valor del umbral. En tanto que la señal tanto de TX1, como de TX2, en todos los segmentos de la ruta se recibirá prácticamente con el mismo valor de campo, el

cual será cercano al umbral, siendo superior sólo en el tramo comprendido aproximadamente entre los 7 km y los 17 km, es decir, entre R8P3 y R8P6.

Con esto, se espera que en el escenario SFN los tres primeros kilómetros de la ruta el campo eléctrico esté determinado básicamente por la señal de TX3 porque ésta será superior a las otras dos por lo menos por 20 dB. A partir de este punto y hasta los 17 km, la diferencia entre el nivel de campo de la señal de TX3 y el nivel de la señal de TX1 o de TX2 será inferior a los 15 dB, por lo tanto, en la mayoría de estos segmentos no habrá una señal aparentemente dominante y las características de la señal de recepción dependerán de la superposición de la señal de los tres transmisores. En los últimos 10 kilómetros de la ruta, el valor de campo de las tres señales estará por debajo del umbral, sin embargo, la señal de TX3 tendrá un nivel inferior a las otras dos y un retardo de recepción mayor.

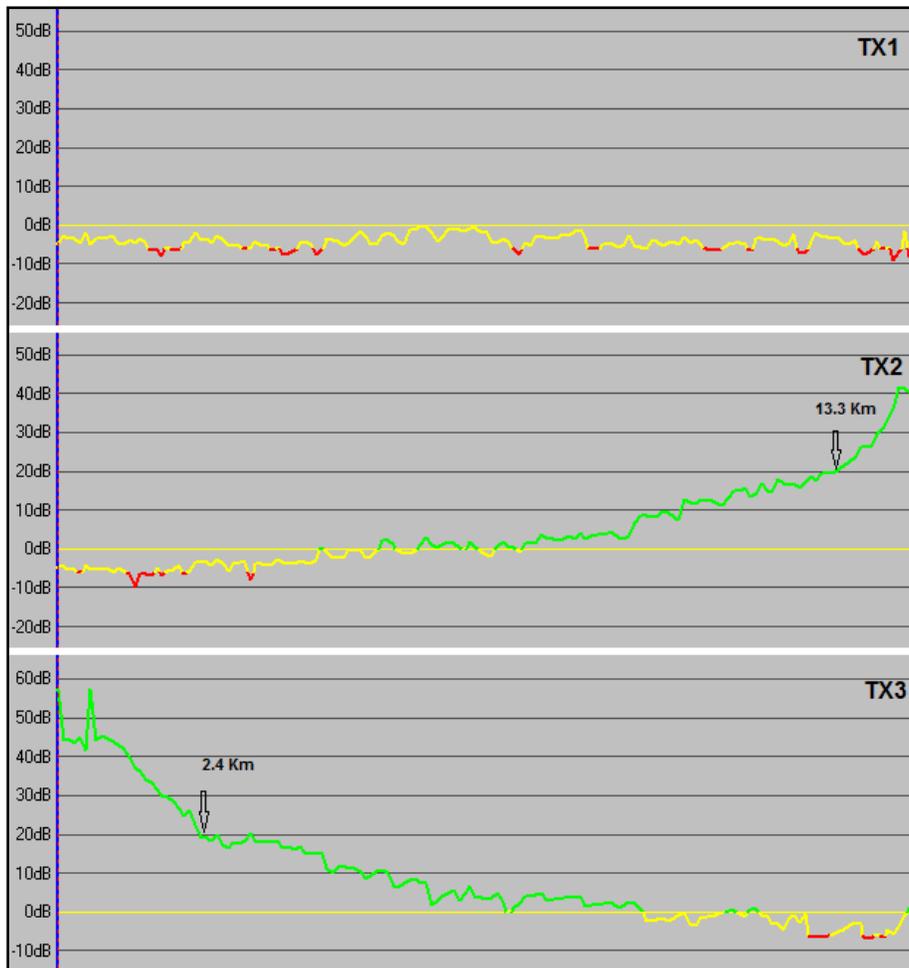


FIGURA 5.3. Predicción de campo eléctrico sobre la Ruta 1 en los escenarios de transmisión TX_1, TX_2 y TX_3.¹³

¹³ Verde si el campo eléctrico recibido es mayor al umbral; Amarillo si el campo recibido es menor al umbral hasta por 6 dB; Rojo si el campo recibido es menor al umbral por 6 dB o más.

En la prueba de red SFN con DRM+ realizada en Hannover en 2011, se encontró que el valor mediano de campo eléctrico medido con la recepción de dos señales, cuyo valor mediano de campo respectivo fue apenas superior al umbral (que en ese caso tuvo un valor de 35 dB μ V/m), resultó cercano al valor mediano de campo de las dos señales, es decir, no se incrementó considerablemente, no obstante, se registró una disminución en la tasa de los errores de recepción respecto de la recepción de cada señal por separado [44].

