



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



# **Diseño y validación de la segunda generación del estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico, para proveer conectividad a Internet en zonas rurales en Latinoamérica**

Departamento de Comunicaciones  
Universitat Politècnica de València

Tesis para

*Título de doctor por la Universitat Politècnica de València*

Valencia, febrero 2017

Autor:

Ciro Diego Radicelli García

Director:

Prof. Narcis Cardona Marcet



Con amor a mis hijas Rafaella e Isabella y mi esposa Margarita, por ser la luz que guía  
mi camino.

A Dios y mis padres, por regalarme el don de la vida.



# Abstract

Internet access in rural areas of Latin America is deficient, since the rural population either does not have access to this technology or does it from public places at a very low speed connection. This situation does not happen with the TV which is more popular and accessible than the Internet, mobile telephony, and even radio. This is why is intended to use the characteristics of the TV broadcast services, specifically Digital Terrestrial Television (DTT) to provide Internet connectivity in places where only the TV signal arrives.

Thus DTT technologies such as DVB-RCT published in April 2001 by the European Telecommunications Standards Institute (ETSI), which provides a dedicated wireless return channel in the VHF / UHF for concurrent access from many interactive user terminals using TDMA / OFDMA techniques. As well as DVB-T2 which was published in 2008 by the European standardization Forum (DVB) to efficiently transmit advanced television services such as high definition TV (HDTV) or dimensional TV (3D TV) [1] using OFDM will allow to design a new standard for better performance than RCT that takes advantage of the capacities that give robustness to DVB-T2 and which will be called DVB-RCT2 (Digital Video Broadcasting - Return Channel Terrestrial 2nd Generation), which would consist on a broadcast channel (DL) to receive information from the service provider to the end user, using any DTT technology such as ISDB-Tb, DVB-T or DVB-T2 for this purpose; while for reverse communication (UL) it would properly use the DVB-RCT2 architecture proposed in this PhD study. The aforementioned would make it possible for this new standard to be used throughout Latin America.

To validate the design standard, it will be evaluated in terms of coverage and capacity with respect to its predecessor DVB-RCT, and then the channel conditions RCT2 will be emulated in a laboratory. Subsequently socio-economic studies of the new standard will be carried out in order to be able to provide internet connectivity services in rural areas. Finally, the possibility of using 4G wireless networks in the 700 MHz UHF band will be analyzed as well as the band of 1700 MHz (AWS).

# Resumen

El acceso a Internet en zonas rurales de América Latina es deficiente, puesto que la población rural o no tiene acceso a esta tecnología o lo hace desde lugares públicos a una muy baja velocidad de conexión. Esta situación no sucede con la TV la cual es más popular y accesible que el Internet, la telefonía móvil, e incluso que la radio. Es por esto que se pretende utilizar las características de los servicios de difusión de TV, específicamente los de Televisión Digital Terrestre (TDT) a fin de proporcionar conectividad a Internet en lugares donde solo llega la señal de TV.

Es así que tecnologías de TDT como DVB-RCT publicada en Abril de 2001 por el Instituto de Normas de Telecomunicaciones Europeo (*ETSI - European Telecommunications Standards Institute*), que provee un canal de retorno inalámbrico dedicado en las bandas de VHF/UHF para el acceso concurrente desde muchos terminales interactivos de usuario usando técnicas TDMA/OFDMA. Así como DVB-T2 que fue publicado en 2008 por el foro de estandarización europeo (DVB) para transmitir eficientemente servicios avanzados de televisión como TV en alta definición (HDTV) o TV tridimensional (3D TV) [1] utilizando modulación OFDM; permitirán diseñar un nuevo estándar de mejores prestaciones que RCT que aproveche las capacidades que dan robustez a DVB-T2 y al cual se lo llamará DVB-RCT2 (*Digital Video Broadcasting – Return Channel Terrestrial 2nd Generation*), el mismo que constaría de un canal de difusión (canal descendente) para recibir información desde el proveedor del servicio hasta el usuario final, utilizando para esto cualquier tecnología de TDT como ISDB-Tb, DVB-T o DVB-T2; mientras que para la comunicación inversa (canal ascendente) utilizaría propiamente la arquitectura DVB-RCT2 propuesta en este estudio de doctorado. Lo anteriormente mencionado haría factible que este nuevo estándar pueda ser utilizado en toda Latinoamérica.

Para validar el diseño del estándar, se lo evaluará en términos de cobertura y capacidad con respecto a su predecesor DVB-RCT, y después se emulará en laboratorio las condiciones del canal RCT2. Posteriormente se realizarán estudios socio-económicos del nuevo estándar a fin de poder proporcionar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales.

Por último, se analizará la posibilidad de utilizar redes inalámbricas 4G en la banda UHF de 700 MHz, así como en la banda de 1700 MHz (AWS).

# Resum

L'accés a Internet en zones rurals d'Amèrica Llatina és deficient, ja que la població rural o no té accés a esta tecnologia o ho fa des de llocs públics a una molt baixa velocitat de connexió. Esta situació no succeïx amb la TV la qual és més popular i accessible que l'Internet, la telefonia mòbil, i inclús que la ràdio. És per açò que es pretén utilitzar les característiques dels servicis de difusió de TV, específicament els de Televisió Digital Terrestre (TDT) a fi de proporcionar connectivitat a Internet en llocs on només arriba el senyal de TV.

És així que tecnologies de TDT com DVB-RCT publicada a l'Abril de 2001 per l'Institut de Normes de Telecomunicacions Europeu (ETSI - European Telecommunications Estàndards Institute), que proveïx un canal de retorn sense fil dedicat en les bandes de VHF/UHF per a l'accés concurrent des de molts terminals interactius d'usuari usant tècniques TDMA/OFDMA. Així com DVB-T2 que va ser publicat en 2008 pel fòrum d'estandardització europeu (DVB) per a transmetre eficientment servicis avançats de televisió com TV en alta definició (HDTV) o TV tridimensional (3D TV) [1] utilitzant modulació OFDM; permetran dissenyar un nou estàndard de millors prestacions que RCT que aprofite les capacitats que donen robustesa a DVB-T2 i al qual se'l nomenarà DVB-RCT2 (Digital Vídeo Broadcasting - Return Channel Terrestrial 2nd Generation), el mateix que constaria d'un canal de difusió (canal descendent) per a rebre informació des del proveïdor del servicis fins a l'usuari final, utilitzant per a açò qualsevol tecnologia de TDT com ISDB-Tb, DVB-T o DVB-T2; mentres que per a la comunicació inversa (canal ascendent) utilitzaria pròpiament l'arquitectura DVB-RCT2 proposada en este estudi de doctorat. L'anteriorment mencionat faria factible que este nou estàndard puga ser utilitzat en tota Llatinoamèrica.

Per a validar el disseny de l'estàndard, se l'avaluarà en termes de cobertura i capacitat respecte al seu predecessor DVB-RCT, i després s'emularà en laboratori les condicions del canal RCT2. Posteriorment es realitzaran estudis socioeconòmics del nou estàndard a fi de poder proporcionar servicis de connectivitat a Internet en zones rurals.

Finalment, s'analitzarà la possibilitat d'utilitzar xarxes sense fil 4G en la banda UHF de 700 MHz, així com en la banda de 1700 MHz (AWS).

# Agradecimientos

En primer lugar a Dios, por regalarme la salud, la vida la inteligencia y la sabiduría para tomar decisiones, además de la fortaleza para afrontar los problemas que se presentan en el camino.

A mi esposa Magui mi soporte, y mis hijitas Rafaella e Isabella mi luz, por ser el aliciente que me da fuerzas para seguir luchando cada día.

A mi madre Gloria quien fue padre y madre; por su amor, ternura y apoyo incondicional, y por sus consejos que han hecho el hombre de bien que ahora soy.

A mi padre Benedetto y a la nona Pina que desde el cielo, sé que están derramando sus bendiciones.

A todos los familiares que de una u otra manera colaboraron y fueron parte de esta travesía académica.

Al Profesor Narcís Cardona, a quien he tenido el gusto de tenerlo como profesor y luego como director, primero de la tesis de la maestría y luego de esta tesis doctoral, gracias por que con su don de gente y su acertada dirección, he podido alcanzar tan anhelado sueño.

A la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), al Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) y al Grupo de Comunicaciones Móviles (GCM), por permitirme ser parte de esta gran familia universitaria.

# Índice General

Acrónimos	XI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Descripción general del problema	4
1.3. Hipótesis y objetivos	7
1.4. Estado del arte: características de las tecnologías de TDT	8
1.5. Descripción de la tesis y principales contribuciones	13
1.6. Diseminación y lista de publicaciones	18
<b>2. Fundamentos de las tecnologías DVB-RCT Y DVB-T2</b>	<b>20</b>
2.1. Tecnología DVB-RCT	20
2.2. Tecnología DVB-T2	37
<b>3. Diseño del estándar DVB-RCT2</b>	<b>39</b>
3.1. Elementos de DVB-T2	39
3.2. Elementos de DVB-RCT	40
3.3. Diseño de capa física y MAC DVB-RCT2	41
3.4. Arquitectura de DVB-RCT2	50
<b>4. Evaluación, planificación y análisis de cobertura e interferencias de tecnologías de TDT</b>	<b>52</b>
4.1. Evaluación inicial de prestaciones para tecnologías de TDT	52
4.2. Planificación de redes de TDT	54
4.3. Escenario y consideraciones a tomar en cuenta para el cálculo de cobertura	63

4.4. Análisis de cobertura e interferencias	70
<b>5. Estudio del impacto de la posible implementación de DVB-RCT2</b>	<b>84</b>
5.1. Terminología, conceptos y teoría sobre la evaluación de impacto	84
5.2. Evaluación de impacto de la posible implementación de DVB-RCT2	126
<b>6. Análisis de 4G LTE como tecnología sustitutiva a la solución de TDT propuesta</b>	<b>166</b>
6.1. Introducción	166
6.2. Modulación LTE y principios de OFDM	168
6.3. Enlace descendente (DL)	168
6.4. Enlace ascendente (UL)	169
6.5. Múltiples entradas, múltiples salidas en LTE (MIMO LTE)	169
6.6. FDD y TDD en LTE	171
6.7. Estructura de trama y subtrama en LTE	172
6.8. Canales físicos, lógicos y de transporte en LTE	174
6.9. Bandas de frecuencia LTE y asignación de espectro	178
6.10. Evolución de la arquitectura del Sistema (SAE)	180
6.11. LTE-M	182
6.12. LTE Avanzado	183
6.13. 4G LTE como tecnología sustitutiva a la solución de TDT propuesta	191
<b>7. Conclusiones</b>	<b>195</b>
<b>Referencias</b>	<b>198</b>

# Acrónimos

2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
3D TV	Three-Dimensional Television
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Cuarta Generación
ACE	Active Constellation Extension
AF	Applications Function
ATSC	Advanced Television System Committee
AWS	Advanced Wireless Service
BCH	Bose-Chaudhuri-Hochquenghem
BCCH	Broadcast Channel
BS	Burst Structure
CA	Carrier Agregation
CAPEX	Capital Expenditure
CCCH	Common Control Channel
CFI	Control Format Indicator
CNR	Carrier to Noise Ratio
CS	Carrier Spacing
CMR-07	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007
CMR-12	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2012
CMSI	Cumbre Mundial sobre la Sociedad de la Información

CONATEL	Consejo Nacional de Telecomunicaciones (Ecuador)
D2D	Device to Device
DCCH	Dedicated Control Channel
DCI	Downlink Control Information
DD DRD	Diferencias en diferencias con diseño de regresión discontinua
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DVB-RCT	Digital Video Broadcasting - Return Channel Terrestrial
DVB-T2	Digital Video Broadcasting - 2nd Generation Terrestrial
DVB-RCT2	Digital Video Broadcasting - Return Channel Terrestrial 2nd Generation
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FEC	Forward Error Correction
FEF	Future Extension Frame
FFT	Fast Fourier Transform
GP	Guard Period
GSE	Generic Standar Encapsulation
HBB	Hybrid Broadcast Broadband
HDTV	High Definiton Television
HSS	Home Suscriber Server
INA	Interactive Network Adapter
ISDB-Tb	Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial Brasil
LDPC	Low-Density Parity- Check
LOS	Line Of Sight
LTE	Long Term Evolution

MAC	Medium Access Control
MAS	Medium Access Scheme
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MFN	Multiple Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MME	Mobility Management Entity
MODCOD	Modulación-Codificación
MPE	Multi Protocol Encapsulation
MPEG-2	Motion Pictures Experts Group
MPLPs	Multiple Physical Layer Pipes
MTCH	Multicast Traffic Channel
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCCH	Paging Control Channel
PCH	Paging Channel
PCRF	Policy - & Charging Rules Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDN	Packet Data Network
PGW	PDN Gateway
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
RACH	Random Access Channel

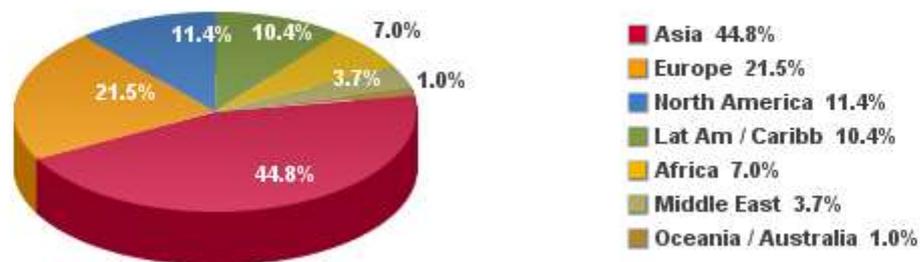
RAN	Radio Access Network
RCTT	Return Channel Terrestrial
RF	Radio Frecuencia
SAE	System Architecture Evolution
SAP	Service Access Point
SENATEL	Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (Ecuador)
SFN	Single Frequency Network
SGW	Serving Gateway
SMART	Specific, Measurable, Attributable, Realistic, Targeted
T2-MI	T2 Modulator Interface
TF	Transmission Frame
TI	Time Interleaving
TDMA	Time Division Multiple Access
TDT	Televisión Digital Terrestre
TR	Tone Reservation
TS	Transport Stream
UIT	Union Internacional de Telecomunicaciones
UHF	Ultra High Frequency
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot
VHF	Very High Frequency

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

Internet ha evolucionado rápidamente desde sus orígenes, en el año 1969. En los últimos años se ha observado un crecimiento significativo en las infraestructuras de red, el acceso móvil, y en el propio uso de Internet especialmente en los países en desarrollo (Latinoamérica y el Caribe), contando con 255 millones de usuarios de los 2.400 millones existentes en el mundo al finalizar 2012, lo que representa un 10,4% de la población mundial [1].



**Figura 1.1.** Usuarios de Internet en el mundo, distribución por regiones [2]

Dado que Internet amplía el acceso a la información, tiene un gran potencial para mejorar la educación, la ciencia, la cultura, la comunicación, y la información; incluidos también los principios de los derechos humanos como la democracia, la libertad de expresión y el acceso al saber [3]. En este sentido la Cumbre Mundial sobre la Sociedad de la Información (CMSI), celebrada en Ginebra (2003) y Túnez (2005), trató una amplia gama de temas relacionados con las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) para el desarrollo, definiendo diez objetivos [4] además de diversas recomendaciones para el 2015, destinados a fomentar la creación de una sociedad de la información inclusiva.

Siguiendo esta línea, el gobierno del Ecuador crea el Plan Nacional del Buen Vivir 2009-2013 y lo reedita para el período 2013-201, contando como uno de sus principales desafíos la reducción de la brecha digital existente entre ciudades y zonas rurales, así como entre hombres

y mujeres de diferentes edades, razas, niveles de educación y condiciones económicas mediante el uso de las TICs, generando igualdad de oportunidades y fomentando la participación ciudadana.

Sin embargo, los datos disponibles indican que tres cuartas partes de la población mundial no tienen todavía acceso a Internet [4]. Y aunque el porcentaje de penetración en América del Sur es del 48,2% el problema persiste. En Ecuador por ejemplo con un porcentaje de penetración del 43,8% solamente el 1,3% de la población cuenta con este servicio [2]. En lo referente a acceso a Internet en zonas rurales, concretamente en los países en desarrollo de América Latina, la situación es peor ya que la población rural o no tiene acceso a esta tecnología, o lo hace desde emplazamientos públicos en muchas ocasiones con una muy baja velocidad de conexión, lo que demuestra que aún queda mucho por hacer para llevar Internet a este tipo de zonas.

Si bien el acceso a Internet seguirá siendo limitado en el mundo en desarrollo, no sucede lo mismo con la tecnología móvil, considerada hoy en día como la TIC más expandida, debido a la gran penetración de teléfonos móviles y de servicios 3G e incluso 4G, es así que en América Latina la penetración de dispositivos móviles es del 130% y en Ecuador del 105% y va en aumento [5]. Sin embargo, la televisión suele ser más popular y accesible que el Internet, la telefonía móvil, e incluso que la radio en muchos países y regiones en desarrollo, llegando a tener tasas de superiores al 90% [4], pero uno de los inconvenientes que presenta este servicio es que las bandas UHF/VHF que utiliza tienen un espectro muy congestionado en muchos países latinoamericanos, lo que se convierte en un problema para la introducción de nuevos servicios. Debido a esto se está llevando a cabo el proceso de transición que implica el paso de la televisión analógica a digital (apagón analógico), el mismo que iniciará en 2015 y se prevé termine en 2020. Para posteriormente, con el llamado dividendo digital, asignar esas frecuencias de televisión liberadas (parte alta de la banda UHF), para brindar servicios 4G. La cantidad de espectro liberada, depende entre otras cosas de particularidades tales como la geografía y topografía del país, de la utilización del espectro en los países vecinos, y de la tecnología de TDT que sustituirá a los servicios analógicos, mismos que convivirán en un principio con las emisiones de la señal digital, en una etapa conocida como Simulcast, todo esto hará que el tamaño de dicho dividendo cambie de una región y/o país a otro [6].

El apagón analógico permitirá entre otras cosas liberar frecuencias, utilizar una potencia de transmisión menor, tener un mayor control sobre la calidad de funcionamiento de los canales, además de comprimir datos utilizando técnicas de compresión mejoradas, ocupando eficientemente el espectro y permitiendo que cinco canales digitales sean provistos en la misma cantidad de espectro que un canal analógico [6]. También los sistemas digitales permitirán la adición de servicios de datos auxiliares como corrección de errores, redes de frecuencia única (SFN), procesos de sintonización automática o semiautomática, entre otros.

La cantidad de espectro liberada en el apagón analógico (parte alta de la banda UHF) será asignada mediante el uso del dividendo digital para brindar servicios de banda ancha móvil (4G), debido a que esta porción de espectro tiene mejores propiedades de propagación y penetración que las bandas más altas utilizadas en la actualidad para las comunicaciones móviles inalámbricas, además que presentan un gran potencial para el suministro de un amplio rango de servicios en movilidad. En este sentido la UIT (*Unión Internacional de Telecomunicaciones*) es el ente que controla la ordenación de las bandas de radio a nivel mundial, mediante la división del globo terráqueo en 3 regiones: Región 1 que comprende Europa, África y el Norte de Asia; Región 2 América del Norte, América del Sur y Groenlandia; y Región 3 Pacífico y sur de Asia.

Inicialmente en la Región 1 según el Plan de Ginebra de 2006, se acordó el uso de toda la banda UHF 470-862 MHz (canales 21 al 69) para brindar servicios primarios de TV analógica, pero posteriormente en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007 (CMR-07) se decidió que en la subbanda de 790-862 MHz (canales 61 al 69; espectro de 800 MHz) se compartan las emisiones de TDT junto con los servicios móviles para telefonía.

Sin embargo los países de la Unión Europea decidieron reordenar el uso de esas frecuencias, dejando la subbanda de 790-862 MHz íntegramente para brindar servicios 4G y desplazaron las emisiones de TDT a la parte inferior de la banda UHF. A esto se le conoce como el primer dividendo digital. Pese a esto en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2012 (CMR-12) se aprobó un segundo dividendo digital en la subbanda de frecuencias de 698-790 MHz (canales 50 al 60; espectro de 700 MHz), por lo que las emisiones de TDT quedaron comprendidas entre las frecuencias 470-698 MHz (canales 21 al 60).

Por su parte para la Región 2 se definió la banda UHF 470-698 MHz (canales 14 al 51) para servicios de TDT, y al igual que en Europa la CMR-07 decidió dejar la subbanda de 698-862 MHz (canales 52 al 69; espectro de 700 MHz) para servicios 4G.

Es así por ejemplo que en Colombia ya se ha producido este dividendo (banda 700 MHz) y la subasta del espectro 4G está pendiente, mientras que en Ecuador se dispuso que el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL), sea el organismo que defina las bandas para la implementación de la TDT y que la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL), efectúe un análisis para ocupar el rango de 482-512 MHz [7]. Además la situación con respecto al manejo del espectro radioeléctrico se detalla en [8] y [9].

Para las emisiones de TDT los países latinoamericanos han adoptado en su mayoría el estándar japonés- brasileño ISDB-Tb (*Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial Brasil*) a excepción de Panamá y Colombia que utilizan la norma europea DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*) y DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial 2nd*

*Generation*) respectivamente. Por su parte México y algunos países de América Central usan la norma americana ATSC (*Advanced Television System Committee*).