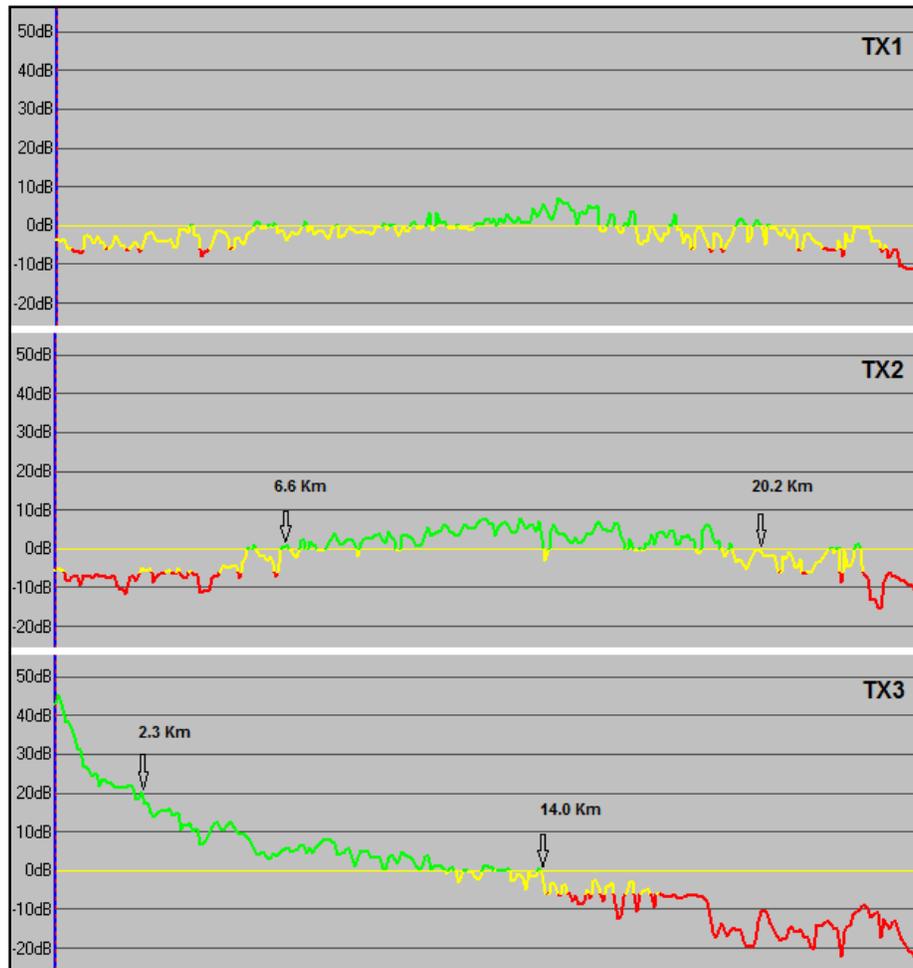


FIGURA 5.4. Predicción de campo eléctrico sobre la Ruta 8 en los escenarios de transmisión TX_1, TX_2 y TX_3.¹⁴

Por otro lado, en [42] se encontró que la recepción simultánea de tres señales de DVB, cuando la diferencia entre los dos valores medianos de campo más altos entre los tres recibidos fue menor a 9 dB, mejoró el MER hasta en 5 dB respecto del MER más alto entre los tres medidos con las señales por separado. En cambio, en [37] se encontró que la recepción de tres señales de DVB aumentó el umbral de recepción, sobre todo si la diferencia de campo eléctrico fue menor a

¹⁴ Ibidem.

15 dB. No obstante, hay que tener en cuenta que la señal de DVB tiene un ancho de banda de 8 MHz, mientras que, la señal de DRM+ tiene un ancho de banda de 100 KHz. En este sentido, es necesario estudiar cómo la relación de nivel de campo eléctrico y de retardo de recepción de las señales de DRM+ en la red SFN, determinan las características de la señal y afectan la calidad de recepción.

En las rutas 2 y 3 se darán circunstancias similares de recepción a que se describió para la ruta 1. De igual forma, la situación de la ruta 8, se asemeja a lo que se prevé que sucederá en las rutas 4 y 6; y también, en las rutas 5, 7 y 9, pero en sentido de recorrido inverso porque estas tres rutas terminan en un sitio transmisor.

5.2.4 Cronología de la Medidas

A continuación se describe el orden en el que se van a realizar todas las medidas de la campaña. Antes de la realización de las medidas que se planificaron deberán realizarse tareas que harán posible que la campaña se lleve a cabo, entre ellas, interconectar los sitios de transmisión en una arquitectura de red SFN, sincronizar en tiempo y frecuencia los tres transmisores, comprobar que la señal de DRM+ cumpla con la máscara espectral y equipar y caracterizar la camioneta de medidas. No obstante, como estas operaciones no pertenecen propiamente a la metodología de medición no se incluyen en esta programación de la campaña.

Primeramente, se van a hacer medidas con los tres transmisores inactivos y con el equipo medidor de campo eléctrico sintonizado en el canal de frecuencia que se utilizaría en las pruebas. El objetivo es medir el nivel de ruido artificial en el área de medición. El resultado de estas mediciones será útil para identificar las zonas que, por causas ajenas a las transmisiones de prueba, podrían afectar la recepción de DRM+ y después tomarlas en cuenta en el análisis de datos. Asimismo, podrían recibirse señales interferentes no previstas, y entonces, tomar medidas para minimizar sus efectos negativos, por ejemplo, cambiar algunas de las rutas, o en el peor de los casos, modificar el patrón de radiación de las antenas o usar otros sitios transmisores. Estas medidas de ruido se harán siguiendo todas las rutas que se definieron y en todas sus ubicaciones.

Otro paso previo a la realización de las mediciones es el ajuste de la potencia de los transmisores para buscar que el área de cobertura teórica de los tres apenas se traslape, es decir, tratar de lograr una cobertura como la de la figura 4.8. Nunca se conseguirá igualar la cobertura de esta figura, pero haciendo ciertas mediciones y ajustes, y considerando que las antenas transmisoras radiarán aproximadamente igual en todas las direcciones hacia el interior del área de medición, se asumirá que se tendrán las condiciones de cobertura adecuadas para realizar las medidas planificadas. El procedimiento consistirá en medir el campo eléctrico recibido desde cada transmisor sobre una ruta radial, e incrementar o disminuir la potencia de transmisión, hasta conseguir que se

reciba un campo eléctrico cercano al umbral a una distancia del transmisor muy aproximada al radio de cobertura que se muestra en la figura 4.8. De esta forma debería mantenerse la proporción de potencia entre los tres transmisores que se determinó en el capítulo 4.

Por ejemplo, se medirá el campo eléctrico en el escenario TX_3 sobre la Ruta 1 en ubicaciones donde sea permisible estacionar la camioneta y se determinará la distancia a TX3 donde se reciba un nivel similar al umbral, cuya ubicación se nombrará como P3. Después, se medirá el campo eléctrico en el escenario TX_2 sobre la Ruta 2 y deberá verificarse que la ubicación donde se reciba un nivel de campo cercano al umbral, cuyo nombre será P2, esté a una distancia de TX2 ligeramente menor a la distancia que hay de P3 a TX2. Por último, se medirá el campo en el escenario TX_1 sobre la Ruta 3 y se verificará que la distancia de TX1 a la ubicación donde se reciba un nivel de campo similar al umbral sea menor a la distancia de P2 a TX1.

Finalmente, se procederá a la ejecución de las medidas que se planificaron. Se hará el recorrido que une a las Rutas 1, 2 y 3, transmitiendo con el modo 4-QAM, primero en los tres escenarios de transmisor único y después con el escenario SFN. Luego se hará lo mismo pero con el modo 16-QAM. Posteriormente, se recorrerá un par de rutas que son radiales a un transmisor, primero en los tres escenarios de transmisor único y después con el escenario SFN. Luego se hará lo mismo con los otros dos pares de rutas radiales a los otros transmisores.

Para estimar el tiempo requerido para la realización de la campaña se calculó el tiempo estimado para cada medida y se multiplicó por el total de medidas. El tiempo de una medida móvil se calculó con la longitud de la ruta y una velocidad media de 50 Km/h y el resultado se multiplicó por 3 y 4. Se usaron estos dos factores porque el intervalo de tiempo que resulta de la multiplicación se consideró razonable para que la camioneta recorra las distancias en condiciones de tráfico normales en la Ciudad de México, generalizando una estimación para cualquier parte de la ciudad, es decir, para todas las rutas. A este intervalo de tiempo se sumó el tiempo de las medidas estáticas que se realizarán en cada ruta, asumiendo 10 minutos por cada ubicación de la ruta. Se pensó en un tiempo de 6 a 8 horas de trabajo por día.

La tabla 5.4 muestra los cálculos parciales de las medidas y el tiempo total que se estima para la campaña.

Se estima que todas las medidas de la campaña requieren de 25 días para su ejecución, considerando que, aunque el recorrido se haga en un menor tiempo y las medidas estáticas en un mayor tiempo del previsto, o viceversa, cada una de las medidas de la tabla 5.4 se hará en un solo día. Los 10 minutos reservados para las medidas estáticas son para prevenir que alguna de ellas tenga que

repetirse o que existan dificultades para encontrar un lugar donde estacionar la camioneta.

TABLA 5.4. Estimación del tiempo requerido para llevar a cabo la campaña de pruebas.

Medida	Tiempo Estimado [Hrs.]			Multiplicidad de la Medida	Días
	Para el Recorrido	Para las Ubicaciones	Total para la Medida		
Ruta1 – Ruta2 – Ruta3	2.8 – 3.8	2.5	5.3 – 6.3	Medida de Ruido, Medida de Cobertura y 4 Escenarios de Transmisión (Modos 4-QAM y 16-QAM)	10
Ruta4 – Ruta5	2.7 – 3.6	2.7	5.4 – 6.3	Medida de Ruido y 4 Escenarios de Transmisión	5
Ruta6 – Ruta7	2.3 – 3.1	2.3	4.6 – 5.4	Medida de Ruido y 4 Escenarios de Transmisión	5
Ruta8 – Ruta9	3.4 – 4.6	3.2	6.6 – 7.8	Medida de Ruido y 4 Escenarios de Transmisión	5
Total: 25 Días Estimados para la Campaña					

5.3 Parámetros de Medida

Para terminar con la exposición de la metodología de medición se van a establecer los parámetros que se van a registrar en las medidas. Dichos parámetros están divididos de acuerdo a la clase de información que proveerán: acerca de las características de la señal y del canal de propagación, de la calidad de recepción de la señal de DRM+ y de las características de la medida estática o del segmento de ruta.

La información de la señal y del canal de propagación se va a obtener midiendo la intensidad de campo eléctrico, el SNR, el espectro y la respuesta impulsional de canal. La información de la calidad de recepción de la señal de DRM+ se va a obtener con el AQ, que como se explicó en el capítulo 3 es el porcentaje de tramas de audio de DRM correctamente decodificadas del total de las transmitidas, con el MER y con los archivos de audio que se reciban. Por último, por medio de la posición y de la velocidad de la camioneta se podrán segmentar el total de datos de una ruta de medida para su posterior análisis.

Es común que estos parámetros se registren en las pruebas de campo de DRM y de DRM+. En esta planificación se incluyeron estos parámetros porque caracterizan correctamente la recepción de la señal de DRM+, y porque, para estudiar la Ganancia de Red, los parámetros de medición son los mismos cuando la señal se transmite desde sólo un transmisor que cuando se hace desde varios

transmisores en una red SFN, aunque, en el análisis de la recepción algunos parámetros son más importantes en este último caso. Por estas razones, el tipo de equipo de medidas que se usará en las pruebas es básicamente el mismo que se ha usado en otras pruebas de DRM+.

Se requerirán un equipo medidor de campo eléctrico, un receptor profesional de DRM+, una computadora, que servirá para controlar los equipos y almacenar los datos capturados en las medidas, y un receptor de GPS. La explicación del funcionamiento y de la configuración del sistema de medidas está fuera del alcance de esta tesis.