## **1.2. Descripción general del problema**

En lo referente a las alternativas de conexión para entornos rurales, la tecnología a elegir depende de la identificación de los requerimientos de la población, además de poder cubrir grandes áreas, tener bajo coste y ser de fácil implementación, y para esto se debe tomar en cuenta a parte de los servicios que se desea proveer, la topología de la red y las características concretas del escenario a ser considerado.

Aunque las alternativas de conectividad son varias, la provisión de servicios de telecomunicaciones para áreas rurales es significativamente más costosa que en áreas urbanas, debido a que hay que cubrir zonas extensas y la densidad de población es baja. Es por esto que en muchas zonas rurales, las conexiones mediante cable o tecnologías DSL no están físicamente disponibles, además que en términos de velocidad y cobertura no proveen las mejores características. Las redes de fibra óptica mejoran tanto velocidad y cobertura, pero son mucho más costosas y por tanto no es viable su implementación. Es por esto que en su lugar se podrían proveer opciones de conectividad inalámbricas en donde se puedan brindar servicios con mayor facilidad y con mayor tasa de penetración, como por ejemplo el satélite, que proporciona un medio de transmisión/recepción de datos de alta velocidad, en donde las velocidades de subida irán entre los 64 Kbps y los 2.048 Kbps, y las de bajada desde los 256 Kbps a los 38 Mbps [10] (Internet por satélite – acceso bidireccional), además de poder brindar servicios de voz y televisión (TV por satélite).

Asimismo para brindar conectividad inalámbrica, se tienen tecnologías como 4G - LTE (*4th Generation - Long Term Evolution*), que permiten la navegación móvil a velocidades muy superiores que la tecnología de tercera generación 3G UMTS (*3rd Generation - Universal Mobile Telecommunications System*). Pudiendo llegar a velocidades máximas de 150 Mbps [11] comparadas con los 0,2 y 0,4 Mbps de 3G UMTS [12]. Además de estas grandes velocidades, 4G presenta mayor potencial para las áreas rurales, debido a que su despliegue en el espectro del dividendo digital está situado entre los 200 Mhz y 1 GHz. Estas frecuencias bajas, facilitan la cobertura y por consiguiente logran un equilibrio óptimo entre la capacidad de transmisión y el alcance operacional, necesitando menos infraestructura para obtener una cobertura móvil más amplia, con la consiguiente reducción de los costes de los servicios de comunicación [12].

A parte de la tecnología 4G, se puede considerar también para entornos rurales la utilización de acceso por microondas, mediante la tecnología WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), la cual presenta velocidades de 70 Mbps y coberturas de hasta 50 Km. Pero

con el inconveniente de que los enlaces de microondas se ven afectados por obstáculos como las montañas, o por factores climatológicos como la nieve, la lluvia, o la niebla [13].

Bajo este contexto, una posible solución para lograr acceso universal a Internet en zonas rurales de Latinoamérica sería la utilización de un canal de TDT con retorno inalámbrico, con lo cual se reutilizaría la infraestructura de TDT para permitir la conexión a Internet disminuyendo los costos de implementación y utilización, puesto que llegaría a todos los hogares que tengan acceso a la TDT.

Otra alternativa de conexión a Internet para este tipo de entorno, podrían ser los sistemas de TV en concreto la utilización de un canal de TDT con retorno inalámbrico, con lo cual se reutilizaría la infraestructura de TDT para permitir la conexión a Internet disminuyendo los costos de implementación y utilización, puesto que llegaría a todos los hogares que tengan acceso a la TDT, mediante lo cual además se podría aumentar la eficiencia de transmisión, y maximizar la cobertura en condiciones adversas, permitiendo abrir nuevos escenarios de recepción, sin interferir con los servicios de difusión análogos y digitales presentes. Bajo estas condiciones, las redes de TDT se convierten en una interesante alternativa que provee un uso eficiente del espectro radioeléctrico y genera significativos ahorros de infraestructura. En este sentido arquitecturas de TDT como ISDB-Tb, DVB-T, DVB-RCT y DVB-T2, serán estudiadas a fin de proporcionar este servicio de conexión a zonas en donde sólo llega la señal de TV.

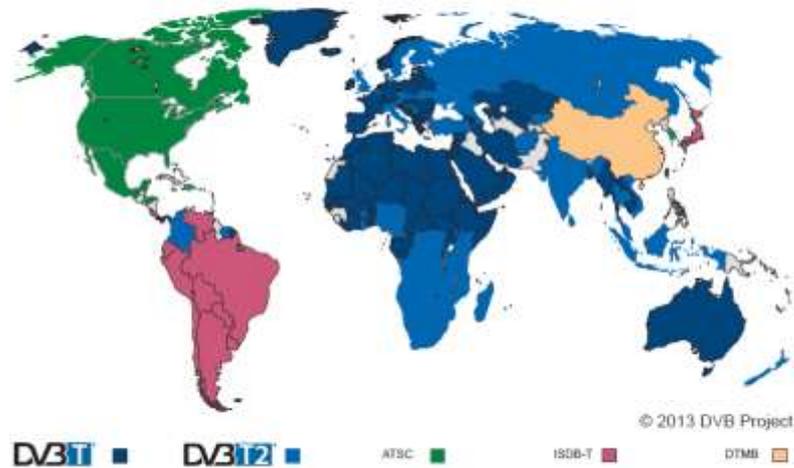
DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*), conocido también como EN 300 744 fue publicado en 1998, provee una gran eficiencia espectral y es considerado como un sistema flexible que permite diseñar redes de difusión, para brindar una amplia gama de servicios entre los que se tiene la TV digital de Alta Definición (HDTV) [14]. Para mejorar las capacidades de DVB-T en lo referente a brindar interacción a usuarios fijos, así como proveer de servicio a usuarios móviles, se propuso la utilización de un canal de retorno inalámbrico para esta tecnología. En este sentido se desarrolló el estándar EN 301 958, conocido como DVB-RCT (*Digital Video Broadcasting – Return Channel Terrestrial*) el mismo que fue publicado en Abril de 2001 por el Instituto de Normas de Telecomunicaciones Europeo ETSI. El canal de retorno de este estándar hacía uso de un único canal de radiofrecuencia (RF) dedicado y lo organizaba para permitir el acceso concurrente desde muchos terminales interactivos de usuario, usando técnicas TDMA/OFDMA [15]. A pesar de esta idea innovadora, DVB-RCT nunca llegó a desplegarse comercialmente, puesto que no tuvo el apoyo necesario de la industria para imponerse como una tecnología que despertara interés, esto sumado a las trabas impuestas por los operadores de telefonía móvil, y al poco desarrollo tecnológico del canal de retorno, hicieron que esta tecnología sea considerada como no “madura”, no obstante se llegaron a hacer pruebas piloto en Suecia.

Debido a esto, y con el objetivo de impulsar el rendimiento robustez y mejora de la cobertura en las redes de frecuencia única (*SFN- Single Frequency Network*), y de facilitar la implementación de transmisores y receptores. En 2008, el DVB publicó la segunda generación del estándar denominada DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting 2nd Generation Terrestrial*), conocido también como el estándar ETSI EN 302755 el cual incorpora los últimos avances tecnológicos en modulación y codificación de canal, a más de la utilización nuevos tamaños de FFT (*Fast Fourier Transform*), tramas FEF (*Future Extension Frames*), constelaciones rotadas, tuberías de capa física, codificación Alamouti, entrelazado temporal, capacidad de soportar muchos usuarios mediante la utilización de un canal múltiplex, y demás que lo convierten en el más potente sistema de transmisión de TDT con un alto grado de eficiencia, flexibilidad y robustez.

Este estándar se desarrolló para ofrecer un medio de transporte eficiente para radiodifundir servicios avanzados de televisión tales como TV en alta definición (HDTV) o televisión tridimensional (3D TV) [16], y fue implementado inicialmente en marzo de 2010 por el Reino Unido y posteriormente continuaron con la implementación otros países dentro y fuera de Europa tales como Italia, Suecia, Finlandia, Colombia, entre otros [17].

Con el objeto de extender las capacidades del estándar DVB-T2, se propone en esta tesis doctoral, dotar a esta tecnología con un canal de retorno, al cual se lo definirá como DVB-RCT2 (*Digital Video Broadcasting – Return Channel Terrestrial 2nd Generation*), por lo que se procurará que el mismo ofrezca todas las características que brindan robustez a DVB-T2, a más de adoptar/ modificar características de la tecnología con canal de retorno DVB-RCT.

Luego de haber repasado brevemente las características de los sistemas de TDT, es importante mencionar el avance desarrollado en los medios de propagación de señales, desde una televisión abierta analógica, hacía una televisión digital, que permite entre otros aspectos la mejora en la calidad de la imagen y la posibilidad de agregar servicios complementarios. Es así, que los gobiernos de muchos países alrededor del mundo a fin de facilitar la inclusión a esta nueva forma de ver televisión, han definido según su propio análisis el estándar de televisión digital que implementarán. Latinoamérica no ha sido la excepción, y ya varios países han tomado su decisión y se encuentran en la fase de implementación de la TDT. En la figura siguiente se ilustran los diferentes sistemas adoptados mundialmente.



**Figura 1.2.** Sistemas de Televisión Digital Terrestre en el mundo [17]

### 1.3. Hipótesis y objetivos de la tesis

#### Hipótesis

El diseño de un nuevo estándar de canal de retorno de TDT DVB-RCT2 basado en las nuevas funcionalidades que presenta la tecnología de TDT de segunda generación DVB-T2, y en los principios de la tecnología con canal de retorno inalámbrico DVB-RCT, permitirá brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales donde sólo llega la señal de televisión.

#### Objetivo General

Diseñar un nuevo estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico (DVB-RCT2) basado en las nuevas funcionalidades que presenta la tecnología DVB-T2, y en los principios de la tecnología con canal de retorno inalámbrico DVB-RCT, para brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales.

#### Objetivos Específicos

- Estudiar el estándar de TDT de segunda generación DVB-T2, así como el estándar de canal de retorno inalámbrico de primera generación DVB-RCT.
- Validar el diseño del estándar DVB-RCT2 propuesto.
- Emular en laboratorio las condiciones del canal RCT2.
- Estudiar el impacto de la posible implementación de DVB-RCT2, a fin de proporcionar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales.
- Analizar el uso de redes celulares de cuarta generación (4G) como tecnología sustitutiva a la solución de TDT propuesta para zonas rurales.

## **1.4. Estado del arte: características de las tecnologías de TDT**

### **1.4.1. DVB-T**

El sistema DVB-T se refiere a la difusión terrestre de señales de TV con codificación MPEG-2 (*Motion Pictures Experts Group*). Para esto utiliza una modulación con un amplio número de subportadoras como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), que junto a la utilización de tres esquemas de modulación (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), que a su vez pueden combinarse con cualquiera de las cinco tasas para corrección de errores FEC ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{5}{6}$ ,  $\frac{7}{8}$ ), marcan el rendimiento de un modo de transmisión específico. Es así que la capacidad de datos disponible y la relación portadora a ruido (*CNR – Carrier to Noise Ratio*), se incrementan con tasas de código mayores. Además DVB-T utiliza cuatro intervalos de guarda de longitud  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{16}$ ,  $\frac{1}{32}$ , para proteger la señal frente a interferencias y dos modos de operación (2K y 8K) que hacen del mismo un sistema flexible y robusto [18]. Con el modo 8k, 68 símbolos OFDM (trama) siempre llevan un número entero de paquetes MPEG2, codificados con un código Reed-Solomon (RS) sin importar el MODCOD elegido. Desafortunadamente no sucede lo mismo con el modo 2K, por lo que aparece el concepto de supertrama, la misma que es el conjunto de 4 tramas sucesivas (sea cual sea el tamaño de la FFT).

DVB-T tiene además tasas de bit de datos comprendidas entre los 5 y 32 Mbps, lo que significa que 5 o 6 canales de TV digital, pueden ser asignados en un solo canal de TV analógica [19]. Además para permitir la máxima eficiencia de espectro cuando se usan las bandas VHF (*Very High Frequency*) y UHF (*Ultra High Frequency*) los transmisores pueden operar a la misma frecuencia y estar modulados con la misma señal, para cubrir grandes áreas (entornos rurales) o para mejorar la cobertura puertas adentro (in-door), a esto se lo conoce como red de frecuencia única (SFN). El estándar hace uso también de dos perfiles de canal, Rice (Ricean) para recepción con antena fija en el tejado (ambiente exterior), y Rayleigh para un sistema de recepción con un equipo portátil, en un ambiente interior. Este estándar presenta una separación entre canales de 8 MHz (aunque se podría utilizar en anchos de banda de 6 o 7 MHz), al igual que ISDB-Tb, DVB-RCT y DVB-T2.

### **1.4.2. ISDB-Tb**

El estándar ISDB-Tb contempla tres modos de operación, el primero con una FFT 2K y dos restantes con 4K y 8K respectivamente, emplea además señalización, sincronización y estimación de canal muy similares a las de DVB-T por el hecho de utilizar la misma modulación OFDM. Así mismo los dos estándares presentan iguales tasas de codificación. Con respecto a los esquemas de modulación a más de los que ya DVB-T, el estándar brasileño utiliza DQPSK (Differential QPSK), e implementa entrelazado en frecuencia y temporal sobre símbolos OFDM consecutivos para mejorar la robustez de la modulación OFDM y para atenuar

algunos efectos como el desvanecimiento dentro de un canal en un grupo de frecuencias determinado [20].

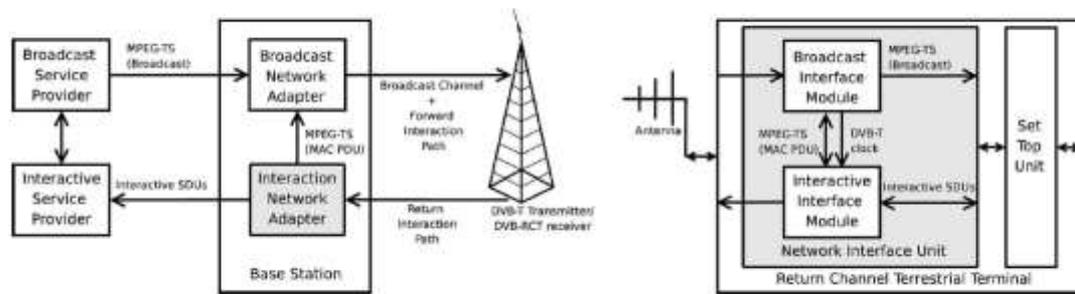
La principal novedad de ISDB-Tb es la transmisión jerárquica en capas (Layers). Así el sistema permite organizar la información a transmitir en tres capas jerárquicas diferentes denominadas A B y C, esta función es muy importante y es el motivo por el cual el canal trabaja en una banda segmentada de 13 segmentos. Es importante destacar que la señal ISDB-Tb en el espectro añade un offset en frecuencia, con lo cual la señal de transmisión es desplazada en 1/7 MHz (142,857 kHz) con relación a la frecuencia central del canal utilizada.

### **1.4.3. DVB-RCT**

DVB-RCT utiliza dos portadoras de tamaño 1K y 2K, y tres distancias de separación (*CS - Carrier Spacing*) entre estas; CS1 de 1KHz, CS2 de 2KHz, y CS3 de 4KHz. Al igual que DVB-T, DVB-RCT define tres esquemas de modulación y cuatro intervalos de guarda, pero a diferencia de la primera utiliza solamente dos tasas de codificación ( $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$ ). DVB-RCT utiliza además codificación concatenada y turbo para reducir la CNR en 1,5 dB o más.

En sí la tecnología DVB-RCT es definida como una red inalámbrica de difusión bidireccional, puesto que para la comunicación desde el proveedor del servicio hasta el usuario, se utiliza un canal de difusión (*forward interaction path*), empleando la arquitectura DVB-T estándar; es por esto que se considera que DVB-RCT tiene señalización de bajada en banda (*in-band*), utiliza además modulación OFDM normal, mientras que para la comunicación inversa se emplea un canal de retorno (*return interaction path*), que utiliza propiamente la arquitectura DVB-RCT utilizando modulación OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), lo que permite que múltiples portadoras sean asignadas en paralelo a diferentes usuarios en diferentes instantes de tiempo. Específicamente en el canal de retorno se utiliza la capa de control de acceso al medio (*MAC - Medium Access Control*), que está constituida sobre la capa física para proveer seguridad y un canal de retorno inalámbrico compartido, entre el terminal de usuario (*RCTT - Return Channel Terrestrial*), y la estación base. El protocolo MAC ofrece un uso transparente de la capa física a los protocolos de capas superiores, habilitando en la estación base el adaptador de red interactivo (*INA - Interactive Network Adapter*), quien es el responsable de asignar los recursos de subida (ranuras de frecuencia y tiempo) a los RCTTs, cuando las capas superiores lo necesiten. Por su parte el RCTT, es responsable de solicitar más recursos, si la estación base no se los ha provisto, o le ha dado muy pocos. Dichos mensajes MAC de subida pueden ser enviados como se detallará posteriormente como acceso de tasa fija, acceso de contención, y acceso de reserva en el canal de subida, y pueden ser encapsulados en células ATM o mapeados directamente dentro de una ráfaga física, en cambio que los datos de

bajada (difusión), son encapsulados en paquetes MPEG2, mientras que los datos de subida (interacción), se encapsulan en celdas ATM.



**Figura 1.3.** Arquitectura DVB-RCT [15]

El canal de radiofrecuencia usado en DVB-RCT es dedicado y organizado para permitir accesos concurrentes entre los RCTTs, dicho canal es dividido de tal manera que se tiene una “malla” de ranuras de tiempo/frecuencia, en donde en cada ranura de tiempo se pueden usar diferentes frecuencias simultáneamente para transmitir, a esto se lo conoce como estructura de ráfaga y es la ranura de transmisión básica asignada a un RCTT. El estándar define tres de estas estructuras conocidas como BS1 con 1 BS2 con 4 y BS3 con 29 portadoras. Usa además dos tramas de transmisión (*TF –Transmission Frame*), TF1 que organiza el canal en el dominio del tiempo utilizando conformado de tráfico rectangular y de Nyquist para transmitir un símbolo nulo, 6 símbolos de alineación y 176 símbolos de usuario. Y TF2 que organiza el canal en el dominio de la frecuencia utilizando solo conformado rectangular para transmitir 8 grupos de 6 símbolos de propósito general [21]. La combinación de BS y TF, constituyen los esquemas de acceso al medio (*MAS-Medium Access Scheme*), entre los que se tiene MAS1 (TF1-BS1) o Acceso de tasa fija (*Fixed Rate Access*) en donde el INA asigna una lista de ranuras al RCTT cuando una conexión es establecida; MAS2 (TF1-BS2) o Acceso de Contención (*Contention Access*), en donde los mensajes MAC son enviados en las ranuras no reservadas que el INA identifica en la transmisión de bajada; y MAS3 (TF2-BS3) o Acceso de Reserva (*Reservation Access*), en donde el INA concede una lista de ranuras para una conexión requerida por un RCTT, pero aparte se utiliza un cuarto modo de acceso conocido como Acceso Aleatorio (*Ranging Access*), el mismo que es usado para realizar la sincronización de potencia, frecuencia y tiempo, del RCTT al inicio de la conexión, y para mantener la sincronización durante la misma.

Por otra parte los RCTTs, no requieren una potencia superior a los 0,5 vatios para transmitir, mientras que las estaciones base pueden soportar grandes picos de tráfico llegando a procesar hasta 20.000 interacciones por segundo, haciendo que su implementación sea económica. Cabe destacar además que la estación base es quién controla la asignación de las portadoras a los usuarios y provee la sincronización a estos para que accedan de manera adecuada a la red.

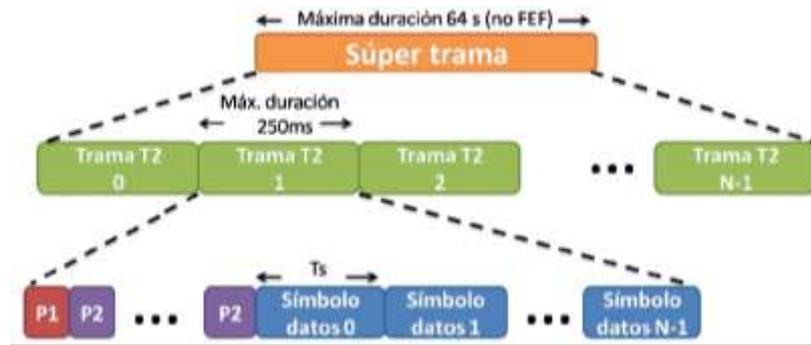
MODCOD	Capacidad (Mbps)					
	1 y 4 portadoras			29 portadoras		
	CS1	CS2	CS3	CS1	CS2	CS3
QPSK $\frac{1}{2}$	0,688	1,375	2,750	0,684	1,368	2,736
QPSK $\frac{3}{4}$	1,031	2,063	4,125	1,026	2,052	4,103
16-QAM $\frac{1}{2}$	1,375	2,750	5,500	1,368	2,736	5,471
16-QAM $\frac{3}{4}$	2,063	4,125	8,251	2,052	4,103	8,207
64-QAM $\frac{1}{2}$	2,063	4,125	8,251	2,052	4,103	8,207
64-QAM $\frac{3}{4}$	3,094	6,188	12,376	3,078	6,155	12,310

**Tabla 1.1.** Capacidad de transmisión de DVB-RCT para diferentes MODCODs, con un GI =  $\frac{1}{4}$

#### 1.4.4. DVB-T2

DVB-T2 utiliza modulación OFDM con un gran número de subportadoras y esquemas de corrección de errores más robustos como LDPC (*Low Density Parity Check*) y BCH (*Bose-Chaudhuri-Hocquengham*) que proveen de una importante mejora comparado con el rendimiento de los mecanismos FEC del estándar DVB-T e ISDB-Tb (codificación convolucional y Reed Solomon). Estos mecanismos FEC junto a la utilización de cuatro esquemas de modulación (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM), seis tasas de codificación ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{5}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{4}{5}$ ,  $\frac{5}{6}$ ), siete intervalos de guarda ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{19}{128}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{19}{256}$ ,  $\frac{1}{16}$ ,  $\frac{1}{32}$ ,  $\frac{1}{128}$ ), y seis portadoras (1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K) [22], hacen que DVB-T2 consiga una capacidad de transmisión de hasta el 70% y una cobertura de más del 100% con respecto a los estándares predecesores, lo que se traduce en una significativa reducción del número de transmisores y frecuencias y en un ahorro en la potencia total radiada [16].