Como medidor de campo se va a emplear el receptor para pruebas ESVB *Rohde & Schwarz*, el cual se usó en ([22], [23], [26]). El ESVB mide el campo eléctrico en anchos de banda, entre otros, de 120 KHz y 300 KHz, que son cercanos al ancho de banda de la señal de DRM+, en tiempos de medida de 1 ms a 100 s, en 1, 2 y 5 pasos [56]. Con estas características se podría medir el campo eléctrico de la señal de DRM+ en intervalos cercanos a la duración de un símbolo OFDM, o sea, 2.5 ms, lo que significa una resolución muy alta para estudiar la variabilidad de la señal y observar la frecuencia y magnitud de los desvanecimientos de la señal con un único transmisor y con la red SFN.

El ESVB también servirá para hacer las medidas del nivel de ruido y del nivel de señal entregado por los transmisores, tal como se describieron en la sección 5.2.

Se usará el receptor profesional para pruebas de DRM+ basado en software de *RFmondial*¹⁵, miembro del Consorcio DRM. Prácticamente en todas las pruebas de campo que se consultaron en el Estado del Arte de esta tesis ([21], [22], [23], [25], [26], [27]) se usó este modelo de receptor, sin embargo, también existe el receptor de supervisión de DRM+ DT4120 del *Instituto de Circuitos Integrados de Fraunhofer* (IIS)¹⁶, que también es miembro del Consorcio DRM.

A pesar de que con el uso del receptor de *RFmondial* se requerirán equipos adicionales, como un *Front End*, a diferencia del receptor de *Fraunhofer* que ya tiene la etapa de recepción de RF integrada, provee un mayor número de los parámetros de recepción que están definidos en el protocolo *RSCI* (Receiver Status and Control Interface) de DRM+ que los que provee el DT4120. Esto se debe a que el DT4120 sólo opera con el *perfil R* del protocolo *RSCI* [57], en tanto que, el receptor de *RFmondial* es compatible con los *perfiles A, B, C, D, Q y R* [58]. El perfil R es el perfil de receptor mínimo y no contiene ningún valor de medida, en cambio, por ejemplo, el perfil A es el perfil normal y contiene todos los valores de medida definidos en el protocolo *RSCI* [49]. Dichos parámetros de medida son útiles para estas pruebas. Cabe mencionar que el ESVB puede funcionar como *Front End* para el receptor software de DRM+, así operó en ([22], [23]).

¹⁵ Página web oficial: www.rfmondial.com.

¹⁶ Página web oficial: www.iis.fraunhofer.de.

El receptor de DRM+ puede almacenar en un archivo las muestras IQ que recibe como señales de entrada y los datos definidos en el protocolo RSCI, que son útiles para analizarlos posteriormente. Por otro lado, la interfaz gráfica del usuario puede desplegar entre otros parámetros, el SNR, el MER, los errores de audio, el campo eléctrico, el espectro y la respuesta al impulso [58].

Finalmente, con el receptor de GPS se van a obtener referencias espaciales de las medidas. Respecto de la recepción estática se van a obtener las coordenadas de las ubicaciones donde se hagan las medidas, y respecto de la recepción móvil, se va a obtener la posición instantánea y la velocidad promedio de la camioneta, además de la distancia que se recorra en cada ruta. Con estos datos se podrán segmentar las rutas de medida en las redes MFN y SFN.

Cualquier modelo básico de receptor GPS será útil para esta tarea. Por ejemplo, en [48] se empleó el modelo GPS III Plus de *Garmin*, el cual tiene una exactitud menor a 15 m en la posición y cada segundo entrega una lectura¹⁷.

5.4 Resumen de la Definición de la Metodología para la Medición en Campo

En este capítulo se definió la metodología de medición que se va a seguir para realizar las pruebas de campo. En general, la metodología consiste en lo siguiente: la red de transmisión se va a operar alternadamente en cuatro diferentes escenarios de transmisión: en tres de ellos estará activo cada uno de los tres transmisores de la red, y en el cuarto caso los tres transmisores estarán activos. Es decir, habrá tres escenarios de transmisor único y un escenario SFN. En los cuatro casos la señal de DRM+ se va a transmitir en los modos 4-QAM y 16-QAM y se va a medir en recepción estática y en movimiento. Para realizar las medidas se va a emplear una camioneta equipada con el sistema de medidas necesario.

Las medidas estáticas se van a hacer con la camioneta estacionada en ubicaciones específicas durante un periodo de 3 minutos. Las medidas móviles se van a hacer recorriendo ciertas rutas planificadas en el área de medición. Todas las medidas definidas se van a realizar con los cuatro escenarios de transmisión.

En la planificación de las rutas se tomaron en cuenta dos aspectos: que con ellas se haga una evaluación suficiente de la recepción móvil de la señal en la red MFN, y que la relación de las características de nivel de campo eléctrico y de retardo de recepción de las tres señales que se reciban en ellas, en el escenario SFN, pueda ser estudiada en el análisis de la Ganancia de Red. Para esto, se definieron dos tipos de rutas: una ruta que inicie en un sitio transmisor y termine en otro sitio transmisor, con esto, todos los puntos de su recorrido estarán más o menos equidistante del tercer sitio de transmisión; y una ruta que parta

¹⁷ Las especificaciones se consultaron en: www.garmin.com.

radialmente de un sitio transmisor, de tal forma que todos los puntos de su recorrido sean más o menos equidistantes a los otros dos sitios transmisores.

Obviamente, sobre la ciudad es imposible trazar rutas rectilíneas, por esto, las rutas se planificaron siguiendo las vías primarias de la ciudad. En total se definieron 9 rutas para hacer las medidas móviles, 3 rutas que van de un sitio transmisor a otro y otras 6 que son rutas radiales a los transmisores, dos rutas por cada transmisor. En las 3 rutas que unen a los transmisores se va a medir la recepción de los modos 4-QAM y 16-QAM, mientras que, en las rutas radiales que parten de los transmisores se va a medir la recepción de 4-QAM y en las rutas radiales que llegan al transmisor se medirá la recepción del modo 16-QAM. La longitud total de las 9 rutas supera ligeramente los 180 km.