Así mismo el estándar define 8 patrones de portadoras piloto (PPP) con el fin de minimizar la sobrecarga en función del tipo de recepción a la que está orientado el servicio, esto debido a que existe mayor número de portadoras en recepción móvil que en fija. Dichos PPP son símbolos con amplitud y fase, los mismos que son conocidos por los receptores, quienes los usan para estimar/ecualizar las características del canal en tiempo y frecuencia. El estándar utiliza también supertramas, las mismas que están conformadas por varias tramas T2 y entrelazadas entre estas las tramas de extensión futura (*FEF – Future Extension Frame*), que son utilizadas para poder brindar servicios adicionales. La duración de una supertrama es de 64 segundos (cuando las FEF no son usadas), mientras que las tramas FEF al igual que las T2, tienen una duración máxima de 250 ms. Cada una de ellas contiene un preámbulo OFDM P1 que indica el inicio de una trama y posibilita una rápida detección y sincronización, posterior a este se insertan uno o varios símbolos OFDM P2 con señalización de capa física e información sobre como decodificar los datos de usuario, en el caso de tamaños de FFT 16K y 32K existe un único símbolo. Y por último la trama tendrá un número configurable de símbolos de datos OFDM.

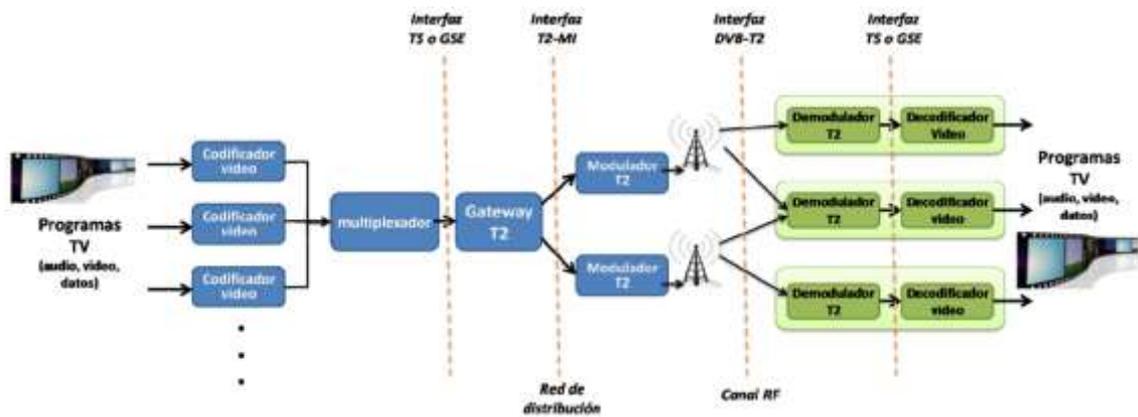


**Figura 1.4.** Estructura de trama del sistema DVB-T2 [16]

Por otro lado la utilización de múltiples tuberías de capa física (MPLPs), permiten la transmisión de los servicios solicitados en un mismo canal de RF, con independientes esquemas de modulación, protección FEC y entrelazado temporal en capa física que son aplicados separadamente a cada PLP, de tal manera que se transmiten los datos de un mismo PLP en diferentes instantes de tiempo, combatiendo de esta manera la pérdida de información provocada por los efectos de desvanecimiento lento (Shadowing). Además estas PLPs pueden ser codificadas con bajos niveles de CNR, lo que provee de servicios a terminales fijos de una forma más flexible.

Además DVB-T2 usa un método de diversidad de transmisor, conocido como codificación de Alamouti, que mejora la cobertura en redes de frecuencia única (SFN). Y el uso de la técnica de constelaciones rotadas que consiste en aplicar un determinado ángulo de giro a todos los puntos de la constelación, de tal forma que cada una de las componentes de fase (I) y cuadratura (Q) que definen un símbolo contengan información suficiente para identificar el punto exacto en recepción. También el estándar define dos Mecanismos de Reducción de la Potencia de Pico de la Señal Transmitida (*PAPR - Peak-to-Average Power Ratio*), una de las técnicas es conocida como Tonos Reservados (TR), donde el 1% de las portadoras útiles de datos son reservadas para insertar valores previamente calculados que contrarresten los picos de potencias del resto de portadoras. La transmisión es señalizada para indicar al receptor que ignore la información presente en estas portadoras. La otra técnica es la Extensión Activa de la Constelación (ACE), la cual consiste en separar del centro de la constelación los símbolos que están en los bordes de la misma, con el objetivo de causar una reducción en los picos de la señal. Es importante mencionar además que DVB-T2 presenta la transmisión eficiente de contenidos IP, ya que aunque las tramas banda base de DVB-T2 son paquetes MPEG-TS, los campos de señalización del encabezado son compatibles con el formato IP para el transporte de información.

Un sistema DVB-T2, puede ser dividido en 3 subsistemas en la parte de transmisión y 2 subsistemas en la parte de recepción. En transmisión los subsistemas Multiplexador, Gateway T2 y Modulador T2, cuentan con 2 interfaces de comunicación entre ellos; TS (*Transport Stream*) / GSE (*Generic Standar Encapsulation*) y T2-MI (*T2 Modulator Interface*).



**Figura 1.5.** Arquitectura general de un sistema DVB-T2 [16]

El Gateway T2, adapta el flujo y transporte de la señal a los moduladores que conforman la red y sincroniza la SFN, a más de distribuir y asignar recursos. El Gateway construye paquetes T2-MI con la información de las tramas banda base, la información de señalización L1, las marcas de tiempo de los servicios y las referencias de sincronización, los encapsula en paquetes MPEG2-TS y los transmite a través de la red de distribución. Por su parte el Modulador T2 recibe las tramas banda base T2 (datos + encabezado de trama) contenidas en cada T2-MI y construye la señal DVB-T2 de capa física siguiendo todas las opciones de configuración de entrelazado, codificación de canal, mapeado y modulación OFDM.

En transmisión en cambio los dos subsistemas existentes Demodulador T2 y Decodificador de Video, comparten una interfaz de comunicación entre ellos (TS ó GSE). El Demodulador T2, recibe la señal de radiofrecuencia de uno o varios transmisores de la red y entrega un flujo MPEG2-TS o GSE al subsistema de decodificación. Este flujo de datos contiene uno o más servicios, así como la señalización derivada de la tubería de capa física (*PLP - Physical Layer Pipes*) común, además de estimadores de canal, entre otros. Por su parte el Decodificador de Video recibe el flujo del Demodulador y decodifica el audio, video y datos de cada servicio.

## 1.5. Descripción de la tesis y principales contribuciones

La presente tesis está organizada en siete capítulos de la siguiente forma: el capítulo 1 presenta la identificación del problema, la hipótesis y los objetivos establecidos para el desarrollo de esta tesis de doctorado, a más del estado del arte sobre las características de las tecnologías de TDT.

En el capítulo 2 se explican las características, prestaciones y el diseño de capa física y MAC de la tecnología DVB-RCT, además de describir las principales novedades de DVB-T2 con respecto a DVB-T.

El capítulo 3 se enfoca en el diseño del nuevo estándar DVB-RCT2, basándose en los estándares DVB-T2 y DVB-RCT. En este sentido de DVB-T2 utilizará las siguientes funcionalidades (i) mecanismos de corrección de errores LDPC+BCH, (ii) constelación 256QAM y constelaciones rotadas, (iii) entrelazado temporal, (iv) tamaños de FFT 16K y 32K, con los modos de portadoras extendidos, (v) patrones de portadoras piloto PP1 a PP7, (vi) protocolo de encapsulación GSE, (vii) tramas de extensión futura FEFs. Mientras que de DVB-RCT se propone adoptar para DVB-RCT2 las siguientes características, (i) tramas de transmisión (TF1, TF2), (ii) estructuras de ráfaga (BS1, BS2, BS3), (iii) conformado de señal Nyquist y rectangular, (iv) esquemas de acceso al medio (sincronización, MAS1, MAS2, MAS3).

En el Capítulo 4 se evalúan las prestaciones que tendría DVB-RCT2, con respecto a la tecnología predecesora DVB-RCT, en cuanto a capacidad y cobertura. Además este capítulo se encarga de la estimación de planificación de redes de TDT, y de describir los resultados de dicha planificación.

En el capítulo 5 se evalúa el impacto de la posible implementación de DVB-RCT2, a fin de proporcionar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales, para lo cual se siguió una metodología aprobada por el Banco Mundial para implementar una evaluación de impacto, la misma que consta de cinco fases que son: (i) preparar la evaluación, (ii) hacer operativo el diseño de la evaluación, (iii) elegir la muestra de una población dada, (iv) recolectar datos, y (v) producir y divulgar los resultados.

En el capítulo 6 se analiza el uso de 4G-LTE como tecnología sustitutiva a la solución de TDT propuesta, para lo cual se describe la tecnología de cuarta generación y se la compara con la tecnología de TDT propuesta.

Finalmente en el capítulo 7 se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación doctoral.

Las contribuciones más importantes de esta tesis doctoral en cada uno de sus capítulos están resumidas a continuación:

## **Capítulo 2**

Aunque el capítulo 2, no presenta una contribución original, el mismo describe los fundamentos de la tecnología DVB-RCT, así como las principales novedades de DVB-T2, con respecto a DVB-T, enumerando las principales características de las mismas, que luego serán utilizadas para diseñar el nuevo estándar DVB-RCT2.

## **Capítulo 3**

En esta tesis de doctorado se propone reimpulsar y mejorar el canal de retorno UL (uplink),

desarrollando una segunda-generación del estándar DVB-RCT, DVB-RCT2 (*Return Channel Terrestrial 2nd Generation*), para lo cual se utilizará los principios de DVB-RCT y los avances tecnológicos de DVB-T2 para aplicarlos en el UL. DVB-RCT2 es una propuesta innovadora puesto que podría ser utilizada en DL con cualquier tecnología de TDT (ISDB-Tb, DVB-T o DVB-T2), si se usan el transmisor y decodificador (set-top-box) adecuados, permitiendo además que la transmisión de TV en el canal de difusión DL (downlink) y la petición de contenidos de Internet por parte de los usuarios en UL, sean completamente independientes uno del otro, no existiendo cruce de señalización entre dichos medios. A diferencia por ejemplo de otras tecnologías como TDT híbrida que funciona solamente en el estándar europeo DVB, utilizando la tecnología HBB (*Hybrid Broadcast Broadband*), en donde en el canal de difusión (Broadcast), se emite una señalización específica, la cual permite la directa localización de los contenidos del emisor en el canal de acceso a Internet (Broadband), necesitando de manera forzosa la sincronización de contenidos de ambos canales.

En este sentido, la mayor contribución de este capítulo es el diseño del nuevo estándar DVB-RCT2 utilizando los principios de DVB-RCT y los avances tecnológicos de DVB-T2, además de la particularización tanto de capa física como de capa MAC de este nuevo estándar. Así en la capa física se considerarán; (i) los modos de transmisión, (ii) las estructuras de ráfagas (BS1, BS2, BS3), y (iii) los esquemas de acceso al medio (MAS) para diferentes tamaños de FFT; y en la capa MAC (i) los modos de acceso, todo esto considerando un ancho de banda de 6 MHz, debido a que este ancho de banda es utilizado en Latinoamérica para transmitir los canales de TV en formato digital (TDT).

Es importante mencionar que para obtener los datos de esta investigación se ha emulado las condiciones del canal DVB-RCT2 en un laboratorio de radiodifusión, donde se ha generado el flujo de transporte de RCT2, obteniendo valores sobre el funcionamiento tanto de capa física como de MAC, que están representados en tablas, constatando así las capacidades de DVB-RCT2 sobre DVB-RCT, lo que lo convierte en una interesante alternativa para proporcionar acceso a Internet a zonas rurales.

#### **Capítulo 4**

En este capítulo se presentan algunas contribuciones interesantes, es así que en primer lugar se muestra la evaluación inicial de prestaciones para tecnologías de TDT. Haciendo énfasis en la ganancia en capacidad, máxima capacidad de transmisión, mínima CNR, entre otros para diferentes sistemas de TDT tanto en DL como en UL. En segundo lugar en este capítulo se trata la planificación de redes de TDT, en donde se realiza entre otras cosas, los cálculos para obtener la relación portadora a ruido (CNR), el balance de enlace (Link Budget), intensidad de campo eléctrico ( $E_{\min}$ ) para diferentes tecnologías de TDT incluida DVB-RCT2, además se muestra las

diferencias en el cálculo del balance de enlace para las tecnologías de TDT, y se define el escenario a ser utilizado en donde se muestran las ubicaciones y parámetros técnicos actuales de transmisores de TV utilizados así como la población existente en dicho escenario de pruebas, para en tercer lugar realizar el análisis de cobertura así como de interferencias tanto en DL como en UL y mostrar los resultados de planificación en una zona rural de la República del Ecuador. Finalmente en cuarto lugar se muestra un estudio de distancia óptima realizado con el fin de obtener la distancia a la que deberían encontrarse las estaciones base, en el caso de necesitar nuevas instalaciones, esto para reducir las interferencias y aumentar el área de cobertura.

Cabe destacar que en esta investigación doctoral se plantea proveer de conectividad a Internet en zonas rurales de América Latina, y como se detalla en desarrollo de esta tesis, para las emisiones de TDT los países de la región han adoptado en su mayoría el estándar japonés-brasileño ISDB-Tb, a excepción de Panamá y Colombia que utilizan las normas europeas DVB-T y DVB-T2 respectivamente. Razón por la cual para mostrar los resultados de planificación se utilizaron las tecnologías ISDB-Tb en el DL y DVB-RCT2 en el UL, aunque a lo largo del capítulo 4, se pueden observar datos referentes a las tecnologías de DL DVB-T y DVB-T2.

## **Capítulo 5**

Debido a que evaluar constituye un proceso sistemático, metódico y neutral que hace posible el conocimiento de los efectos de un programa o proyecto. Además que facilita la identificación, recolección e interpretación de informaciones útiles a los encargados de tomar decisiones y a los responsables de la ejecución y gestión de los programas y/o proyectos, es importante conocer qué pasaría si se llegaría a implementar una tecnología como la propuesta en esta tesis doctoral en zonas rurales en donde el servicio de Internet es escaso. Es así que el aporte más significativo de este capítulo es el establecimiento del efecto causal de la posible implementación de la tecnología DVB-RCT2 para proveer conectividad a Internet en zonas rurales de Latinoamérica, para lo cual se realizó una evaluación ex ante utilizando las cinco fases detalladas el informe de evaluación de impacto desarrollado por el Banco Mundial.

## **Capítulo 6**

La digitalización de la TV conlleva la liberación de parte del espectro radioeléctrico cuyo uso está previsto para comunicaciones de cuarta generación 4G. Este proceso llamado dividendo digital (DD), corresponde en América (Región 1 de la UIT) a la banda de 700 MHz (canales 52 al 69 de TV) [2]. Con el despliegue de 4G en esta banda se espera mejorar el acceso a Internet en zonas rurales, gracias a las velocidades de transmisión que provee y a las mejores condiciones de propagación y penetración que presentan. Razón por la cual la contribución más importante de este capítulo radica en la comparativa realizada entre la tecnología de TDT propuesta (DVB-RCT2) y la tecnología celular de cuarta generación 4G LTE para proporcionar servicios de

conectividad a Internet a zonas rurales. En este capítulo se analizan datos técnicos como anchos de banda utilizados, máximas velocidades tanto en DL como en UL, metodologías de acceso, número de portadoras utilizadas, entre otros.

### **Capítulo 7**

Las conclusiones mostradas en este capítulo describen una interesante propuesta para lograr acceso universal a Internet en zonas rurales de Latinoamérica, utilizando un canal de TDT con retorno inalámbrico, con lo cual se reutilizaría la infraestructura de TDT, para permitir la conexión a Internet disminuyendo los costos de implementación y utilización, puesto que llegaría a todos los hogares que tengan acceso a la TDT.

## **1.6. Diseminación y lista de publicaciones**

### **Revistas internacionales**

- [RI1] Radicelli-García, C.; Cardona, N., “Propuesta de conectividad a Internet para zonas rurales mediante un canal de retorno para ISDB-Tb,” publicado en Revista Cultura Científica y Tecnológica, (CULCyT), Universidad Autónoma de Ciudad Juárez - México, año 12, no 55, pp 4-15, Enero-Abril, 2015.
- [RI2] Radicelli-García, C.; Cardona, N.; Gómez-Barquero, D., “A Second-Generation Digital Terrestrial Television Wireless Return Channel Standard for Providing Internet Connectivity in Rural Areas in Latin America,” publicado en Revista IEEE Latin America Transactions, vol 13, no 9, pp 2837-2844 Septiembre 2015.
- [RI3] Radicelli-García, C.; Cardona, N., “Configurable parameters of physical and MAC layer of a new DTT standard wireless return channel to provide Internet connectivity in rural areas of Latin America,” publicado en Revista DYNA, Universidad Nacional de Colombia, vol 83, no 198, pp 16-26 Septiembre 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n198.52242>.
- [RI4] Radicelli-García, C.; “Propuesta de capa física y MAC de un nuevo estándar de TDT (DVB-RCT2),” publicado en Revista Episteme, Universidad de los Andes (UNIANDES) – Ecuador, vol 3, no 3, pp 1-28 Septiembre 2016.
- [RI5] Radicelli-García, C.; “Evaluación de impacto de la posible implementación de un nuevo estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico (DVB-RCT2),” enviado a Revista Cultura Científica y Tecnológica, (CULCyT), Universidad Autónoma de Ciudad Juárez – México.

### **Conferencias internacionales**

- [CI1] Radicelli-García, C.; Cardona, N., “New DTT services implemented on the design of the second-generation digital terrestrial television wireless return channel standard (DVB-RCT2),” 2015 International Conference on Electrical and Electronics: Techniques and Applications (EETA 2015), Phuket-Tailandia.
- [CI2] Radicelli-García, C.; Cardona, N., “Segunda generación del estándar de Televisión Digital Terrestre (TDT) con canal de retorno inalámbrico para proveer conectividad a Internet en zonas rurales de Latinoamérica,” III Congreso Científico Internacional UNIANDES - Impacto de las investigaciones universitarias, Ambato-Ecuador, 2015.
- [CI3] Radicelli-García, C.; Cardona, N., “T-LEARNING mediante el diseño de un estándar de

TDT y el uso de aplicaciones TICs,” I Congreso Internacional Educación Contemporánea Calidad Educativa y Buen Vivir, Riobamba-Ecuador, 2015.

- [CI4] Radicelli-García, C., “DVB-RCT2 vs 4G LTE para Proveer Conectividad a Internet a Zonas Rurales de América Latina,” IX Conferencia Científica de Telecomunicaciones, Tecnologías de la Información y Comunicaciones, Quito-Ecuador, 2016.
- [CI5] Radicelli-García, C.; Cardona, N., “DVB-RCT2 vs 4G LTE para difundir contenidos digitales educativos en zonas Rurales del Ecuador,” II Congreso Internacional Educación Contemporánea Calidad Educativa y Buen Vivir, Riobamba-Ecuador, 2016.

#### **Conferencias nacionales**

- [CN1] Radicelli-García, “Diseño y validación de la segunda generación del estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico, para proveer conectividad a Internet en zonas rurales en Latinoamérica,” Primer Encuentro de Estudiantes de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, 2014.