Las ubicaciones destinadas a las medidas estáticas se definieron sobre todas las rutas, de tal manera que la longitud de una ruta es proporcional al número de medidas estáticas que tiene sobre su recorrido. No obstante, la posición específica de las ubicaciones se seleccionó de tal forma que se evaluará la recepción estática de DRM+ equitativamente en toda el área de medición.

En total se definieron 64 ubicaciones para medir la recepción estática. Con base en las condiciones de cobertura resultantes de la predicción que se hizo en el capítulo 4, de las 64 ubicaciones, 30 están dentro del área de la cobertura de un solo transmisor, 22 están en la zona de traslape de dos o tres transmisores y 12 están fuera del área de cobertura de cualquiera de los transmisores. Debido a que en tres de las rutas se van a medir los dos modos de transmisión, las medidas estáticas suman 79, de las cuales 40 son para 4-QAM y 39 para 16-QAM.

En la planificación de las medidas se evitaron en lo posible las situaciones que pudieran afectar la recepción de DRM+, como son las vías con demasiados cruces subterráneos, las vías con circulación de trolebuses y la recepción en zonas industriales. Sin embargo, es imposible eliminar su presencia del todo y esta situación es benéfica porque se obtendrán resultados realistas.

Antes de realizar las medidas, se van a recorrer todas las rutas y se va a parar la camioneta en las ubicaciones definidas teniendo los tres transmisores inactivos y los equipos de medición sintonizados en el canal de frecuencia usado en las pruebas. El propósito es medir el nivel promedio de ruido en el área de medición e identificar posibles señales interferentes. También, recorriendo las rutas que unen a los sitios transmisores y midiendo el nivel de campo eléctrico que se reciba desde ellos, se va a ajustar la potencia de los tres transmisores con el fin de tratar de conseguir las condiciones de cobertura que resultaron en la predicción de campo eléctrico, ya que con base en ellas se planificaron las medidas.

Se estimó que la campaña de pruebas requeriría de 25 días para su ejecución, con jornadas de trabajo de 6 a 8 horas.

En las medidas se va a registrar la intensidad de campo eléctrico, el SNR, el espectro, la respuesta impulsional de canal, el MER, el AQ, que es el porcentaje de tramas de audio de DRM que fueron correctamente decodificadas del total de tramas de audio que fueron transmitidas, y la posición y la velocidad de la camioneta de medidas. La configuración del sistema de medida no es parte de esta tesis, sin embargo, se definió que el equipamiento de medición ideal para estas pruebas esté compuesto del medidor de campo eléctrico ESVB de *Rohde & Schwarz*, el receptor profesional para pruebas de DRM+ basado en software de *RFmondial* y un receptor de GPS básico.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

En esta tesis se ha planificado una campaña intensiva de pruebas de campo para estudiar la Ganancia de Red de una red SFN operando con el estándar de radio digital terrestre DRM+ en la banda II de VHF. La razón de esto es que hasta ahora no se ha hecho ningún estudio de campo profundo y científico acerca del rendimiento de una red SFN con DRM+. Esta planificación sienta las bases para realizar una campaña de pruebas que cumpla este objetivo.

El alcance y contenido de la planificación es la metodología de cálculo y análisis de la Ganancia de Red, la estimación de los requerimientos de cobertura y potencia de la red de transmisión y la metodología de medición en campo.

Las características generales de la campaña de pruebas que se planificó son:

- ◆ Planificación de las medidas realizada para la Ciudad de México.
- ◆ Red SFN con tres emplazamientos de transmisión.
- ◆ Hacer el estudio para los dos modos de transmisión definidos en el estándar DRM+: 4-QAM y 16-QAM.
- ◆ Medir la señal en recepción estática y móvil, tanto en la red MFN, como en la red SFN.
- ◆ Se estima que el tiempo total para la ejecución de la campaña es de 25 días.

Para calcular y analizar la Ganancia de Red se proponen dos métodos. Con un método la Ganancia de Red se calcula como el incremento de cobertura que se obtendría con la red SFN en comparación con la red MFN. Mientras que, con el otro método, la Ganancia de Red se calcula como el incremento entre la calidad de audio, que se obtendría con la red SFN y con la red MFN, en todas las localizaciones al interior del área de medición; y se analiza en función de la intensidad de campo y de retardo de recepción de las señales de los tres transmisores.

Con este estudio se obtendrán conclusiones cuantitativas y cualitativas sobre las ventajas y desventajas de transmitir la señal de DRM+ en una red SFN, tomando en cuenta principalmente la calidad del servicio. Asimismo, los resultados contribuirán al conocimiento que se tiene del desempeño de las redes SFN para

cualquier sistema de radiodifusión digital terrestre. Y por otra parte, los datos de las medidas que se realizarán para estudiar la Ganancia de Red también servirán para hacer un estudio de la variabilidad de la señal y de los umbrales de recepción de DRM+ en la red MFN y en la red SFN.

Como parte de la planificación se hizo una predicción de campo eléctrico con el software Radio Mobile ver.11.05, el cual está basado en el modelo de propagación por radio ITS Irregular Terrain Model o Modelo Longley-Rice. Este software toma en cuenta el perfil del terreno pero no su morfología. Con base en los parámetros de planificación de DRM+, se usaron 42 dB μ V/m y 49 dB μ V/m como el valor para el umbral de campo eléctrico para los modos 4-QAM y 16-QAM, respectivamente. Los resultados de la predicción se obtuvieron para los valores de campo eléctrico que superarían el umbral el 95% de tiempo en el 95% de las localizaciones. Esto es porque DRM+, por ser un sistema digital, requiere altos niveles de señal para proveer una buena calidad de servicio.