# Capítulo 2

## Fundamentos de las tecnologías DVB-RCT y DVB-T2

### 2.1. Tecnología DVB-RCT

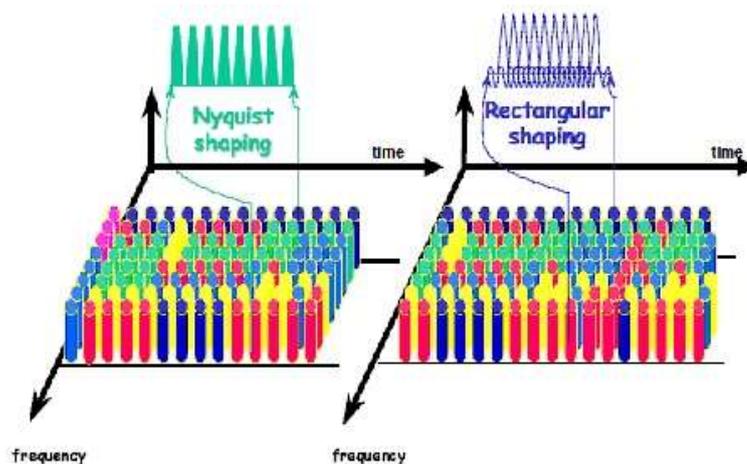
Para proveer un canal de retorno inalámbrico compartido para DVB-T, DVB-RCT usa un canal de radiofrecuencia dedicado y lo organiza para permitir el acceso concurrente desde muchos terminales de usuario individuales (RCTTs). El método usado para organizar dicho canal de retorno es dividiéndolo en dominios de tiempo y frecuencia, obteniendo de esta manera una malla de ranuras tiempo frecuencia, en donde cada ranura es asignable a un RCTT.

Para la organización del canal de retorno a nivel de capa física, el estándar provee dos conformados de señal; con el fin de dotar de inmunidad contra la interferencia entre portadora (ICI) y la interferencia entre símbolo (ISI).

**Conformado de Nyquist (Nyquist shaping).**- usa filtrado de Nyquist en tiempo sobre cada portadora, sirve también para brindar inmunidad contra jammers.

**Conformado Rectangular (Rectangular shaping).**- usa una disposición ortogonal de las portadoras y un GI (1/4, 1/8, 1/16 y 1/32) entre los símbolos modulados, sirve además para combatir los efectos de la propagación multicamino.

El uso de los conformados es estrictamente exclusivo, es decir que estos no pueden ser utilizados al mismo tiempo en el canal de retorno. En la Figura 2.1 se muestran los dos tipos de conformados.



**Figura 2.1.** Organización del canal de radiofrecuencia de DVB-RCT [21]

Dependiendo del modo de transmisión usado, la señal total en el aire se compone de un conjunto de portadoras (1K o 2K) adyacentes moduladas sincrónicamente por el RCTT activo. El proceso MAC dentro del INA en la estación base, administra la asignación de portadoras a los RCTTs.

Además el estándar DVB-RCT define dos tipos de tramas de transmisión (*Transmission Frame - TF*), las mismas que proveen las características necesarias para permitir la demodulación en la estación base.

**TF1.-** se compone de un conjunto de símbolos OFDM, que contienen varios Subcanales de Datos, un Símbolo Nulo y una serie de Símbolos de Sincronización/Aleatorio.

**TF2.-** se compone de un conjunto de símbolos OFDM de propósito general, que contienen ya sea Datos o Subcanales de Sincronización/Aleatoriedad.

El RCTT transmite ráfagas de datos, mediante las estructuras de ráfagas de datos (*Burst Structure - BS*), y lo hace en base a un número entero de celdas ATM (una celda ATM es el contenedor común usado para llevar el control MAC o los mensajes de datos MAC). Sea cual sea la tasa de codificación y la modulación física, las BS tienen una capacidad de ráfaga constante de 144 símbolos modulados.

DVB-RCT define tres estructuras de ráfagas BS1, BS2 y BS3 que tienen sus propias características con respecto a la división de las ráfagas de datos y las portadoras piloto a través de las ranuras tiempo/frecuencia.

La asignación de las estructuras de ráfaga (BS) en las tramas de transmisión (TF), es controlado por el proceso MAC que se ejecuta en la estación base, para esto existen tres métodos llamados Esquemas de Acceso al Medio (MAS - *Medium Access Scheme*), que a su vez están relacionados con los modos de acceso que tendrán los RCTTs para solicitar recursos a la estación base.

El TF1 es adecuado para los Esquemas de Acceso al Medio 1 y 2 (MAS1 y MAS2), que describen el método de asignación para BS1 y BS2 respectivamente. El TF2 en cambio es usado solamente para MAS3, y provee el método de asignación a ser usado en BS3 y BS2. En la Tabla 2.1 se definen las 4 combinaciones existentes para crear los Esquemas de Acceso al Medio, y se indican los modos de acceso correspondientes.

Esquema de acceso	Trama de transmisión	Estructura de ráfaga	Modo de acceso
N/A	N/A	N/A	Acceso de sincronización
MAS1	TF1	BS1	Acceso de tasa fija
MAS2	TF1	BS2	Acceso de contención
MAS3	TF2	BS3	Acceso de reserva
MAS3	TF2	BS2 (opcional)	

**Tabla 2.1.** Esquemas de acceso al medio del estándar DVB-RCT

### 2.1.1. Capa física

#### Modos de transmisión

DVB-RCT especifica 6 modos de operación definidos por el máximo número de portadoras usadas, dado por el tamaño de la FFT (1K y 2K), y su distancia entre-portadora (CS - *Carrier Spacing*). Solamente un modo de transmisión podrá ser implementado en un canal de radiofrecuencia. En la Tabla 2.2 se indican las distancias entre-portadora aproximadas para un canal de 6 MHz.

Distancia entre-portadora	
CS1	0,84 kHz
CS2	1,67 kHz
CS3	3,35 kHz

**Tabla 2.2.** Distancias entre-portadora para un canal de 6 MHz

La distancia entre-portadora controla la robustez del sistema en lo que respecta a la posible desincronización de cualquier RCTT. Cada valor implica un tamaño de celda de transmisión máxima y brinda una resistencia al efecto Doppler cuando el RCTT está en movimiento.

En la Tabla 2.3, se indican los parámetros de los modos de transmisión aplicables para el estándar DVB-RCT utilizando un canal de radiofrecuencia de 6 MHz, en donde:

**Portadoras totales del sistema (Tsc):** es el número total de portadoras manejadas por el estándar DVB-RCT.

**Portadoras útiles (Cu):** el máximo número de portadoras efectivamente usadas por el RCTT.

**Reloj del sistema RCT (T):** se deriva del estándar DVB-T, en donde el reloj del sistema definido para un canal de 6MHz es de 48/7 MHz o 7/48 us.

Por consiguiente el reloj del sistema para DVB-RCT será:

En el caso de CS1, 4 veces el período del reloj del sistema de DVB-T;

En el caso de CS2, 2 veces el período del reloj del sistema de DVB-T;

En el caso de CS3, 1 vez el período del reloj del sistema de DVB-T;

**Duración del símbolo útil (Tu):** es el período útil del símbolo, expresado como:  $Tu = Tsc * T$

**Distancia entre-portadora (Cs):** viene expresada como:  $Cs = 1/Tu$

**Ancho de banda del canal RCT (Bu):** es el ancho de banda usado en el canal DVB-RCT, viene expresado como:  $Bu = Cs * Cu$ .

Sistema DVB-RCT 6 MHz		
Portadoras totales del Sistema (Tsc)	1024 (1K)	2048 (2K)
Portadoras útiles (Cu)	842	1712
Reloj del sistema RCT (T)	1,167 us	0,583 us
Duración del símbolo útil (Tu)	1195 us	1195 us
Distancia entre-portadora1 (Cs1)	837 Hz	837 Hz
Ancho de banda del canal RCT (Bu)	0,705 MHz	1,433 MHz
Reloj del sistema RCT (T)	0,583 us	0,292 us
Duración del símbolo útil (Tu)	597 us	597 us
Distancia entre-portadora2 (Cs2)	1674 Hz	1674 Hz
Ancho de banda del canal RCT (Bu)	1,410 MHz	2,866 MHz
Reloj del sistema RCT (T)	0,292 us	0,146 us
Duración del símbolo útil (Tu)	299 us	299 us
Distancia entre-portadora3 (Cs3)	3348 Hz	3348 Hz
Ancho de banda del canal RCT (Bu)	2,819MHz	5,732 MHz

**Tabla 2.3.** Modos de transmisión del estándar DVB-RCT para un canal de 6 MHz

Cada combinación tiene una compensación específica entre la diversidad en frecuencia y la diversidad en tiempo, y además entre el rango de cobertura y la capacidad de portabilidad.

### Tramas de transmisión (TF)

Las tramas de transmisión proveen al canal de radiofrecuencia de una estructura repetitiva, compuesta de un conjunto de ranuras tiempo/frecuencia, en las que Símbolos Nulos, Símbolos Sincronización/Aleatorios, Símbolos de Datos y Símbolos Pilotos son embebidos para proveer recursos para la sincronización y transmisión de datos.

El proceso MAC que se ejecuta en la estación base maneja los recursos provistos por las tramas de transmisión.

TF1 organiza el canal en el dominio del tiempo, usando conjuntos específicos de símbolos OFDM para transmitir símbolos nulos, símbolos aleatorios/sincronización y símbolos de usuario. Mientras que TF2 organiza el canal en el dominio de la frecuencia, donde un conjunto de 5 subcanales consecutivos (llamados subcanales aleatorios), son usados para sincronización,

mientras que el resto de subcanales son usados para transmisión de datos.

### Organización de TF1 en el dominio del tiempo

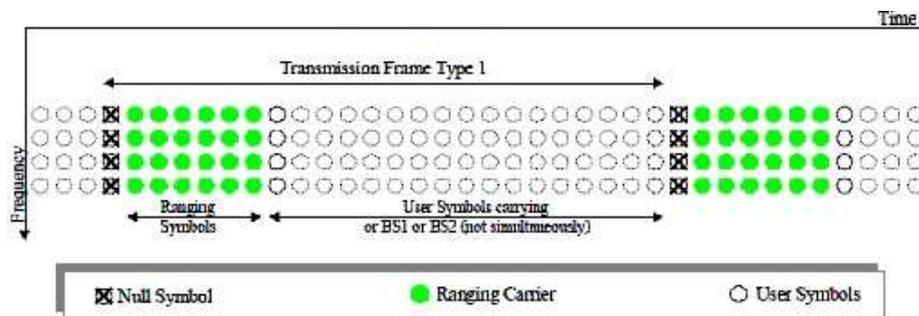
**TF1.-** puede llevar las siguientes tres categorías de símbolos:

**Símbolo Nulo.-** ninguna transmisión ocurrirá en el primer símbolo OFDM de la trama de transmisión. Este símbolo provee la detección del jammer de la estación base receptora.

**Símbolos Aleatorios.-** muchos símbolos consecutivos OFDM (6, 12, 24 o 48) son provistos para permitir características de aleatoriedad al RCTT.

**Símbolos de usuario.-** parte de la trama de transmisión permite la transmisión de estructuras de ráfagas de datos (BS1 o BS2), las cuales incluyen datos de usuario y portadoras piloto. Tanto BS1 como BS2 hacen uso de un conjunto de portadoras, llamadas subcanales que se encuentran repartidos en todo el canal.

Además los símbolos de usuario pueden llevar una BS1 o cuatro BS2, y tanto BS1 como BS2 no podrán ser utilizadas al mismo tiempo.



**Figura 2.2.** Organización de la TF1 en el dominio del tiempo [21]

En la Figura 2.2, se muestra la organización de la TF1, aquí los símbolos nulos y los aleatorios siempre usarán el conformado rectangular; mientras que los símbolos de usuario utilizan el conformado rectangular o el conformado de Nyquist.

Si los símbolos de usuario usan el conformado rectangular, el valor del GI será idéntico para todos los símbolos OFDM embebidos en la trama TF1. Si en cambio usa el conformado de Nyquist el valor del GI se aplicará sobre el Símbolo Nulo y los Símbolos Aleatorios y el mismo será de  $\frac{1}{4}$ .

### Organización de TF2 en el dominio de la frecuencia

En la Figura 2.3, se muestra la organización de TF2 en el dominio de la frecuencia en donde dependiendo del conjunto de portadoras (1K o 2K), se tiene un número de portadoras útiles, pero además se cuenta con un número de portadoras no usadas que se ubican en el borde del

canal a ambos lados, para proveer de una banda que sirva de protección para los canales adyacentes. En el caso de 1K son 91 portadoras y en el de 2K son 168 portadoras a cada lado. Además algunas portadoras (portadoras DC) no son usadas para simplicidad del canal de radiofrecuencia.

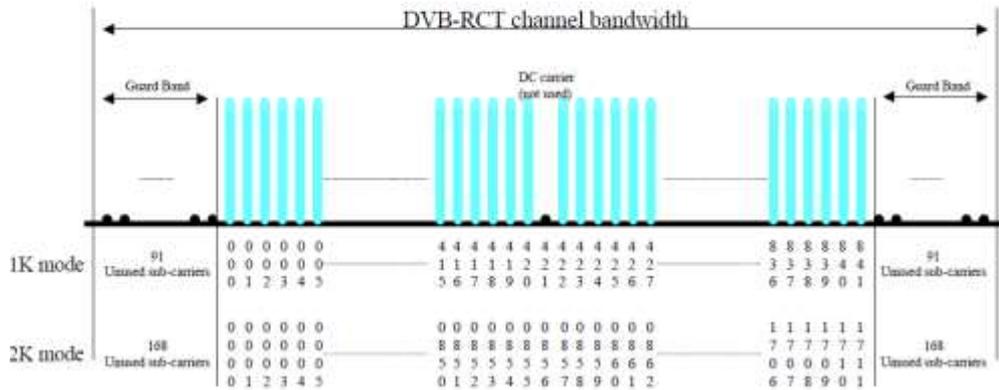


Figura 2.3. Organización del canal RCT para los modos 1K y 2K, dominio de la frecuencia [21]

**TF2.-** podrá llevar dos de las siguientes categorías de símbolos en el mismo símbolo OFDM.

**Símbolos aleatorios.-** 8 intervalos aleatorios (hechos de 6 símbolos consecutivos), que brindan funciones de aleatoriedad.

**Símbolos de usuario.-** llevan las estructuras de ráfagas de datos (BS3 o BS2), que incluyen portadoras de datos y pilotos. Tanto BS2 como BS3 hacen uso de un conjunto de portadoras, llamadas subcanales que se encuentran repartidos en todo el canal.

Los símbolos de usuario de la TF2 permite el uso de la BS3 u opcionalmente de la BS2. Cuando una BS2 es transmitida, esta deberá ser completada por un conjunto de 4 símbolos nulos modulados con el objetivo de alcanzar una duración igual a la duración de ocho BS3.

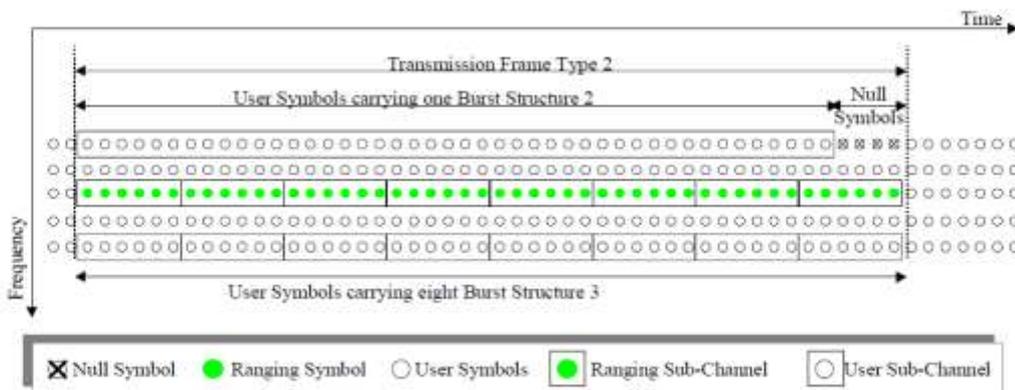
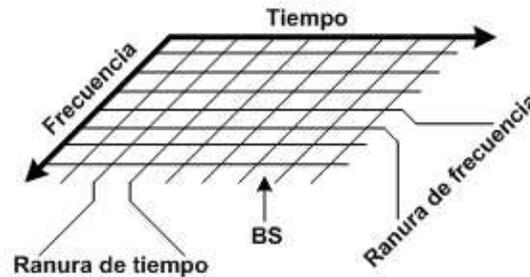


Figura 2.4. Organización de la TF2 en el dominio del tiempo [21]

En la Figura 2.4 se muestra la organización de la TF2, aquí se utilizará solo el conformado Rectangular por lo que el valor del GI será idéntico para todos los símbolos OFDM embebidos en la trama TF2.

## Estructuras de ráfagas de datos (BS)

El canal de retorno es dividido en una malla de ranuras de tiempo/frecuencia, en donde en cada ranura de tiempo se pueden usar diferentes frecuencias simultáneamente para transmitir. Esto es conocido como estructura de ráfaga de datos (BS) y es la ranura de transmisión básica asignada a un RCTT, en la Figura 2.5 se ilustra el concepto.



**Figura 2.5.** Ranuras de transmisión básica de un RCTT

El estándar define tres estructuras de ráfaga que brindan varias combinaciones diversas en tiempo y frecuencia, proporcionado de esta manera diferentes grados de robustez, duración de ráfaga y un amplio rango de capacidad tasa de bits al sistema.

Cada BS hace uso de un conjunto de portadoras llamadas subcanales. Uno o muchos subcanales pueden ser usados simultáneamente por un RCTT dependiendo de la asignación realizada por el proceso MAC.

**BS1.-** Está formada por una única portadora (1 subcanal) para llevar la ráfaga de datos total (144 símbolos de datos modulados) sobre la componente del tiempo, con un salto de frecuencia opcional aplicado dentro de la duración de la ráfaga;

**BS2.-** usará simultáneamente 4 portadoras (4 subcanales) llevando cada una, la cuarta parte del total de ráfaga de datos (36 símbolos de datos modulados por portadora).

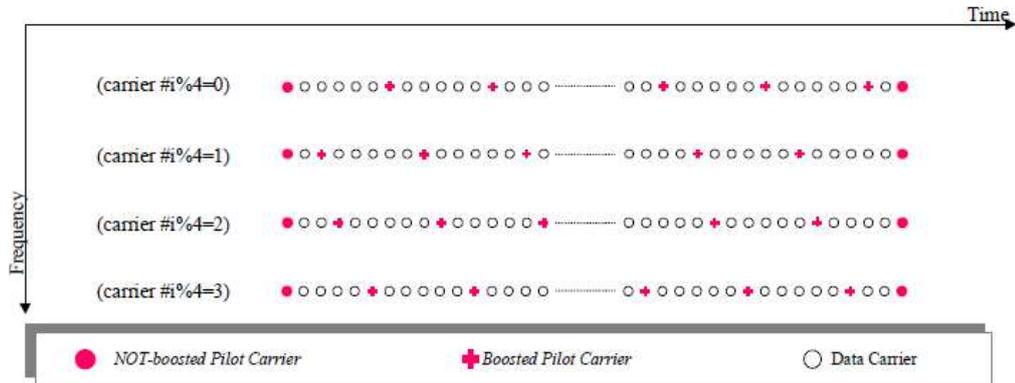
**BS3.-** usará simultáneamente 29 portadoras (29 subcanales) llevando cada una, la vigésima novena parte del total de ráfaga de datos (aproximadamente 4,97 símbolos de datos modulados por portadora).

En BS2 y BS3 dichas portadoras no son consecutivas, pero están esparcidas a través de todo el canal de radiofrecuencia.

Las 3 estructuras de ráfaga proveen un esquema de modulación asistida de piloto que permite la detección coherente en la estación base. La relación de inserción de pilotos es de aproximadamente 1/6, lo que significa que un patrón de portadoras piloto (PPP) es insertado cada 5 portadoras de datos.

## Definición de BS1

El subcanal de BS1 está compuesto de 4 mini-ráfagas que a su vez tienen portadoras de datos y portadoras piloto, estas últimas tienen un patrón de distribución específico que se indica en la Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Esquema de inserción de pilotos para las mini-ráfagas de BS1 [21]

La asignación de una portadora a la primera mini-ráfaga del subcanal será conforme con el valor dado en la Tabla 2.4.

	Modo 1K	Modo 2K
<b>Número virtual de portadoras en un símbolo OFDM</b>	1024	2048
<b>Portadoras totales</b>	842	1712
<b>Banda de guarda en cada borde</b>	91	168
<b>Número máximo de portadoras útiles ( número subcanales BS1)</b>	840	1708
<b>Número de portadoras excluidas</b>	0, 421	0, 1, 856, 1711
<b>Numeración del subcanal</b>	del 1 al 420; y del 422 al 841	del 2 al 855; y del 857 al 1710

**Tabla 2.4.** Asignación de parámetros para conformado Rectangular y Nyquist, subcanal BS1

## BS1 sin salto de frecuencia

La asignación de datos será hecha secuencialmente, después de la decodificación, el entrelazo y la conversión del flujo binario a las constelaciones, sobre las 4 mini-ráfagas consecutivas de una ráfaga BS1.