La planificación de la campaña está basada en una red SFN de prueba de tres sitios transmisores. Para obtener bases realistas para la planificación, se hizo una evaluación y una comparación de las características de cobertura de varios sitios de transmisión de FM de la Ciudad de México, ya que estas ubicaciones han probado ser propicias para proveer servicios de radiodifusión en esta ciudad.

Las condiciones de medida que se buscaron fueron que las señales de los tres transmisores que constituirían la red se superpusieran con intensidades de campo alrededor del umbral, que las zonas con esta superposición no fueran muy extensas, y que dichas zonas se extendieran en la misma proporción sobre el área de cobertura de cada uno de los transmisores. Como solución a estos requerimientos de cobertura se determinó un conjunto de tres transmisores situados sobre un terreno más o menos llano, que están separados 8.7, 11.9 y 12.1 km, entre sí, y que forman un triángulo casi simétrico.

Con la elección de estos sitios transmisores de FM específicos y las estimaciones de cobertura realizadas, se determinó que la PIRE requerida para operar los tres transmisores con el modo 4-QAM es 25, 45 y 70 W. En tanto que, para el modo 16-QAM la PIRE requerida es de 125, 225 y 350 W. Es decir, la potencia para el modo 16-QAM es 5 veces la potencia para el modo 4-QAM. Por los efectos del entorno urbano, que no tiene en cuenta el método de estimación de cobertura que se usó, en la realidad se requerirán potencias de transmisión más altas, sin embargo, usando los equipos transmisores de DRM+ que hay en el mercado se pueden solventar estos ajustes de potencia.

La metodología de medición se definió para hacer una evaluación de la recepción de DRM+ en una red MFN y en una red SFN. Para esto, se medirán los parámetros de la señal recibida, alternadamente, desde cada uno de los tres sitios transmisores (caso de red MFN), y también, se medirán los parámetros de

la señal recibida, simultáneamente, desde los tres sitios transmisores (caso de red SFN). Todas las transmisiones se harán usando el mismo canal de frecuencia y en todas se recibirá la señal en la mismas ubicaciones.

Las mediciones de recepción estática se realizarán por un periodo de 3 minutos en ubicaciones definidas y las mediciones móviles se harán recorriendo rutas también pre-definidas.

Las rutas se trazaron de tal manera que con sus medidas sea posible evaluar la recepción de DRM+ en la red MFN, y además, que las relaciones de intensidad de campo y de retardo de recepción de las tres señales permita realizar el estudio de la Ganancia de Red. Es decir, las rutas de medida proveerán los datos requeridos para el uso de los dos métodos propuestos para el cálculo de la Ganancia de Red.

Se planificaron 9 rutas de medida, cuya longitud total supera los 180 km. Sobre estas rutas se definieron 64 ubicaciones para medidas estáticas. Todas las medidas están distribuidas proporcionalmente sobre toda el área de medición. De las 9 rutas, 3 parten de un sitio transmisor y terminan en otro; y las otras 6 rutas son radiales a los tres sitios transmisores. De las 64 ubicaciones, 30 están en el área cubierta por sólo un transmisor, 22 están en el área de cobertura de dos o tres transmisores y 12 están fuera del área de cobertura de cualquiera de los tres transmisores.

Los parámetros de la señal de DRM+ que se van a medir son la intensidad de campo eléctrico, el SNR, el espectro de la señal y la respuesta impulsional del canal. Los parámetros de la recepción que se medirán son el MER y el AQ (Audio Quality), que es un parámetro usado en pruebas de campo de DRM y que está definido como el porcentaje de tramas de audio que se decodificaron correctamente, del total de tramas de audio que fueron transmitidas. Y también se capturarán la posición y la velocidad de la unidad móvil de medidas.

La campaña de pruebas se planificó con base en las condiciones de la Ciudad de México, sin embargo, las bases de esta planificación pueden fácilmente usarse para realizar la planificación de las medidas en otra ciudad. Además, específicamente en la Ciudad de México, es relativamente sencillo adaptar esta planificación para la operación de la red con el estándar IBOC.