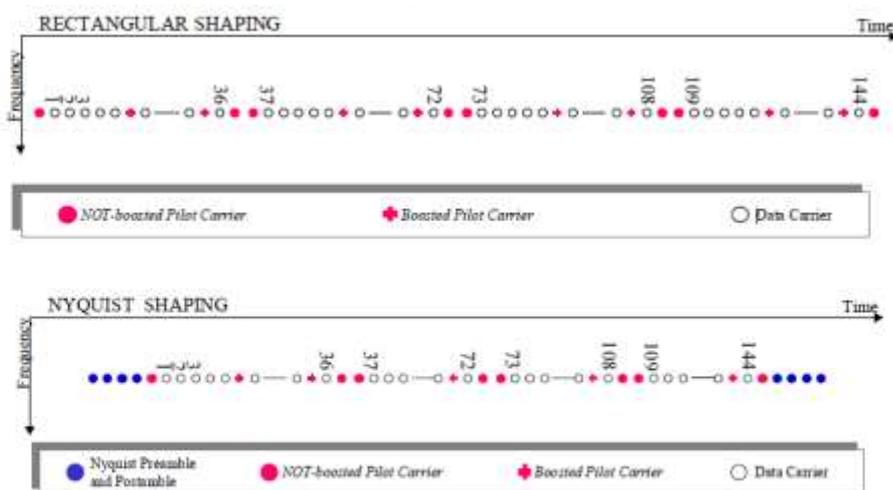
Cada una de las 4 mini-ráfagas, se asignarán a la misma portadora, en una secuencia de tiempo. La asignación de una portadora al subcanal, para la opción sin salto de frecuencia, será conforme a los valores de la Tabla 2.5.

	Rectangular	Nyquist
<b>Símbolos de datos en una mini-ráfaga</b>	36	36
<b>Símbolos piloto en una mini-ráfaga</b>	9	9
<b>Símbolos de datos en una ráfaga</b>	144	144

<b>Símbolos piloto en una ráfaga</b>	36	36
<b>Símbolos nulos pre/post preámbulo</b>	0	8
<b>Total de símbolos OFDM en la portadora (tiempo de transmisión)</b>	180	188

**Tabla 2.5.** Asignación de parámetros para BS1, opción sin salto de frecuencia

En la figura 2.7 se indica la organización de BS1, realizada sobre una portadora Modulo 4, índice 0 usando conformado Rectangular y de Nyquist respectivamente y utilizando los valores descritos en la Tabla 2.5.



**Figura 2.7.** Organización de BS1, opción sin de salto de frecuencia para conformado Rectangular y de Nyquist [21]

### BS1 con salto de frecuencia (opcional)

Para proveer diversidad de frecuencia para BS1, la opción de salto de frecuencia puede ser implementada para la transmisión de las mini-ráfagas.

La asignación de datos será hecha secuencialmente, como en la opción sin salto de frecuencia

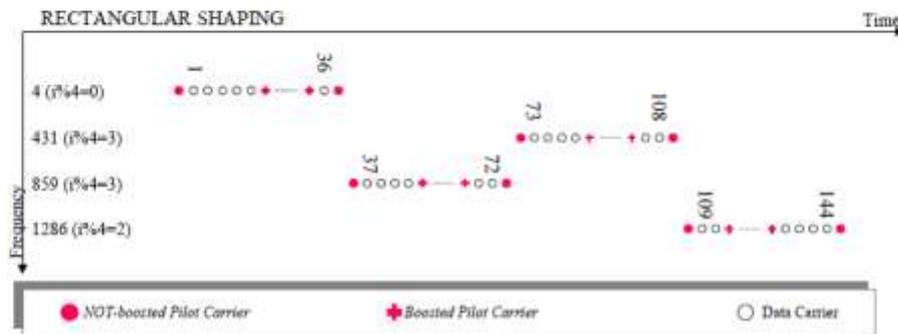
Cada una de las 4 mini-ráfagas, serán asignadas a 4 portadoras diferentes. La asignación de una portadora a un subcanal, con la opción de salto de frecuencia, será conforme los valores de la Tabla 2.6.

	<b>Rectangular</b>	<b>Nyquist</b>
<b>Símbolos de datos en una mini-ráfaga</b>	36	36
<b>Símbolos piloto en una mini-ráfaga</b>	9	9
<b>Símbolos de datos en una ráfaga</b>	144	144
<b>Símbolos piloto en una ráfaga</b>	36	36
<b>Símbolos nulos pre/post preámbulo</b>	0	32*
<b>Total de símbolos OFDM en la portadora (tiempo de transmisión)</b>	180	212

**Tabla 2.6.** Asignación de parámetros para BS1, opción con salto de frecuencia

**Nota:** \* (8 símbolos x 4 portadoras)

En la figura 2.8 se indica la organización de BS1, realizada sobre 4 portadoras (4, 431, 859, 1286) Modulo 4, índice (0, 3, 3, 2) usando conformado Rectangular y utilizando los valores descritos en la Tabla 2.7.



**Figura 2.8.** Organización de BS1, opción con salto de frecuencia para conformado Rectangular [21]

## Definición de BS2

BS2 llevará 144 símbolos de datos, organizados en 4 ráfagas que serán transmitidas simultáneamente en una portadora por separado. Las 4 portadoras usadas forman un subcanal.

El subcanal será definido de acuerdo al uso de BS2 ya sea en el MAS2 o en el MAS3 (opcional).

La asignación de datos será hecha secuencialmente como en BS1, así como la inserción de pilotos.

La asignación de portadoras, será conforme los valores de la Tabla 2.8.

	Rectangular	Nyquist
<b>Símbolos de datos en la ráfaga</b>	144	144
<b>Símbolos piloto en la ráfaga</b>	36*	36*
<b>Símbolos nulos pre/post preámbulo</b>	0	32***
<b>Número total de símbolos de usuario</b>	176	208
<b>Total de símbolos OFDM por portadora (tiempo de transmisión)</b>	45**	53****

**Tabla 2.8.** Asignación de parámetros para conformados de señal Rectangular y Nyquist, subcanal BS2

**Nota:** \* (9 símbolos piloto x 4 portadoras); \*\* (36 símbolos de datos + 9 símbolos piloto); \*\*\* (8 símbolos x 4 portadoras); \*\*\*\* (36 símbolos de datos + 9 símbolos piloto + 8 símbolos nulos)

La figura 2.9, ilustra una BS2 transmitida sobre 4 portadoras Módulo 4, índice (0, 1, 2, 3) respectivamente y usando conformado de señal Rectangular y de Nyquist, y utilizando los valores descritos en la Tabla 2.8.

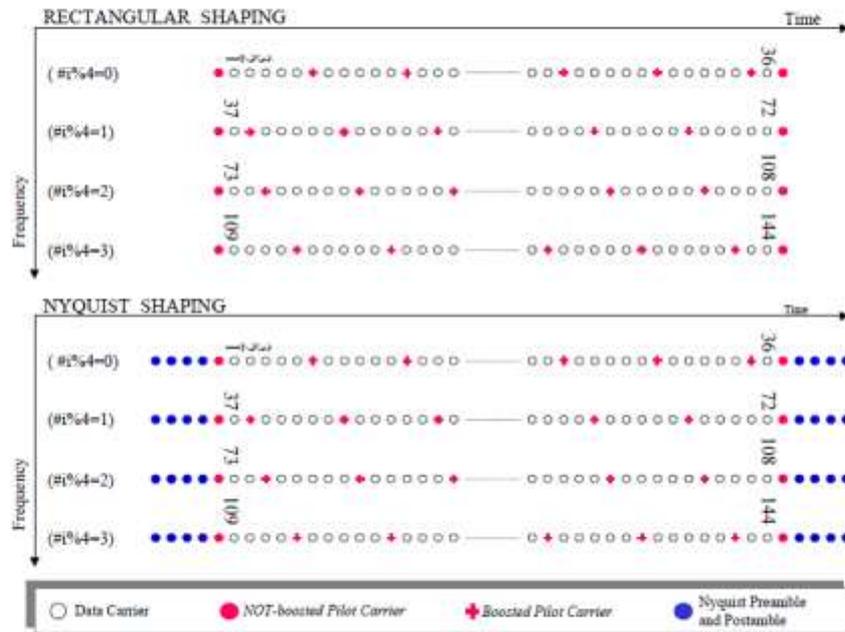


Figura 2.9. Organización de BS2 para conformado Rectangular y de Nyquist [21]

### Asignación de portadora para el esquema de acceso al medio 2 (MAS2)

Cuando se usa MAS2, la asignación de las 4 portadoras al subcanal seguirá los valores descritos en la Tabla 2.9.

	Modo 1K	Modo 2K
<b>Número de portadoras en un símbolo OFDM</b>	1024	2048
<b>Portadoras totales</b>	842	1712
<b>Número máximo de portadoras útiles (4 portadoras)</b>	840	1708
<b>Máximo número de portadoras útiles por cada portadora ( número subcanales BS2)</b>	210	427
<b>Numeración de las portadoras</b>	de 0 a 841	de 0 a 1711
<b>Banda de guarda en la izquierda</b>	91	168
<b>Banda de guarda en la derecha</b>	91	168
<b>Número de portadoras excluidas</b>	0, 421	0, 1, 856, 1711
<b>Numeración del subcanal: SCN</b>	del 1 al 210	del 2 al 428
<b>X</b>	210	427
<b>Y</b>	420	855
<b>Z</b>	630	1282

Tabla 2.9. Asignación de parámetros cuando se usa MAS2, subcanal BS2

Las siguientes fórmulas definen la indexación de la portadora dentro de una asignación de un subcanal para los modos 2K y 1K.

$$\text{Portadora 0} = \text{SCN}$$

$$\text{Portadora 1} = \text{SCN} + \text{X}$$

$$\text{Portadora 2} = \text{SCN} + \text{Y}$$

$$\text{Portadora 3} = \text{SCN} + \text{Z}$$

### Asignación de portadora para el esquema de acceso al medio 3 (MAS3)

Cuando se usa MAS3, la asignación de 4 portadoras al subcanal es realizada por la asignación de un subconjunto de portadoras dentro de un subcanal BS3. Es así que en BS3 se tienen 7 subconjuntos de 4 portadoras cada uno (en total 28 portadoras numeradas de 0 a 28) y se deja una portadora sin usar.

La asignación de portadoras a los subconjuntos de BS2 es obtenida por la siguiente fórmula:

$$\text{Subconjunto\#}(SCN,n) = \text{Portadora\#}(n-1), \text{Portadora\#}(n+6), \text{Portadora\#}(n+13), \text{Portadora\#}(n+20)$$

Donde n indica el número de subconjunto para la asignación del subcanal BS2 dentro de los subconjuntos del subcanal BS3 (7 en total). En este sentido se usa la siguiente fórmula para la asignación de los subcanales de BS2, indicados en la Tabla 2.10.

$$\text{Subcanal BS2\#} = SCN+n; \text{ donde } 1 \leq n \leq 7$$

	Modo 1K	Modo 2K
Número de portadoras en un símbolo OFDM	1024	2048
Numeración del subcanal: SubcanalBS2	1..7, 11..17, 21..27, ..281..287	1..7, 11..17, 21..27, ..581..587

**Tabla 2.10.** Asignación de parámetros subcanal BS2 cuando se usa MAS3 (conformado Rectangular)

El número de subcanales en BS3 está hecho en múltiplos de 10 para permitir la numeración de los subcanales de BS2 dentro de los subcanales de BS3 para el MAS3.

### Definición de BS3

BS3 llevará 144 símbolos de datos transmitidas sobre 29 portadoras. Este grupo de 29 portadoras forman un subcanal.

BS3 puede usarse solamente con conformado de señal rectangular. Su esquema de inserción de pilotos es indicado en la Figura 2.10.

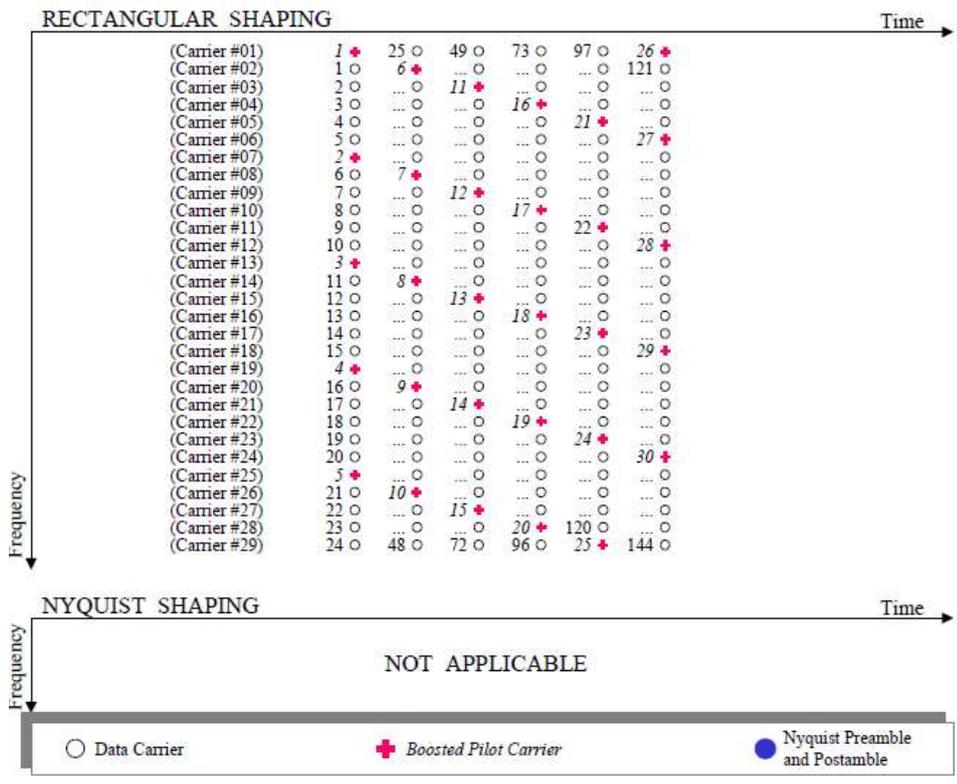


Figura 2.10. Esquema de inserción de pilotos para BS3 [21]

Para la asignación de portadoras, BS3 usará los parámetros del dominio del tiempo y del dominio de la frecuencia descritos en la Tablas 2.11 y 2.12 respectivamente.

	Rectangular	Nyquist
<b>Símbolos de datos en la ráfaga</b>	144	No aplica
<b>Símbolos piloto en la ráfaga</b>	30	No aplica
<b>Número total de símbolos de usuario</b>	174	No aplica
<b>Total de símbolos OFDM por portadora (tiempo de transmisión)</b>	6	No aplica

Tabla 2.11. Asignación de parámetros dominio del tiempo, conformado de señal Rectangular, subcanal BS3

	Modo 1K	Modo 2K
<b>Número de portadoras en un símbolo OFDM</b>	1024	2048
<b>Portadoras totales</b>	842	1712
<b>Numeración de las portadoras</b>	de 0 a 841	de 0 a 1711
<b>Banda de guarda en la izquierda</b>	91	168
<b>Banda de guarda en la derecha</b>	91	168
<b>Número de portadoras excluidas</b>	421	856
<b>Número de subcanales BS3</b>	29	59
<b>Numeración del subcanal: SCN</b>	0, 10, 20, 30, ..280	0, 10, 20, 30, ..580

Tabla 2.12. Asignación de parámetros dominio de la frecuencia, conformado de señal Rectangular, subcanal BS3

## Esquemas de acceso al medio (MAS)

El estándar DVB-RCT ofrece 2 Tramas de Transmisión (TF) y 3 Estructuras de Ráfaga (BS), los Esquemas de Acceso al Medio (MAS1, MAS2 y MAS3) proveen la asignación de una o más BS sobre una TF.

Para todas las BS, la estación base controla el número de subcanales simultáneamente asignados a un RCTT, con las siguientes limitaciones:

- Para conformado de señal Nyquist no más de 64 subcanales podrán ser asignados a un RCTT. Además, cuando muchos subcanales son asignados, la numeración de sus subcanales deberá ser consecutiva.
- Para conformado de señal Rectangular no más de 128 subcanales usando modulación 64QAM, o 192 subcanales usando 16QAM o 384 subcanales usando QPSK, podrán ser asignados a un RCTT.

**MAS1, MAS2, MAS3.-** El número de símbolos usados, símbolos de datos y símbolos de sincronización que constituyen la TF para MAS1, MAS2 y MAS3 deberá cumplir con los valores dados en las Tablas 2.13, 2.14 y 2.15 respectivamente.

	Conformado Rectangular con y sin salto de frecuencia	Conformado de Nyquist sin salto de frecuencia	Conformado de Nyquist con salto de frecuencia
<b>Símbolos OFDM de usuario</b>	180	188	212
<b>Símbolos OFDM nulos</b>	1	1	1
<b>Símbolos OFDM aleatorios/sincronización</b>	6, 12, 24, ó 48	6, 12, 24, ó 48	6, 12, 24, ó 48
<b>Número total de símbolos en una TF</b>	187, 193, 205, ó 229	195, 201, 213, ó 237	219, 225, 237, ó 261

**Tabla 2.13.** Parámetros de TF1, BS1 para conformado de señal Rectangular y Nyquist (MAS1)

	Conformado Rectangular	Conformado de Nyquist
<b>Símbolos OFDM de usuario</b>	176	208
<b>Símbolos OFDM nulos</b>	1	1
<b>Símbolos OFDM aleatorios/sincronización</b>	6, 12, 24, ó 48	6, 12, 24, ó 48
<b>Número total de símbolos en una TF</b>	187, 193, 205, ó 229	219, 225, 237, ó 261

**Tabla 2.14.** Parámetros de TF1, BS2 para conformado de señal Rectangular y Nyquist (MAS2)

	Conformado Rectangular con BS2 (opcional)	Conformado Rectangular con BS3
<b>Símbolos OFDM de usuario</b>	44	48
<b>Símbolos OFDM nulos</b>	4	0
<b>Número de BS en una TF</b>	1	8
<b>Símbolos OFDM aleatorios/sincronización</b>	0	0
<b>Número total de símbolos en una TF</b>	48	48

**Tabla 2.15.** Parámetros de TF2 con BS2 y BS3 para conformado de señal Rectangular (MAS3)

## 2.1.2. Capa MAC

### Modos de acceso

En el enlace ascendente se utiliza la capa de control de acceso al medio (capa MAC), constituida sobre la capa física para proveer seguridad y compartición del canal entre los RCTTs y la estación base. MAC ofrece un uso transparente de la capa física a los protocolos de capas superiores, habilitando en la estación base el adaptador de red interactivo (*Interactive Network Adapter - INA*), que ejecuta el proceso conocido como controlador de la capa MAC, mediante el cual asigna los recursos de subida (ranuras de tiempo/frecuencia) a los RCTTs, mismos que pueden solicitar más recursos si la estación base no se los ha provisto o si le ha dado muy pocos.

El control de acceso al medio es realizado mediante mensajería en un canal de bajada pero soporta muchos canales de subida dentro de una celda para incrementar la capacidad. Los datos de bajada son encapsulados en paquetes MPEG2, mientras que los mensajes MAC de subida pueden ser encapsulados como paquetes cortos de longitud constante encaminados individualmente a través de trayectos virtuales (celdas ATM - Asynchronous Transfer Mode); o a su vez pueden ser asignados directamente dentro de una ráfaga física y enviados en los esquemas de acceso al medio de tasa fija, de contención, o de reserva.

El controlador de la capa MAC sincroniza cada RCTT en tiempo, potencia y frecuencia. En este proceso la sincronización en frecuencia se deriva de la señal emitida por la estación base, mientras que la sincronización de tiempo y potencia resultan de la utilización de mensajes MAC.

La sincronización en tiempo es realizada mediante el proceso de inicialización, en donde el RCTT que desee sincronizarse con la estación base por primera vez, por lo que demodula la señal DVB-T y obtiene toda la información de control sobre la operación de la red, luego de lo cual transmite un código aleatorio de inicialización utilizando uno de los subcanales aleatorios de subida (subcanal de servicio) para entrar a la red. Este código aleatorio puede ser uno de los 32 existentes utilizados para tareas de inicialización, mantenimiento o solicitud de ancho de banda.

La entrada al sistema es anónima y la única información relevante para la estación base es el código aleatorio y el intervalo de tiempo en que se recibe.

Luego de que la sincronización inicial se ha efectuado correctamente, se establece una conexión entre el RCTT y la estación base. Un RCTT puede soportar tantas conexiones como requerimientos de capas superiores exista, la única limitación es que solamente una conexión puede ser manejada a la vez, debido a que por razones de implementación todas las conexiones

se asignarán a los mismos canales de subida y bajada. Para cada conexión un identificador es asignado a la capa MAC, y a su vez una conexión puede ser asignada inicialmente a cualquier ranura. Una vez que el RCTT es sincronizado con la estación base, el subcanal de servicio es usado para mantener dicha sincronización durante la conexión, además de ser usado para requerir ancho de banda.

Por su parte el controlador de la capa MAC continuamente monitorea las transmisiones de subida para verificar que todos los RCTTs estén dentro de los umbrales predefinidos de tiempo, potencia y frecuencia, asegurando de este modo que los RCTTs usen poca potencia al momento de transmitir. Si existe algún equipo de usuario fuera de estos parámetros, empieza un proceso de recalibración.

Para la asignación de ancho de banda el RCTT envía un mensaje MAC mediante el canal de interacción (UL) solicitando la cantidad necesaria de ranuras. Si solamente requiere una, envía la petición directamente y finaliza la conexión. Cabe destacar que el RCTT pierde un slot para enviar el requerimiento.

Luego de recibir el requerimiento de ancho de banda, la estación base envía mediante el canal de difusión (DL) un reconocimiento al RCTT para identificarlo, aquí transcurre un tiempo conocido como retardo de reconocimiento y de acuerdo al modo de transmisión usado por el RCTT, asigna el número de ranuras requeridas utilizando los subcanales de datos y el modo de acceso de tasa fija. Si la asignación no es obtenida, el usuario vuelve a transmitir la solicitud de ancho de banda.

Así mismo el controlador MAC indica los modos de transmisión (MODCODs) que deberán tener los RCTTs para cada conexión, y estos valores pueden ser cambiados dinámicamente por este controlador mediante el mecanismo de modulación adaptativa asignable dinámicamente.

### **Modo de acceso de tasa fija (MAS1 (TF1-BS1))**

Cuando una conexión es establecida, el INA asigna una lista de ranuras al RCTT. El INA puede también asignar ranuras de acceso de tasa fija a una conexión en respuesta a un requerimiento de ancho de banda solicitado por un RCTT mediante un mensaje MAC o mediante un procedimiento de sincronización. Hay que tener en cuenta que en el establecimiento de la conexión, al RCTT no se le pueden asignar recursos de subida. En este caso los modos de acceso de contención o de reserva serán usados.

### **Modo de acceso de contención (MAS2 (TF1-BS2))**

Tanto los mensajes de datos como los mensajes MAC son enviados en las ranuras no

reservadas identificadas por el INA en la transmisión descendente. Este modo de acceso provee una asignación instantánea de canal para los RCTTs, que tengan el mismo acceso al canal ascendente. El INA especifica el número máximo de paquetes de subida que pueden ser transmitidos usando este modo de acceso. Si la longitud del mensaje es mayor, el modo de acceso de reserva será usado.

Para MODCODs con una longitud de ráfaga más pequeña que la de una celda ATM (53 bytes), solamente los mensajes MAC que se ajustan en la ráfaga pueden ser enviados en el modo de acceso de contención; en cambio cuando la longitud de ráfaga es mayor, tanto los mensajes de datos como los mensajes MAC pueden ser enviados encapsulados en celdas ATM en este modo de acceso. Esto significa que solamente los MODCODs 16QAM  $\frac{3}{4}$ , 64QAM  $\frac{1}{2}$  y 64QAM  $\frac{3}{4}$  podrán ser usados en este caso. Sin embargo, todos los MODCODs son capaces de transmitir un mensaje MAC de requerimiento de ancho de banda en el modo de acceso de contención.

### **Modo de acceso de reserva (MAS3 (TF2-BS3))**

El INA puede conceder una lista de ranuras en este modo de acceso para un RCTT que solicita una conexión mediante un mensaje MAC o mediante el procedimiento de sincronización.

DVB-RCT implementa un mecanismo de piggybacking, en el cual un RCTT puede solicitar 1 de las 3 ranuras predefinidas por el INA, con cualquier tamaño de celda ATM. Antes de que un RCTT puede solicitar las ranuras con el modo de acceso de reserva, o utilizando el mecanismo de piggybacking, tiene que asignarle un identificador (ID) de reserva. DVB-RCT implementa además un mecanismo de piggybacking continuo, en el cual un RCTT empieza a solicitar el número mínimo de ranuras posibles en la última ranura de carga útil de datos, incluso si no hay más datos en la cola ascendente del RCTT. La idea es cubrir los períodos de inactividad cortos sin la necesidad de utilizar el modo de acceso de contención en el momento en que la siguiente carga útil de datos vaya a ser transferida, mejorando el retardo en el acceso pero perdiendo algo de ancho de banda.

### **Modo de acceso de sincronización**

El procedimiento de sincronización es usado para realizar la sincronización de frecuencia, potencia y tiempo de un RCTT al inicio de la conexión, y mantiene la sincronización durante la conexión. El subcanal de sincronización puede ser usado también para una contención rápida y segura basada en las solicitudes de ancho de banda, enviando un código aleatorio de solicitud de

ancho de banda en el subcanal de sincronización. Un RCTT que desee ejecutar la sincronización elegirá al azar uno de los 32 códigos disponibles especificados para cada función. La entrada al sistema es anónima y permanece así para todo el proceso, los RCTTs son identificados por la ranura sincronizada enviada y el código aleatorio.

## 2.2. Tecnología DVB-T2

DVB-T2 presenta numerosos avances tecnológicos frente a DVB-T entre los que destacan [23], (i) mecanismos de corrección de errores FEC: LDPC más BCH, (ii) tuberías de capa física PLP (Physical Layer Pipes), (iii) entrelazado temporal, (iv) constelación 256QAM y constelaciones rotadas, (v) codificación espacial MISO (*Multiple Input Single Output*) Alamouti, (vi) diferentes patrones de portadoras piloto PPP, (vii) tamaños de FFT de 16K y 32K con los modos de portadoras extendidos, (viii) mecanismos de reducción de la potencia de pico de la señal PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*): técnicas de reserva de tonos TR (*Tone Reservation*) y extensión activa de la constelación ACE (*Active Constellation Extension*), (ix) tramas de extensión futura FEFs (*Future Extension Frames*), (x) eliminación de paquetes TS nulos, (xi) encapsulación GSE (*Generic Stream Encapsulation*) para la transmisión eficiente de contenidos IP.

El uso de los mecanismos FEC LDPC y BCH aumenta la robustez de la señal con respecto a DVB-T. Este aumento permite una cobertura de hasta un 70% para igual potencia que DVB-T, o un ahorro de energía para una misma cobertura [24].

En DVB-T2 la creación de múltiples canales lógicos a nivel de capa física (MPLPs), permiten la transmisión de diferentes servicios en un mismo canal RF con independiente MODCOD y entrelazado temporal para cada uno de ellos. El máximo número de PLPs en DVB-T2 es 255, aunque depende del tamaño de FFT y de la señalización L1 [25].

A diferencia de DVB-T, DVB-T2 incluye entrelazado temporal, lo que incrementa el nivel de cobertura.

La constelación 256QAM aumenta la capacidad de transmisión del sistema. Por su parte la técnica de constelaciones rotadas, que aplica un determinado ángulo de giro a todos los puntos de la constelación, aumenta la robustez de la señal transmitida. Esta técnica presenta mejores ganancias en constelaciones de orden bajo (QPSK, 16QAM) y tasas de codificación altas (5/6,7/8) [23]. En DVB-T2 el uso de la técnica MISO basada en codificación Alamouti, evita desvanecimientos de la señal causados por la presencia de señales con similares retardos y niveles de potencia, provenientes de varios transmisores. Esto mejorará la recepción en áreas donde la cobertura se sobrepone. El inconveniente es la complejidad requerida en el receptor para el procesamiento de dicha técnica [25].

DVB-T2 usa un conjunto de símbolos con amplitud y fase, conocidos por los receptores para ecualizar las características del canal en tiempo y frecuencia. Dichos símbolos son los patrones de portadoras piloto (PPP). El estándar define ocho (PP1 a PP7) para minimizar la sobrecarga en función del tipo de recepción al que está orientado el servicio. Así en recepción fija se usarán PPP menos densos como PP1 o PP2 para aumentar la capacidad de transmisión [25].

El uso de FFT grandes 16K y 32K implican periodos de símbolo OFDM más largos que en DVB-T (tamaño FFT máximo 8K). Lo que aumenta la distancia entre transmisores permitiendo redes de frecuencia única (*SFN – Single Frequency Network*) de mayor tamaño. Las FFT grandes reducen la sobrecarga del GI y definen un mayor número de portadoras activas en un símbolo OFDM (modo extendido de FFT), lo que permite ganancia en capacidad del sistema, aunque el inconveniente es la reducción de la velocidad máxima soportada.

Para ampliar la cobertura o reducir el costo de operación de una red utilizando menor energía, DVB-T2 hace que el amplificador de potencia de RF trabaje al máximo nivel de salida permitido (punto de saturación) mediante el uso del mecanismo PAPR, para lo cual utiliza dos técnicas; TR para constelaciones mayores y ACE (no compatible con constelaciones rotadas) para constelaciones de orden bajo.

Las tramas FEF son usadas para brindar servicios adicionales a T2 convencional. Tienen una duración máxima de 250 ms y son multiplexadas en tiempo con las tramas T2. A diferencia de la transmisión con MPLPs, FEF configura un modo de transmisión independiente a las tramas T2 base (incluyendo tamaño de FFT, GI y PPP), con lo cual se han definido los modos de transmisión DVB-T2 lite y DVB-NGH.

La eliminación de paquetes TS nulos, generados en transmisión para mantener un flujo MPEG TS para luego ser reinsertados en recepción, permite reutilizar el espacio ocupado por éstos con paquetes útiles de datos.

La utilización del protocolo de encapsulación GSE permite la transmisión eficiente de datos IP sobre las tramas banda base de T2, evitando los problemas generados por transportar contenido IP sobre tramas MPEG-TS (utilizado en DVB-T), como el corto tamaño de las tramas IP, la sobrecarga de señalización y la utilización de un protocolo adicional de encapsulación; MPE (*Multi Protocol Encapsulation*).

# Capítulo 3

## Diseño del estándar DVB-RCT2

Para resolver el problema de acceso a Internet en zonas rurales de América Latina, se propone el estándar DVB-RCT2, siendo una propuesta innovadora que podría ser utilizada con cualquier tecnología de TDT para el DL.

### 3.1. Elementos de DVB-T2

DVB-RCT2 utilizará las siguientes funcionalidades de DVB-T2, (i) mecanismos de corrección de errores LDPC+BCH, (ii) constelación 256QAM y constelaciones rotadas, (iii) entrelazado temporal, (iv) tamaños de FFT 16K y 32K, con los modos de portadoras extendidos, (v) patrones de portadoras piloto PP1 a PP7, (vi) protocolo de encapsulación GSE, (vii) tramas de extensión futura FEFs.

DVB-RCT2, permitirá al igual que DVB-T2 para zonas rurales con muy poca densidad de población la configuración de redes SFN de gran tamaño gracias a la utilización de FFTs de 16K y 32K, lo que permitirá menor sobrecarga (overhead) de GI para una distancia de SFN dada, y por lo tanto ampliación de la distancia máxima entre transmisores, puesto que presenta una caída del espectro fuera de banda mucho más rápida que los modos con FFTs más pequeños. Además la implementación y decodificación de constelaciones de mayor orden como 256-QAM con un nivel de CNR bajo será permitida por DVB-RCT2 debido al mejor rendimiento de los algoritmos de codificación FEC (LDPC + BCH), lo que se verá reflejado en un aumento de hasta un 30% de la capacidad de transmisión del sistema con respecto a DVB-RCT, además de ofrecer un significativo aumento de la robustez de la señal y por tanto de la máxima cobertura, que también podrá ser obtenida mediante el uso del mecanismo de reducción de la potencia de pico de la señal transmitida PAPR de Tonos Reservados (compatible con la técnica de constelaciones rotadas) y la técnica de entrelazado temporal, que será configurable para cada PLP utilizada.

Además con el objetivo de ajustar la densidad a la mínima necesaria el estándar podrá utilizar un patrón de portadoras no muy denso como PP7 (combinación de FFT e GI), mediante el cual aumentará la capacidad para recepción fija y portable. Así también el uso de la técnica MISO basada en codificación Alamouti, mejorará la recepción en áreas donde la cobertura se sobrepone, puesto que con esta técnica se asegura que los transmisores no difundan información idéntica, pero si relacionada, con lo que se destruyen las interferencias.

La robustez de la señal en canales con desvanecimientos selectivos en tiempo y frecuencia podrá ser aumentada además mediante la combinación de la técnica de constelaciones rotadas con MPLPs. El uso de constelaciones se utilizará para recuperar la información con la correcta recepción en el receptor, mientras que la funcionalidad de MPLPs permitirá la transmisión simultánea de servicios en el mismo canal de RF (mismo múltiplex) de una forma más flexible; así mismo el uso de las tramas FEF serán utilizadas para enviar los datos del usuario en enlace ascendente, pudiendo en el mismo canal/frecuencia haber transmisiones tanto en DL como en UL lo que no es posible en DVB-RCT. Además a diferencia de la transmisión con múltiples PLPs, la utilización de las tramas FEF permite configurar un modo de transmisión totalmente independiente a las tramas T2 base incluyendo tamaño de FFT, intervalo de guarda y patrón de portadoras piloto. Ya que DVB-RCT2 será utilizado para proporcionar servicios de conectividad a Internet es importante que provea transmisión eficiente de contenidos IP, reduzca la sobrecarga de encapsulamiento y permita mejor capacidad de transmisión. Por ello se utilizará la transmisión de IP sobre el protocolo GSE, para encapsular el datagrama IP sobre la capa de enlace. Además la cabecera GSE necesita de 7 a 10 bytes por PDU, en comparación con los 2 bytes para la cabecera MPE, 4 bytes del control de redundancia (CRC) por PDU y 4 bytes de la cabecera TS por cada 184 bytes de carga útil TS que se necesitaría para la opción de IP sobre MPE de DVB-T. En este sentido la sobrecarga de encapsulamiento depende del tamaño de la PDU, pero aproximadamente un 70% de reducción se conseguiría con la opción de RCT2 de forma parecida a como se propuso para DVB-NGH (Next Generation Handheld) [26].

### **3.2. Elementos de DVB-RCT**

De DVB-RCT se propone adoptar para DVB-RCT2 las siguientes características, (i) tramas de transmisión (TF1, TF2), (ii) estructuras de ráfaga (BS1, BS2, BS3), (iii) conformado de señal Nyquist y rectangular, (iv) esquemas de acceso al medio (sincronización, MAS1, MAS2, MAS3).

DVB-RCT2 usará las combinaciones permitidas de las dos TF con las tres BS para definir los esquemas de acceso al medio, tal como se hace en DVB-RCT. Además en DVB-RCT2 los modos de transmisión aumentarán de 6 a 27 debido a la combinación de los tamaños de FFT de

DVB-T2 con las CS de DVB-RCT, pudiendo por usuario utilizar solo un modo a la vez. A nivel de capa física RCT2 podrá utilizar en general los conformados de señal Nyquist y rectangular, pero en este artículo para proveer de conectividad a zonas rurales se utilizará el conformado Nyquist, BS3 y el MAS de sincronización.

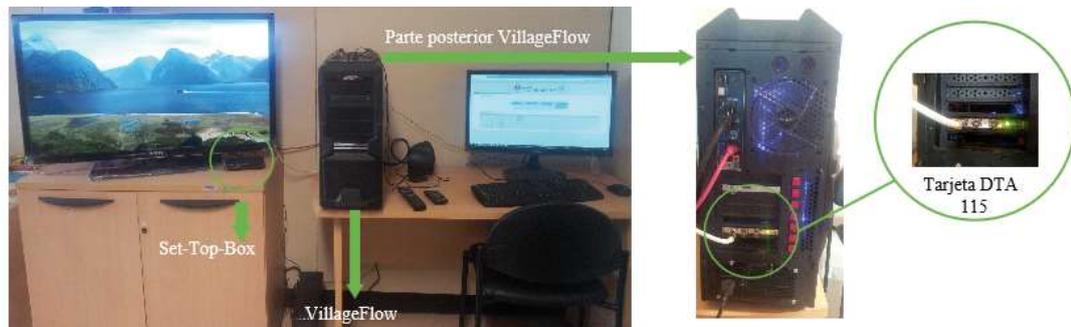
Se utiliza conformado de Nyquist, debido a que los usuarios se encuentran dispersos unos de otros, así como de la estación base. El uso de BS3 es porque el protocolo MAC del estándar 802.16a (Wimax) que está basado en OFDMA usa una capa física similar a la de DVB-RCT usando esta estructura de ráfaga. Y BS3 porque cuenta en UL con 59 subcanales de los cuales para mejorar el rendimiento del sistema se utilizarán 5 para formar el subcanal de sincronización y los 54 restantes serán para transmisión de datos. Además se utilizará el modo de acceso de sincronización por su notable rendimiento para servicios con altas y bajas tasas de datos con respecto al modo de acceso de contención [22]. El principal beneficio del modo de sincronización es la reducción de las colisiones (presentes en el subcanal de sincronización, más no en el de datos), permitiendo además asignar ancho de banda a los RCTTs. La Tabla 3.1 resume los parámetros de diseño descritos.

	<b>DVB-RCT</b>	<b>DVB-RCT2</b>
<b>Conformados de tráfico</b>	Nyquist, Rectangular	Nyquist, Rectangular
<b>Esquemas de Modulación</b>	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, <b>256QAM</b>
<b>FEC</b>	Cod. Convolutacional + Reed Solomon $\frac{1}{2}, \frac{3}{4}$	<b>LDPC + BCH</b> $\frac{1}{2}, \frac{3}{5}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{4}{5}, \frac{5}{6}$
<b>GI</b>	$\frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}$	$\frac{1}{4}, \mathbf{19/128}, \frac{1}{8}, \mathbf{19/256}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}, \mathbf{1/128}$
<b>Tamaño de FFT</b>	1K, 2K	1K, 2K, <b>4K, 8K, 16K, 32K</b>
<b>PPP</b>	PP1	PP1 a <b>PP7</b>
<b>Entrelazado temporal</b>	Robustez frente a interferencia impulsiva	En tramas banda base
<b>Constelaciones rotadas</b>	No usa	Sí
<b>FEF</b>	No usa	Sí
<b>Transmisión de Contenidos IP</b>	IP → MPE → TS	IP → GSE
<b>Tramas de transmisión</b>	TF1, TF2	TF1, TF2
<b>Estructuras de ráfaga</b>	BS1, BS2, BS3	BS1, BS2, BS3
<b>Esquemas de acceso al medio</b>	Sincronización, MAS1, MAS2, MAS3	Sincronización, MAS1, MAS2, MAS3

**Tabla 3.1.** Parámetros de DVB-RCT y DVB-RCT2

### 3.3. Diseño de capa física y MAC DVB-RCT2

Para obtener los datos de la tecnología DVB-RCT2 propuesta, se ha emulado en el laboratorio de TDT de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) las características del canal RCT2, utilizando la plataforma VillageFlow trabajando con una tarjeta DTA115, la misma que permite generar flujos de transporte (TS) multiestándar, para el caso específico de esta investigación se ha generado el TS para DVB-RCT2.



**Figura 3.1.** Escenario de pruebas.

Para la organización del canal de retorno a nivel de capa física, DVB-RCT2 al igual que su predecesor tendrá dos conformados de señal; con el fin de dotar de inmunidad contra la interferencia entre portadora (ICI) y la interferencia entre símbolo (ISI).

**Conformado de Nyquist (Nyquist shaping).**- usa filtrado de Nyquist en tiempo sobre cada portadora, sirve también para brindar inmunidad contra jammers.

**Conformado Rectangular (Rectangular shaping).**- usa una disposición ortogonal de las portadoras y un GI (1/4, **19/128**, 1/8, **19/256**, 1/16, 1/32, **1/128**) entre los símbolos modulados, sirve además para combatir los efectos de la propagación multicamino.

Así mismo, dependiendo del modo de transmisión usado, la señal total en el aire se compondrá de un conjunto de portadoras (1K, 2K, **4K, 8K, 8K ext, 16K, 16K ext, 32K, 32K ext**) adyacentes moduladas sincrónicamente por el RCTT activo. El proceso MAC dentro del INA en la estación base, administra la asignación de portadoras a los RCTTs.

Además al igual que DVB-RCT, DVB-RCT2 utilizará dos tramas de transmisión (TF), tres estructuras de ráfagas de datos (BS1, BS2, BS3), y tres esquemas de acceso al medio (MAS1, MAS2, MAS3). En la Tabla 3.2 se definen las 4 combinaciones existentes para crear los Esquemas de Acceso al Medio, y se indican los modos de acceso correspondientes.

Esquema de acceso	Trama de transmisión	Estructura de ráfaga	Modo de acceso
N/A	N/A	N/A	Acceso de sincronización
MAS1	TF1	BS1	Acceso de tasa fija
MAS2	TF1	BS2	Acceso de contención
MAS3	TF2	BS3	Acceso de reserva
MAS3	TF2	BS2 (opcional)	

**Tabla 3.2.** Esquemas de acceso al medio del estándar DVB-RCT2

### 3.3.1. Capa física

#### Modos de transmisión

DVB-RCT2 especificará 27 modos de operación definidos por el máximo número de

portadoras usadas, dado por el tamaño de la FFT (**1K, 2K, 4K, 8K, 8K ext, 16K, 16K ext, 32K, 32K ext**), y su distancia entre-portadora (*Carrier Spacing – CS*). Solamente un modo de transmisión podrá ser implementado en un canal de radiofrecuencia. En la Tabla 3.3 se indican las distancias entre-portadora aproximadas para un canal de 6 MHz.

Distancia entre-portadora	
<b>CS1</b>	0,84 kHz
<b>CS2</b>	1,67 kHz
<b>CS3</b>	3,35 kHz

**Tabla 3.3.** Distancias entre-portadora para un canal de 6 MHz

En la Tabla 3.4, se indican los parámetros de los modos de transmisión aplicables para el estándar DVB-RCT2 utilizando un canal de radiofrecuencia de 6 MHz, en donde:

**Portadoras totales del sistema (Tsc):** es el número total de portadoras manejadas por el estándar DVB-RCT2.

**Portadoras útiles (Cu):** el máximo número de portadoras efectivamente usadas por el RCTT.

**Reloj del sistema RCT2 (T):** se deriva del estándar DVB-T2, en donde el reloj del sistema definido para un canal de 6MHz es de 48/7 MHz o 7/48 us.