Referencias

1. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-R BS.774-2, *Necesidades del servicio relativo a la radiodifusión sonora digital para receptores a bordo de vehículos, portátiles y fijos, mediante transmisores terrenales, en las bandas de ondas métricas y decimétricas*. 1995.
2. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-R BS.1348-1, *Requisitos de servicio de la radiodifusión sonora digital para frecuencias inferiores a 30 MHz*. 2001.
3. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-R BS.1114-6, *Sistemas de radiodifusión sonora digital terrenal para receptores en vehículos, portátiles y fijos en la gama de frecuencias 30-3000 MHz*. 2007.
4. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-R BS.1514-1, *Sistema para radiodifusión sonora digital en las bandas de radiodifusión por debajo de 30 MHz*. 2002.
5. *Digital Audio Broadcasting, principles and applications*. Ed. Hoeg, W. y Lauterbach, T., Jhon Wiley & Sons. ISBN 0 471 85894 3. 2001.
6. Fischer, W., *Digital Video and Audio Broadcasting Technology. A practical engineering guide*. 2ª edición. Springer. ISBN 978-3-540-76357-4. 2008.
7. Fernández, J. M., Capdevila, J., García, R., Cabanillas, S., Mata, S., Mansilla, A. y Fernández, J. M., *Single Frequency Networks for Digital Video Broadcasting*, en DVB-T Field Trials Around the World. DVB Project Office. Geneva, Switzerland. Junio de 1999.
8. European Telecommunications Standards Institute. EN 300 401 V1.4.1, *Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers*. Enero de 2006.
9. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recomendación UIT-R BO.1130-4, *Sistemas de radiodifusión digital por satélite para receptores instalados en vehículos, portátiles y fijos en las bandas atribuidas al servicio de radiodifusión (sonora) por satélite en la gama de frecuencias 1400-2700 MHz*. 2001.
10. European Telecommunications Standards Institute. ES 201 980 V3.1.1, *Digital Radio Mondiale (DRM); System Specification*. Agosto de 2009.
11. Ikeda, T., *Transmission System for ISDB-TSB (Digital Terrestrial Sound Broadcasting)*, Invited Paper. Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 1. Enero de 2006.
12. National Radio Systems Committee. NRSC-5-B, *In-Band/On-Channel. Digital Radio Broadcasting Standard*. Abril de 2008.
13. Johnson, S. A., *The structure and generation of robust waveform for AM In Band On Channel digital broadcasting*, White Paper disponible en www.ibiquity.com (Consultada en Agosto de 2010).
14. Peyla, P. J., *The structure and generation of robust waveform for FM In Band On Channel digital broadcasting*, White Paper disponible en www.ibiquity.com (Consultada en Agosto de 2010).
15. German DRM Platform, DRM+ Technical Expert Group. *Planning Parameters for DRM Mode E ('DRM+'). Concerning the use in VHF Bands I, II and III*. V.3.0. 4 de Mayo de 2011.
16. Digital Radio Mondiale. *Digital Radio Mondiale (DRM). A broadcaster's guide. v.1.1*. Junio de 2010. Disponible en www.drm.org (Consultada en Noviembre de 2011).

17. Maier, F., Waal, A. y Pagel, D., *DRM+ Field Trial Hanover*. 2008. Disponible en www.rfmondial.com (Consultada en Marzo de 2011).
18. Steil, A., Schad, F., Feilen, M. y Hedrich, E., *Leaving the dead-end street: New ways for the digitisation of the VHF-FM sound broadcasting with DRM+. Part I: DRM+ Field Trial: Concept, Setup, and First Results*. Informe para 9th Workshop Digital Broadcasting of Fraunhofer IIS. Erlangen, Alemania. 18-19 de Septiembre de 2008.
19. Steil, A., Lehnert, J., Schad, F., y Köhler, M., *Leaving the dead-end street: New ways for the digitisation of the VHF sound broadcasting with DRM+. Part I: Field trials on DRM+ coverage*. Report for 10th Workshop Digital Broadcasting of Fraunhofer – Institute for Digital Media Technology IDMT. D-98693. Ilmenau, Alemania. 16-17 de Septiembre de 2009.
20. Digital Radio Mondiale. *Press summary: DRM+ successfully trialled in Paris*. 12 de Junio de 2009.
21. Maier, F., *First DRM+ trial in the Asia-Pacific Region. Colombo, Sri Lanka 2010*. Diciembre de 2010. (ITU-R document 6A/503-E. 2 de Mayo de 2011). Documento interno DRM.
22. Maier, F., *Preliminary report: DRM+ measurements in band II*. Institute of Communications Technology, University of Hanover. 29 de Marzo de 2010. Disponible en www.ikt.uni-hannover.de (Consultada en Marzo de 2011).
23. Maier, F. y Pagel, D., *Preliminary report: DRM+ measurements in band III*. Institute of Communications Technology, University of Hanover. 29 de Marzo de 2010. Disponible en www.ikt.uni-hannover.de (Consultada en Marzo de 2011).
24. Steil, A. y Lehnert, J., *DRM+, a perfect complement to DAB/DAB+ in VHF band III - Technical results, planning aspects, and regulatory work*, 11th Workshop Digital Broadcasting of Fraunhofer. Erlangen, Alemania. 15-16 de Septiembre de 2010.
25. Digital Radio Mondiale. *Results of the DRM field trial in band I in Turin, Italy*. 3 de Mayo de 2011. (ITU-R document 6A/512-E). Documento interno DRM.
26. Digital Radio Mondiale and British Broadcasting Corporation (BBC). *Results of the DRM High power field trial in the United Kingdom*. 5 de Mayo de 2011. (ITU-R document 6A/532-E). Documento interno DRM.
27. All India Radio and Digital Radio Mondiale. *DRM+ Showcase, New Delhi 23 - 27 de Mayo de 2011*. Versión de 26 de Julio de 2011. Documento interno DRM.
28. Petke, G., *Planning aspects of digital terrestrial television*. European Broadcasting Union Technical Review No. 257. Otoño de 1993.
29. Doeven, J., *Planning of Single Frequency Networks*. ITU/EBU workshop on Digital Broadcasting. Sofía, Portugal. 8-10 de Junio de 2004. Disponible en www.itu.int (Consultada en Noviembre de 2011).
30. Ligeti, A., *Single Frequency Network Planning*. Tesis Doctoral, Royal institute of Technology, 1999. Disponible en kth.diva-portal.org (Consultada en Octubre de 2011).
31. Lau, A., Pausch, M. y Wütschner, W., *First results of field tests with the DAB single frequency network in Bavaria*. European Broadcasting Union Technical Review No. 261. Otoño de 1994.
32. Maddocks, M. C. D., Pullen, I. R. y Green, J. A., *Field trials with a high-power VHF single frequency network for DAB. Measurement techniques and network performance*. European Broadcasting Union Technical Review No. 261. Otoño de 1994.
33. Maddocks, M. C. D., Pullen, I. R. y Lee, M. B. R. *Experimental work to assist in planning a DAB Single-Frequency Network*. IEE Colloquium on Terrestrial DAB – Where is it going?. Londres. 17 de Febrero de 1993.