Por consiguiente el reloj del sistema para DVB-RCT2 será:

En el caso de CS1, 4 veces el período del reloj del sistema de DVB-T2;

En el caso de CS2, 2 veces el período del reloj del sistema de DVB-T2;

En el caso de CS3, 1 vez el período del reloj del sistema de DVB-T2;

**Duración del símbolo útil (Tu):** es el período útil del símbolo, expresado como:  $Tu = Tsc * T$

**Distancia entre-portadora (Cs):** viene expresada como:  $Cs = 1/Tu$

**Ancho de banda del canal RCT2 (Bu):** es el ancho de banda usado en el canal DVB-RCT2, viene expresado como:  $Bu = Cs_{1,2,3} * Cu$ .

Sistema DVB-RCT2 6 MHz					
<b>Portadoras totales del Sistema (Tsc)</b>	<b>1024 (1K)</b>	<b>2048 (2K)</b>	<b>4096(4K)</b>	<b>8192 (8K)</b>	<b>8192 (8K ext)</b>
<b>Portadoras útiles (Cu)</b>	<b>853</b>	<b>1705</b>	<b>3409</b>	<b>6817</b>	<b>6913</b>
<b>Reloj del sistema RCT2 (T)</b>	1,167 us	0,583 us	0,291 us	0,145 us	0,145 us
<b>Duración del símbolo útil (Tu)</b>	1195 us	1195 us	1195 us	1195 us	1195 us
<b>Distancia entre-portadora1 (Cs1)</b>	837 Hz	837 Hz	837 Hz	837 Hz	837 Hz
<b>Ancho de banda del canal RCT (Bu)</b>	0,714 MHz	1,427 MHz	2,853 MHz	5,705 MHz	5,786 MHz
<b>Reloj del sistema RCT2 (T)</b>	0,583 us	0,291 us	0,145 us	0,072 us	0,072 us
<b>Duración del</b>	597 us	597 us	597 us	597 us	597 us

<b>símbolo útil (Tu)</b>					
<b>Distancia entre-portadora2 (Cs2)</b>	1674 Hz	1674 Hz	1674 Hz	1674 Hz	1674 Hz
<b>Ancho de banda del canal RCT (Bu)</b>	1,427 MHz	2,854 MHz	5,706 MHz	11,411 MHz	11,572 MHz
<b>Reloj del sistema RCT2 (T)</b>	0,291 us	0,145 us	0,072 us	0,036 us	0,036 us
<b>Duración del símbolo útil (Tu)</b>	298 us	298 us	298 us	298 us	298 us
<b>Distancia entre-portadora3 (Cs3)</b>	3355 Hz	3355 Hz	3355 Hz	3355 Hz	3355 Hz
<b>Ancho de banda del canal RCT (Bu)</b>	2,861 MHz	5,720 MHz	11,437 MHz	22,871 MHz	23,193 MHz
<b>Portadoras totales del Sistema (Tsc)</b>	<b>16384 (16K)</b>	<b>16384 (16K ext)</b>	<b>32768 (32K)</b>	<b>32768 (32K ext)</b>	--
<b>Portadoras útiles (Cu)</b>	<b>13633</b>	<b>13921</b>	<b>27265</b>	<b>27841</b>	--
<b>Reloj del sistema RCT2 (T)</b>	0,072 us	0,072 us	0,036 us	0,036 us	--
<b>Duración del símbolo útil (Tu)</b>	1195 us	1195 us	1195 us	1195 us	--
<b>Distancia entre-portadora1 (Cs1)</b>	837 Hz	837 Hz	837 Hz	837 Hz	--
<b>Ancho de banda del canal RCT (Bu)</b>	11,410 MHz	11,651 MHz	22,820 MHz	23,302 MHz	--
<b>Reloj del sistema RCT2 (T)</b>	0,036 us	0,036 us	0,018 us	0,018 us	--
<b>Duración del símbolo útil (Tu)</b>	597 us	597 us	597 us	597 us	--
<b>Distancia entre-portadora2 (Cs2)</b>	1674 Hz	1674 Hz	1674 Hz	1674 Hz	--
<b>Ancho de banda del canal RCT (Bu)</b>	22,821 MHz	23,303 MHz	45,641 MHz	46,605 MHz	--
<b>Reloj del sistema RCT2 (T)</b>	0,018 us	0,018 us	0,009 us	0,009 us	--
<b>Duración del símbolo útil (Tu)</b>	298 us	298 us	298 us	298 us	--
<b>Distancia entre-portadora3 (Cs3)</b>	3355 Hz	3355 Hz	3355 Hz	3355 Hz	--
<b>Ancho de banda del canal RCT (Bu)</b>	45,738 MHz	46,704 MHz	91,474 MHz	93,406 MHz	--

**Tabla 3.4.** Modos de transmisión del estándar DVB-RCT2 para un canal de 6 MHz

## Estructuras de ráfagas de datos (BS)

### Definición de BS1

Al igual que en DVB-RCT, para DVB-RCT2 el subcanal de BS1 está compuesto de 4 mini-ráfagas que a su vez tienen portadoras de datos y portadoras piloto, estas últimas con un patrón de distribución específico.

La asignación de una portadora a la primera mini-ráfaga del subcanal será conforme con el valor dado en la Tabla 3.5.

	Modo 1K	Modo 2K	Modo 4K	Modo 8K	Modo 8K ext
<b>Número virtual de portadoras en un símbolo OFDM</b>	1024	2048	4096	8192	8192
<b>Portadoras totales</b>	853	1705	3409	6817	6913
<b>Banda de guarda en cada borde*</b>	86	173	346	687	639
<b>Número máximo de portadoras útiles ( número subcanales BS1)</b>	851	1701	3403	6810	6897
<b>Número de portadoras excluidas</b>	0, 426	0, 1, 852, 1704	0, 1, 426, 852, 1704, 3408	0, 1, 426, 852, 1704, 3408, 6816	0, 1, 432, 864, 1728, 3456, 6912
<b>Numeración del subcanal</b>	del 1 al 426; y del 427 al 852	del 2 al 851; y del 853 al 1703	del 2 al 425; del 427 al 851; del 853 al 1703; y del 1705 al 3407	del 2 al 425; del 427 al 851; del 853 al 1703; del 1705 al 3407; y del 3409 al 6815	del 2 al 432; del 433 al 863; del 865 al 1727; del 1729 al 3455; y del 3457 al 6911
	Modo 16K	Modo 16K ext	Modo 32K	Modo 32K ext	
<b>Número virtual de portadoras en un símbolo OFDM</b>	16384	16384	32768	32768	--
<b>Portadoras totales</b>	13633	13921	27265	27841	--
<b>Banda de guarda en cada borde*</b>	1375	1231	2751	2463	--
<b>Número máximo de portadoras útiles ( número subcanales BS1)</b>	13625	13889	27256	27777	--
<b>Número de portadoras excluidas</b>	0, 1, 426, 852, 1704, 3408, 6816, 13632	0, 1, 870, 1740, 3480, 6960, 13920	0, 1, 426, 852, 1704, 3408, 6816, 13632, 27264	0, 1, 870, 1740, 3480, 6960, 13920, 27840	--
<b>Numeración del subcanal</b>	del 2 al 425; del 427 al 851; del 853 al 1703; del 1705 al 3407; del 3409 al 6815; y del 6817 al 13631	del 2 al 869; del 871 al 1739; del 1741 al 3479; del 3481 al 6959; y del 6961 al 13919	del 2 al 425; del 427 al 851; del 853 al 1703; del 1705 al 3407; del 3409 al 6815; del 6817 al 13631; y del 13633 al 27263	del 2 al 869; del 871 al 1739; del 1741 al 3479; del 3481 al 6959; del 6961 al 13919; y del 13922 al 27839	--

**Tabla 3.5.** Asignación de parámetros para conformado Rectangular y Nyquist, subcanal BS1 de DVB-RCT2

**Nota:** \* (portadoras virtuales en un símbolo OFDM – portadoras totales) Módulo 2, índice 1.

BS1 con salto de frecuencia y BS1 sin salto de frecuencia para DVB-RCT2, funciona igual que en DVB-RCT.

## Definición de BS2

Al igual que en DVB-RCT, en DVB-RCT2 el subcanal será definido de acuerdo al uso de BS2 ya sea en el MAS2 o en el MAS3 (opcional).

### Asignación de portadora para el esquema de acceso al medio 2 (MAS2)

Cuando se usa MAS2, la asignación de las 4 portadoras al subcanal seguirá los valores descritos en la Tabla 3.6.

	Modo 1K	Modo 2K	Modo 4K	Modo 8K	Modo 8K ext
<b>Número de portadoras en un símbolo OFDM</b>	1024	2048	4096	8192	8192
<b>Portadoras totales</b>	853	1705	3409	6817	6913
<b>Número máximo de portadoras útiles ( 4 portadoras)</b>	851	1701	3403	6810	6897
<b>Máximo número de portadoras útiles por cada portadora (número subcanales BS2)</b>	212	425	850	1702	1724
<b>Numeración de las portadoras</b>	de 0 a 852	de 0 a 1704	de 0 a 3408	de 0 a 6816	de 0 a 6912
<b>Banda de guarda en la izquierda</b>	86	173	346	687	639
<b>Banda de guarda en la derecha</b>	86	173	346	687	639
<b>Número de portadoras excluidas</b>	0, 426	0, 1, 852, 1704	0, 1, 426, 852, 1704, 3408	0, 1, 426, 852, 1704, 3408, 6816	0, 1, 432, 864, 1728, 3456, 6912
<b>Numeración del subcanal: SCN</b>	del 1 al 212	del 1 al 425	del 1 al 850	del 1 al 1702	del 1 al 1724
<b>X</b>	212	425	850	1702	1724
<b>Y</b>	425	851	1703	3407	3455
<b>Z</b>	637	1276	2553	5109	5179
	<b>Modo 16K</b>	<b>Modo 16K ext</b>	<b>Modo 32K</b>	<b>Modo 32K ext</b>	
<b>Número de portadoras en un símbolo OFDM</b>	16384	16384	32768	32768	--
<b>Portadoras totales</b>	13633	13921	27265	27841	--
<b>Número máximo de portadoras útiles ( 4 portadoras)</b>	13625	13889	27256	27777	--
<b>Máximo número de portadoras útiles por cada</b>	3406	3472	6814	6944	--

<b>portadora (número subcanales BS2)</b>					
<b>Numeración de las portadoras</b>	de 0 a 13632	de 0 a 13920	de 0 a 27264	de 0 a 27840	
<b>Banda de guarda en la izquierda</b>	1375	1231	2751	2463	--
<b>Banda de guarda en la derecha</b>	1375	1231	2751	2463	--
<b>Número de portadoras excluidas</b>	0, 1, 426, 852, 1704, 3408, 6816, 13632	0, 1, 870, 1740, 3480, 6960, 13920	0, 1, 426, 852, 1704, 3408, 6816, 13632, 27264	0, 1, 870, 1740, 3480, 6960, 13920, 27840	--
<b>Numeración del subcanal: SCN</b>	del 1 al 3406	del 1 al 3472	del 1 al 6814	del 1 al 6944	--
<b>X</b>	3406	3472	6814	6944	--
<b>Y</b>	6815	6959	13631	13919	--
<b>Z</b>	10221	10431	20445	20863	--

**Tabla 3.6.** Asignación de parámetros cuando se usa MAS2, subcanal BS2 de DVB-RCT2

Las siguientes fórmulas definen la indexación de la portadora dentro de una asignación de un subcanal para los modos desde 1K hasta 32K ext.

Portadora 0 = SCN

Portadora 1 = SCN + X

Portadora 2 = SCN + Y

Portadora 3 = SCN + Z

### Asignación de portadora para el esquema de acceso al medio 2 (MAS2)

Sigue los mismos principios que en DVB-RCT. La asignación de portadoras a los subconjuntos de BS2 es obtenida por la siguiente fórmula:

$$\text{Subconjunto\#(SCN,n)} = \text{Portadora\#(n-1)}, \text{Portadora\#(n+6)}, \text{Portadora\#(n+13)}, \text{Portadora\#(n+20)}$$

Donde n indica el número de subconjunto para la asignación del subcanal BS2 dentro de los subconjuntos del subcanal BS3 (7 en total). En este sentido se usa la siguiente fórmula para la asignación de los subcanales de BS2, indicados en la Tabla 3.7.

$$\text{Subcanal BS2\#} = \text{SCN+n}; \text{ donde } 1 \leq n \leq 7$$

	<b>Modo 1K</b>	<b>Modo 2K</b>	<b>Modo 4K</b>	<b>Modo 8K</b>	<b>Modo 8K ext</b>
<b>Número de portadoras en un símbolo OFDM</b>	1024	2048	4096	8192	8192
<b>Numeración del subcanal:</b>	1..7,..11..17, 281..287	1..7,..11..17, 581..587	1..7,..11..17, 1161..1167	1..7,..11..17, 2341..2347	1..7,..11..17, 2371..2377

SubcanalBS2					
	Modo 16K	Modo 16K ext	Modo 32K	Modo 32K ext	
Número de portadoras en un símbolo OFDM	16384	16384	32768	32768	--
Numeración del subcanal: SubcanalBS2	1..7,..11..17, 4691..4697	1..7,..11..17, 4791..4797	1..7,..11..17, 9391..9397	1..7,..11..17, 9591..9597	--

**Tabla 3.7.** Asignación de parámetros subcanal BS2 cuando se usa MAS3 en DVB-RCT2 (conformado Rectangular)

El número de subcanales en BS3 está hecho en múltiplos de 10 para permitir la numeración de los subcanales de BS2 dentro de los subcanales de BS3 para el MAS3.

### Definición de BS3

La asignación de portadoras de BS3 en el dominio del tiempo para DVB-RCT2 será la misma que para DVB-RCT; en lo referente al dominio de la frecuencia, los parámetros están descritos en la Tabla 3.8.

	Modo 1K	Modo 2K	Modo 4K	Modo 8K	Modo 8K ext
Número de portadoras en un símbolo OFDM	1024	2048	4096	8192	8192
Portadoras totales	853	1705	3409	6817	6913
Numeración de las portadoras	de 0 a 852	de 0 a 1704	de 0 a 3408	de 0 a 6816	de 0 a 6912
Banda de guarda en la izquierda	86	173	346	687	639
Banda de guarda en la derecha	86	173	346	687	639
Número de portadoras excluidas	426	852	1704	3408	3456
Número de subcanales BS3	29	59	117	235	238
Numeración del subcanal: SCN	0,10,20..280	0,10,20..580	0,10,20..1160	0,10,20..2340	0,10,20..2370
	Modo 16K	Modo 16K ext	Modo 32K	Modo 32K ext	
Número de portadoras en un símbolo OFDM	16384	16384	32768	32768	--

<b>Portadoras totales</b>	13633	13921	27265	27841	--
<b>Numeración de las portadoras</b>	de 0 a 13632	de 0 a 13920	de 0 a 27264	de 0 a 27840	
<b>Banda de guarda en la izquierda</b>	1375	1231	2751	2463	--
<b>Banda de guarda en la derecha</b>	1375	1231	2751	2463	--
<b>Número de portadoras excluidas</b>	6816	6960	13632	13920	--
<b>Número de subcanales BS3</b>	470	480	940	960	
<b>Numeración del subcanal: SCN</b>	0,10,20..4690	0,10,20..4790	0,10,20..9390	0,10,20..9590	

**Tabla 3.8.** Asignación de parámetros dominio de la frecuencia, conformado de señal Rectangular, subcanal BS3 de DVB-RCT2

### Esquemas de acceso al medio (MAS)

En el estándar DVB-RCT2 la asignación de una o más BS sobre una TF, sigue los mismos principios que en el estándar DVB-RCT.

#### 3.3.2. Capa MAC

##### Modos de acceso

Los modos de acceso de DVB-RCT2 son los mismos que existen en el estándar DVB-RCT: de tasa fija, de contención, de reserva, y de sincronización.

Para DVB-RCT2 se utilizará el modo de acceso de sincronización, puesto que tiene un rendimiento excelente para servicios con altas tasas de datos, además de un rendimiento considerable para servicios con bajas tasas de datos, con respecto al modo de acceso de contención [22].

Uno de los principales beneficios del modo de acceso de sincronización es la reducción de las posibles colisiones (solo presentes en el subcanal de sincronización, más no en el de datos). Dado que los códigos aleatorios que se envían son códigos CDMA, la estación base es capaz de identificar muchos códigos sin ambigüedad al mismo tiempo. Esta característica no es posible en el modo de acceso de contención, donde un considerable número de subcanales de datos deben ser dedicados únicamente para solicitudes de ancho de banda, así los nuevos usuarios que

llegan no encontrarán a todos los subcanales con cargas de tráfico elevadas.

Otra ventaja del modo de acceso de sincronización es la baja capacidad que se utilizaría en el DL para implementar el protocolo MAC, debido a que la estación base no necesita informar sobre las ranuras en UL no usadas, ni sobre las posibles colisiones. Cabe señalar que la estación base en lugar de esto, realiza reconocimientos de los códigos de sincronización recibidos correctamente para asignar ancho de banda a los RCTTs.

Por otra parte para la implementación de la capa física se utilizará BS3, debido a que entre otras cosas el protocolo MAC del estándar 802.16a (Wimax) que está basado en OFDMA, usa una capa física similar a la del estándar DVB-RCT usando BS3.

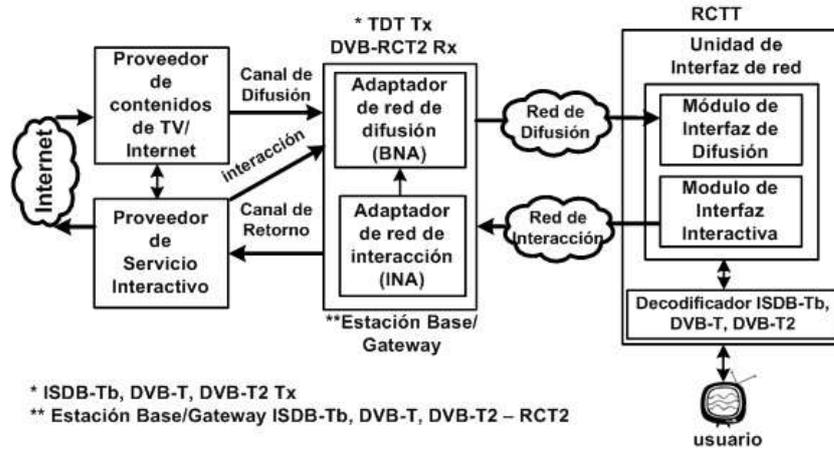
Por lo anteriormente mencionado se utilizará el modo de acceso de sincronización y la estructura de ráfaga de datos 3 (BS3) la misma que cuenta con 59 subcanales, de los cuales se ha considerado que 5 subcanales formarán el subcanal de sincronización y los 54 subcanales restantes serán utilizados para transmisión de datos. Con esto se logrará mejorar el rendimiento del sistema al utilizar 5 y no 4 subcanales en el subcanal de sincronización. Además es importante mencionar como se comentaba anteriormente que en el modo de acceso de sincronización existen colisiones en el subcanal de sincronización, por lo tanto la medida de capacidad relevante de este modo de acceso es el rendimiento del sistema con respecto a la detección de los códigos de sincronización de solicitud de ancho de banda.

### **3.4. Arquitectura de DVB-RCT2**

Considerando la tecnología con canal de retorno DVB-RCT, el estándar DVB-CT2 será una red de difusión inalámbrica bidireccional, que permitirá brindar un amplio rango de aplicaciones de banda ancha. En este sentido para la comunicación desde el proveedor del servicio (contenidos de TV e Internet) hasta el usuario, se utilizará un canal de difusión, en donde se podrá emplear las arquitecturas ISDB-Tb, DVB-T y DVB-T2, presentes en Latinoamérica; y para la comunicación inversa, se empleará un canal de retorno, utilizando la arquitectura DVB-RCT, pero adaptada para DVB-RCT2.

El canal ascendente se utilizará OFDMA, lo que permitirá que múltiples portadoras sean asignadas en paralelo a diferentes usuarios en diferentes instantes de tiempo, mientras que para el canal descendente se usará modulación OFDM normal. Para esto en la estación base se encontrará el controlador de la capa MAC, quien habilita el adaptador de red interactivo INA, que conjuntamente con el Gateway T2/RCT2 son los encargados de asignar los recursos de subida, por ejemplo las ranuras de tiempo y frecuencia a los usuarios, además de proveer la sincronización necesaria a los RCTT, para que puedan acceder a la red, utilizando eficientemente el ancho de banda disponible entre todos los usuarios interactivos. El nuevo

estándar definirá también para el canal de subida los cuatro modos de acceso controlados por el protocolo MAC, mencionados en DVB-RCT. En el sitio del usuario el RCTT se encargará de recibir o enviar las peticiones que el cliente haya solicitado o enviado. En la Figura 3.2 se describe la arquitectura propuesta.