34. Liebenow, U. y Zimmermann, G., *Investigations of Single Frequency Network for Digital Mobile Radio Systems based on COFDM*. 48th IEEE Vehicular Technology Conference 1998, VTC 98. Ottawa, Canada. 18-21 de Mayo de 1998.
35. Briggs, J., *Digital Broadcasting below 30 MHz: DRM - A summary of the field tests*. European Broadcasting Union Technical Review No. 296. Octubre de 2003.
36. Giefer, A., *An SFN Test between Russia and Portugal*. TC_SE333. Octubre de 2005. Documento interno DRM.
37. Angueira, P., Vélez, M. M., De la Vega, D., Prieto, G., Guerra, D., Matías, J. M. y Ordiales, J. L., *DTV Reception Quality Field Tests for Portable Outdoor Reception in a Single Frequency Network*. IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 50, No. 1. Marzo de 2004.
38. Bóveda, J., Marcos, G., Pérez, J. M., Ponce, S. y Aranaz, A., *MER degradation in a broadcast mobile network*. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting 2009, BMSB'09. Bilbao. 13-15 de Mayo de 2009.
39. Cohen, M., Duval, R., Faria, G., Lainé, P., Le Floc'h, C., Lehembre, B. y Romao, F., *DVB-SH field trial SFN and diversity gain measurements*. 3rd. European Conference on Antennas and Propagation 2009, EuCAP 2009. 23-27 de Marzo de 2009.
40. Plets, D., Veerlock, L., Joseph, W., Martens, L., Deventer, E. y Gauderis, H., *New Method to Determine the SFN Gain of a DVB-H Network with Multiple Transmitters*. 58th Annual IEEE Broadcast Symposium (Proceedings available on Cd-ROM). Alexandria, Virginia, USA. 15-17 de Octubre de 2008.
41. Plets, D., Veerlock, L., Joseph, W., Martens, L., Deventer, E. y Gauderis, H., *Weighing the Benefits and Drawbacks of an SFN by Comparing Gain and Interference caused by SFN Operation*. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting 2009. BMSB'09. Bilbao. 13-15 de Mayo de 2009.
42. Plets, D., Joseph, W., Angueira, P., Arenas, J. A., Veerlock, L. y Martens, L., *On the Methodology for Calculating SFN Gain in Digital Broadcast Systems*. IEEE Transactions on broadcasting, Vol. 56, No. 3. Septiembre de 2010.
43. iBiquity Digital Corporation. *HD Radio Single Frequency Network Interim Field Test Results WD2XAB*. 5 de Noviembre de 2010. Disponible en www.nabfastroad.org (Consultada en Marzo de 2011).
44. Maier, F., *A DRM+ Single Frequency Network trial in Hannover 2.3/2011*. 2 de Mayo 2011. (ITU-R document 6A/504-E). Documento interno DRM.
45. Lehnert, J., *Leaving the dead-end street: New ways for the digitisation of the VHF-FM sound broadcasting with DRM+. Part II: First results on compatibility and coverage analyses of DRM+ single frequency networks (SFN) in the VHF band II*. Informe para 9th Workshop Digital Broadcasting of Fraunhofer IIS. Erlangen, Alemania. 18-19 de Septiembre de 2008.
46. Union Internacional de Telecomunicaciones. *FINAL ACTS of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06)*.
47. Gil, U., Guerra, D., Del Amo, L. y Masdeu, J., *DRM field trials - for urban coverage planning in Spain*. European Broadcastin Union Technical Review. Junio de 2008.
48. Matías, J. M., *Estudio de la radiodifusión local en 26 MHz utilizando el estándar DRM (Digital Radio Mondiale)*. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco. Bilbao. Noviembre de 2008.
49. European Telecommunications Standards Institute. *TS 102 349 V1.3.1: Digital Radio Mondiale (DRM); Receiver Status and Control Interface (RSCI)*. Abril de 2009.

50. Hufford, G.A., Longley, A.G. y Kissick, W.A., *A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*. NTIA REPORT 82-100. Abril de 1982. Disponible en www.its.bldrdoc.gov (Consultada en Noviembre de 2011).
51. Nautel. *DRM+ the time is now!. Presentation on behalf of the DRM CONSORTIUM*. International Broadcasting Convention. Amsterdam. 12 de Septiembre 2010. Disponible en www.nautel.com (Consultada en Octubre de 2011).
52. Prieto, G., Guerra, D., Matías, J. M., Vélez, M. M. y Arrinda, A., *Digital-Radio-Mondiale (DRM) Measurement-System Design and Measurement Methodology for Fixed and Mobile Reception*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 3. Marzo de 2008.
53. Guerra, D., Gil, U., De la Vega, D., Prieto G., Arrinda, A., Ordiales, J. L. y Angueira, P., *Medium Wave Digital Radio Mondiale (DRM) Field Strength Time Variation in Different Reception Environments*. IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 52, No. 4. Diciembre de 2006.
54. Angueira, P., Vélez, M. M., De la Vega, D., Arrinda, A., Landa I. y Ordiales, J. L., *DTV (COFDM) SFN Signal Variation Field Tests in Urban Environments for Portable Outdoor Receptions*. IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 49, No. 1. Marzo de 2003.
55. Beutler, R., *Frequency Assignment and Network Planning for Digital Terrestrial Broadcasting Systems*. Kluwer Academic Publishers. ISBN 1-4020-7872-2. 2004.
56. Rohde & Schwarz, *Test Receiver ESVB Data Sheet*. Disponible en: www.testwall.com (Consultada en Noviembre de 2011).
57. Fraunhofer IIS, *Hoja de información del DRM+ Monitoring Receiver DT4120*. Disponible en: www.iis.fraunhofer.de (Consultada en Noviembre de 2011).
58. RFmondial, *Hoja de información: DRM+ Receiver Solutions*. Disponible en: www.rfmondial.com (Consultada en Noviembre de 2011).