**Figura 3.2.** Arquitectura propuesta del estándar DVB-RCT2 para proveer servicios de Internet a zonas rurales

# Capítulo 4

## Evaluación, planificación y análisis de cobertura e interferencias de tecnologías de TDT

### 4.1. Evaluación inicial de prestaciones para tecnologías de TDT

En la Tabla 4.1, se presentan los valores de CNR y las capacidades de transmisión en Mbps para diferentes MODCODs y tecnologías de TDT, considerando un ancho de banda de 6MHz, método de recepción fija (Perfil de Canal Rice) y los siguientes modos de transmisión:

Para ISDB-Tb; FFT 8K, GI 1/8, usando 13 segmentos. Para DVB-T2; FFT 32K extendido, GI 1/32, PP6. Para DVB-RCT; FFT 2K, GI 1/32, conformado de tráfico rectangular, BS3, CS1 y esquema de acceso de sincronización. Para DVB-RCT2 FFT 32K extendido, GI 1/128, PP7, conformado de tráfico rectangular, BS3, CS1 y esquema de acceso de sincronización.

En los modos de transmisión descritos anteriormente se consideraron para ISDB-Tb la FFT de las pruebas de TDT realizadas en Ecuador [27], mientras que para definir el GI se realizó un estudio de distancia SFN (detallado más adelante) para encontrar la distancia óptima que deberían tener los transmisores de TV, consiguiendo con GI de 1/8 una red SFN con distancia entre transmisores de 44,8 km. En DVB-T2 se utilizó una combinación de FFT e GI con lo cual se obtuvo el valor de PP6. Además con dicha combinación se obtuvo la misma separación entre transmisores que para ISDB-Tb, se hizo esto con el objetivo de calcular la ganancia en capacidad de DVB-T2 para la misma cobertura (valor de CNR y distancia SFN). Aunque cabe resaltar que DVB-T2

permite distancias SFN más grandes que se pueden utilizar para hacer una red SFN nacional.

Por su parte para las tecnologías con canal de retorno DVB-RCT y DVB-RCT2 se utilizaron las FFT de mayor tamaño permitida en cada tecnología junto con el GI más pequeño. La consideración del GI más pequeño en las tecnologías de UL, es debido a que sólo se lo utilizará para proteger la señal de posibles ecos que puedan existir en la transmisión del mismo usuario.

MODCOD	ISDB-Tb		DVB-RCT		DVB-T2		DVB-RCT2	
	CNR [20]	Capacidad [28]	CNR [22]	Capacidad [21]	CNR [29]	Capacidad [30]	CNR [29]	Capacidad [30]
QPSK ½	6,23	4,05	4,6	4,26	2,67	5,45	2,67	5,64
QPSK ¾	9,15	6,08	7,8	6,40	5,87	8,20	5,87	8,49
QPSK 5/6	10,44	6,76	--	--	7,07	9,13	7,07	9,46
16QAM ½	11,61	8,11	10,6	8,53	7,87	10,95	7,87	11,34
16QAM ¾	15,62	12,17	14,0	12,80	11,87	16,45	11,87	17,03
16QAM 5/6	16,78	13,52	--	--	13,17	18,27	13,17	18,91
64QAM ½	17,34	12,17	15,7	12,80	12,27	16,40	12,27	16,98
64QAM ¾	21,06	18,25	19,6	19,21	16,91	24,65	16,91	25,52
64QAM 5/6	22,6	20,28	--	--	18,68	27,46	18,68	28,43
256QAM ½	--	--	--	--	16,31	21,90	16,31	22,67
256QAM ¾	--	--	--	--	22,06	32,91	22,06	34,07
256QAM 5/6	--	--	--	--	24,38	36,59	24,38	37,88

**Tabla 4.1.** Valores de CNR y capacidades de transmisión en Mbps para diferentes tecnologías y MODCODs

En la tabla se puede observar que las tecnologías DVB-T2 y DVB-RCT2 permiten un esquema de modulación mayor 256QAM y presentan el menor valor de CNR, debido a lo cual pueden transmitir mayor cantidad de información. La CNR en estas dos tecnologías es la misma debido a que se asume que DVB-RCT2 está basado en DVB-T2 y que por lo tanto la capa física no cambia.

Para el caso de las tecnologías de DL, si se analiza coberturas parecidas (valores de CNR y distancia SFN lo más cercana posibles), se ve que ISDB-Tb para una CNR de 16,78 conseguida con 16QAM 5/6, presenta una capacidad de 13,52 Mbps para una distancia SFN de 22,4 Km; mientras que DVB-T2 con una CNR de 16,91 para 64QAM ¾ presenta una capacidad de 24,65 Mbps y para cubrir una distancia SFN de 44,8 Km. Lo que significa que la capacidad de DVB-T2 aumenta aproximadamente el doble para valores de CNR parecidos y el doble de distancia entre transmisores.

Si se analiza las tecnologías de UL, DVB-RCT2 proporciona una mayor capacidad de transmisión, en concreto 37,88 Mbps en 6 MHz, mientras que la capacidad máxima de DVB-RCT es de 19,21 Mbps.

DVB-RCT2 también proporciona una mínima CNR, en concreto 2,67 dB (QPSK 1/2), mientras que la CNR mínima de DVB-RCT es 4,6 dB (QPSK 1/2).

Los valores de la tabla en cuanto a las tecnologías DVB-T2/RCT2 son representados en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Capacidad en función de la CNR para DVB-T2/RCT2 [30]

## 4.2. Planificación de redes de TDT

### 4.2.1. Cálculo de balance de enlace para tecnologías de TDT

El cálculo del balance de enlace permite establecer la intensidad de campo eléctrico mínima ( $E_{\min}$ ), requerida a la entrada del receptor para hacer la estimación de cobertura. Para las tecnologías de TDT se ha tomado como referencia [15] y [23], y sobre estas referencias se han variado los parámetros correspondientes para cada tecnología. A continuación se describe el proceso tanto para DL como para UL.

- NIVEL POTENCIA DE RUIDO.

$$P_n = NF + 10 \log_{10} [KT_oB] \quad (1)$$

Donde:

$NF$  = figura de ruido del receptor (ISDB-Tb 7 dB [28]; DVB-T2 6 dB [23]; DVB-RCT y DVB-RCT2 0 dB [21]).

$K$  = constante de Boltzman ( $1.3806504 \times 10^{-23}$  Ws/K)

$T_0$ = temperatura absoluta (290K)

$B$ = ancho de banda (ISDB-Tb 5,572 [28]; DVB-T2 5,83 [29]; DVB-RCT2 5,71[29]; DVB-RCT 5,732 [21])  $\times 10^6$  Hz

- NIVEL DE POTENCIA MÍNIMO REQUERIDO EN RECEPCIÓN.

$$P_{Smin} = P_n + CNR \quad (2)$$

Donde:

CNR = relación portadora a ruido de cada MODCOD para cada tecnología.

- DENSIDAD DE FLUJO DE POTENCIA MÍNIMA EN RECEPCIÓN.

$$\phi_{min} = P_{Smin} - A_a + L_f (BS/RCTT) + Corr \quad (3)$$

$$\phi_{min} = P_{Smin} - A_a + L_f (BS/RCTT) + 10 \log_{10} (f_A/f_R) \quad (4)$$

$$\phi_{min} = P_{Smin} - (G_A (BS/RCTT) + 10 \log_{10} (1,64 * (\lambda^2 / (4 * \pi)))) + L_f + 10 \log_{10} (f_A/f_R) \quad (5)$$

Donde:

$A_a$  = apertura efectiva de la antena, utiliza  $G_A (BS/RCTT)$ .

$L_f (BS/RCTT)$  = pérdidas en el cable desde la antena al receptor estación base/equipo de usuario (4 dB).

$Corr$  = factor de corrección en función de la frecuencia.

$f_A$  = frecuencia actual considerada (513.25 MHz  $\rightarrow$  canal 21 en DL y 501.25 MHz  $\rightarrow$  canal 19 en UL).

$f_R$  = frecuencia de referencia correspondiente (500 MHz).

- VALOR MEDIO MÍNIMO DE LA DENSIDAD DE FLUJO DE POTENCIA.

$$\phi_{med} = \phi_{min} + P_{mmn} + C_l + L_h + L_b + L_d (RCTT) - G_d (BS) + G_C (RCT/RCT2) \quad (6)$$

Donde:

$P_{mmn}$  = margen de ruido artificial (0 dB)

$C_l$  = factor de corrección de ubicación al 95% (9,047 dB) y al 70% (2,884 dB); para calcularlo se asume una distribución log-normal de la señal recibida, entonces:

$$C_l = \mu * \sigma [23]. \quad (7)$$

Donde:

$\mu$  = factor de distribución; 1,6449 para recepción al 95% y 0,5244 para recepción al 70%.

$\sigma$  = desviación estándar; 5,5 dB para recepción exterior.

$L_h$  = pérdidas en altura (0 dB)

$L_b$  = pérdidas en penetración (0 dB)

$Ld_{(RCTT)}$  = pérdidas en el duplexor (0 dB) al hacer el cálculo para tecnologías solo de DL, puesto que en las mismas el elemento duplexor no existe. En cambio si se utilizan tecnologías con canal de retorno (UL) el valor de pérdidas en el duplexor será de 4 dB.

$Gd_{(BS)}$  = ganancia de diversidad (0 dB) para tecnologías de DL, y 4dB para tecnologías con canal de retorno, a efectos de compensar las pérdidas en el duplexor.

$Gc_{(RCT)}$  = ganancia de concentración DVB-RCT; 17,7 dB [22].

$Gc_{(RCT2)}$  = ganancia de concentración DVB-RCT2; 6,38 dB

$$Gc_{(RCT2)} = 10 \log_{10} (\text{portadoras útiles}_{\text{FFT}} / \text{portadoras}_{\text{BS3}} * n) \quad (8)$$

portadoras útiles<sub>FFT</sub> = número de portadoras útiles que dependen del tamaño de la FFT; 27841. Para este estudio se utilizará el modo 32KE.

portadoras<sub>BS3</sub> = número de portadoras de BS3; 29.

n= número de subcanales para transmitir datos; de 1 a 54. Así si todos los usuarios están transmitiendo hacia la estación base el valor será 54 y si solo un usuario transmite el valor será 1. La Tabla 4.2, indica los valores de ganancia de concentración para diferente número de portadoras y subcanales de transmisión de datos. Para este estudio se utilizará el valor correspondiente a una FFT de 8K en donde todos los usuarios estén transmitiendo.

Número de portadoras	Ganancia de Concentración	
	1 subcanal	54 subcanales
<b>1K (853)</b>	14,68	-2,63
<b>2K (1705)</b>	17,69	0,36
<b>4K (3409)</b>	20,70	3,37
<b>8K (6817)</b>	23,71	6,38
<b>8K ext (6913)</b>	23,77	6,44
<b>16K (13633)</b>	26,72	9,39
<b>16K ext (13921)</b>	26,81	9,48
<b>32K (27265)</b>	29,73	12,40
<b>32K ext ( 27841)</b>	29,82	12,49

**Tabla 4.2.** Ganancia de concentración DVB-RCT2, considerando número de portadoras y subcanales de transmisión de datos

- INTENSIDAD MÍNIMA DE CAMPO ELÉCTRICO.

$$E_{min} = \phi_{med} + 120 + 10 \cdot \log_{10} (120 \cdot \pi) \quad (9)$$

- POTENCIA DE TRANSMISIÓN MÁXIMA DEL TRANSMISOR DE LA ESTACIÓN BASE.

$$P_{tx(BS)} = CNR_{DL} - CNR_{UL} + G_{c(RCT/RCT2)} + \text{Factor de ruido} + P_{tx(RCTT)} \quad (10)$$

- PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN ESCENARIO RURAL.

$$P_{rx(RCTT)} = P_{tx(BS)} + (G_{A(BS)} + Corr) - L_{f(BS)} - L_{rural} + (G_{A(RCTT)} + Corr) - L_{f(RCTT)} \quad (11)$$

$$L_{rural} = P_{tx(BS)} + (G_{A(BS)} + Corr) - L_{f(BS)} + (G_{A(RCTT)} + Corr) - L_{f(RCTT)} - P_{rx(RCTT)} \quad (12)$$

Donde:

$L_{rural}$  = pérdidas de propagación en escenario rural

$P_{tx(BS)}$  = potencia del transmisor de la estación base; 60dBm.

$G_{A(BS/RCTT)}$  = ganancia de la antena de la estación base/ equipo de usuario; 11dB.

$Corr$  = factor de corrección en función de la frecuencia.

$L_{f(BS/RCTT)}$  = definido anteriormente; 4 dB.

$P_{rx(RCTT)}$  = nivel de señal recibida esperado en el terminal de usuario (53 dBuV/m  $\rightarrow$  -54 dBm). Se utilizó el valor de  $E_{min}$  de ISDB-Tb de 64QAM  $\frac{3}{4}$  al 95% (dBuV/m), pero al necesitar dicho valor en dBm se restó un factor de 107.

- DISTANCIA QUE EL TRANSMISOR DE LA ESTACIÓN BASE CUBRIRÍA EN DL.

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (13)$$

$$d = 10^{(L_{bf} - 32,4 - 20 \log f)/20} \quad (14)$$

Donde:

$d$  = distancia cubierta por el transmisor de la estación base

$L_{bf} = L_{rural}$

$f$  = frecuencia de operación del transmisor de la estación base (513.25 MHz)

#### 4.2.2. Diferencias en el cálculo de balance de enlace

La Tabla 4.3, resume las principales diferencias en el cálculo del balance de enlace entre los estándares de TDT, entre los que se tiene:

Factor de ruido del receptor con un valor de 7 dB tanto para ISDB-Tb y T; y de 6 dB para DVB-T2 debido a las mejoras tecnológicas de los receptores, sin embargo para ISDB-Tb se podría utilizar el valor de 6 dB. Por su parte para las tecnologías con canal de retorno el valor es

de 0 dB porque el receptor está en la estación base y es de mejor calidad que un receptor comercial.

La frecuencia actual considerada varía, puesto que se utilizan canales diferentes para DL y UL, lo que repercute en las ganancias de las antenas de transmisión y recepción debido a que se suma el valor del factor de corrección en función de la frecuencia (Corr), que también es utilizado en el cálculo de las pérdidas de propagación. Específicamente los valores obtenidos fueron de 0,11 dB para el DL y de 0,01 dB para el UL, destacando que se ha utilizado la frecuencia más baja para este último.

La potencia del transmisor de la torre de TV puede llegar hasta los 5000 W para las tecnologías DL, sin embargo en este estudio la potencia utilizada en los transmisores de la torre de TV fue de 1000 W, mientras que para la tecnologías de UL se obtuvo la potencia máxima de transmisión en función de la diferencia de CNR entre los modos de transmisión DL y UL, la ganancia de concentración, el factor de ruido y la potencia de transmisión del equipo de usuario, tal como se indica en la ecuación 10. Además tanto en RCT como en RCT2 se utilizó el valor de 1 W para la potencia del transmisor de usuario [19], debido a que en estas tecnologías el RCTT no solo recibe información sino que también la transmite.

Otros parámetros usados son el de pérdidas en el duplexor, cuyo valor será de 0 dB para las tecnologías de DL y de 4 dB para las tecnologías de UL, puesto que el elemento conocido como duplexor existe en estas últimas; y la ganancia de diversidad (0 dB) para tecnologías de DL y 4dB para tecnologías de UL, esto a efectos de compensar las pérdidas en el duplexor.

Así mismo la ganancia de concentración solo es utilizada en RCT y RCT2 puesto que al transmitir en UL se usa solo una porción del canal. Para esto se consideró el escenario en donde todos los usuarios estén transmitiendo hacia la estación base, por esto para los cálculos de DVB-RCT2 se utilizó el valor de 6,38.

En el caso de estudio definido para esta tesis de doctorado se utilizarán concretamente los parámetros de los estándares ISDB-Tb para el DL y RCT2 para el UL. En este sentido con los valores de la Tabla 4.3 se ajustó la cobertura entre estas dos tecnologías compensando la diferencia en potencia transmitida por el receptor y el transmisor con la diferencia en el factor de ruido, la ganancia de concentración y el factor de corrección; diferencia que fue restada de la CNR obtenida del MODCOD 64QAM  $\frac{3}{4}$  de ISDB-Tb, puesto que esta modulación y codificación fueron usadas para la propagación de la señal en DL. De este proceso se obtuvo un valor que fue comparado con la CNR de los estándares de UL para encontrar el MODCOD adecuado tanto para DVB-RCT y DVB-RCT2, siendo 64QAM  $\frac{1}{2}$  y QPSK  $\frac{1}{2}$  respectivamente.

Tecnologías TDT				
PARÁMETRO	Balance de enlace en DL		Balance de enlace en UL	
	ISDB-Tb	DVB-T2	DVB-RCT	DVB-RCT2
Factor de ruido del receptor	7 dB [28]	6 dB [23]	0 dB [21]	0 dB, basado en DVB-RCT
Frecuencia actual considerada	513,25 MHz → canal 21 para DL (Corr = 0,11 dB)		501,25 MHz → canal 19 para UL (Corr = 0,01 dB)	
Potencia del transmisor torre de TV ( $P_{T(BS)}$ )	1000 W (60 dBm)	1000 W (60 dBm)	10375 W (70,16 dBm) en el borde de cobertura	1194 W (60,77 dBm) en el borde de cobertura
Potencia del transmisor del usuario $P_{T(RCT)}$	0 (No utilizado)	0 (No utilizado)	Hasta 1W (30 dBm)	Hasta 1 W (30 dBm)
Pérdidas en el duplexor $L_{d(RCT)}$	0 (No utilizado)	0 (No utilizado)	4 dB	4 dB
Ganancia de diversidad $G_{d(BS)}$	0 (No utilizado)	0 (No utilizado)	4 dB para compensar las pérdidas en el duplexor	4 dB para compensar las pérdidas en el duplexor
Ganancia de concentración $G_{c(RCT)}$	0 (No utilizado)	0 (No utilizado)	17,7 dB	23,71 dB si $n=1$ ; 6,38 dB si $n=54$

Tabla 4.3. Parámetros de balance de enlace para escenario rural tanto en DL y UL

En la Figura 4.2, se ilustra el MODCOD utilizado en el borde del área de cobertura para DVB-RCT2, pero además se muestran diferentes MODCODs que se han obtenido cambiando un orden de modulación, para indicar en la Tabla 4.4 la potencia máxima que debería tener el transmisor de la estación base, la distancia que se alcanzaría (ecuación 14), y la capacidad que tendría cada usuario (Capacidad total del modo/54 usuarios) para un determinado modo de transmisión DVB-RCT2.

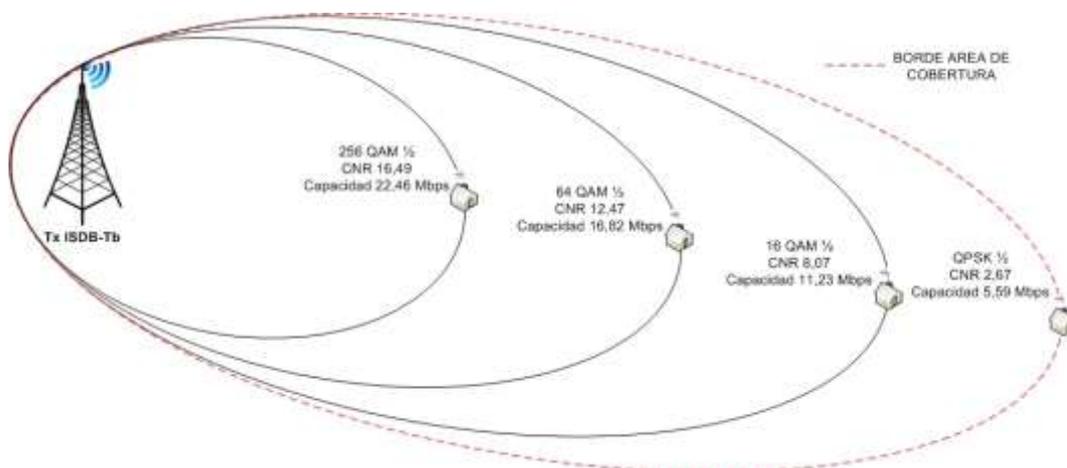


Figura 4.2. MODCODs de DVB-RCT2 para obtener potencia y cobertura del transmisor de la estación base para cada uno de ellos

Como se puede observar en la Tabla 4.4, mientras más robusto sea el MODCOD a ser utilizado en el UL menor capacidad por usuario se tendrá, pero mayor distancia podrá ser cubierta por un transmisor de TV ubicado en la estación base.

MODCOD DVB-RCT2	Potencia máxima del Tx de la estación base (dBm/Watts)	Distancia que cubriría el Tx de la estación base (Km)	Capacidad por usuario (Kbps)
QPSK 1/2	60,77/1194 (borde de cobertura)	129	103
16QAM 1/2	55,37/344	76	208
64QAM 1/2	50,97/125	42	311
256QAM 1/2	46,95/50	26	416

Tabla 4.4. Parámetros de la estación base para un determinado MODCOD de DVB-RCT2

#### 4.2.3. Intensidad de campo eléctrico mínima ( $E_{min}$ )

Luego de haber definido las CNRs requeridas por cada tecnología y considerando la probabilidad de recepción del 70% y del 95%, se ha obtenido los valores de  $E_{min}$  para los estándares de TDT ISDB-Tb, DVB-T2, DVB-RCT y DVB-RCT2. Pero además se han utilizado los valores de  $E_{min}$  para el estándar analógico NTSC considerando un área de cobertura secundaria [8], debido a que se consideran áreas rurales. Con estos datos se procederá a realizar las estimaciones de cobertura para cada tecnología.

Banda	$E_{min}$ (dB $\mu$ V/m)
I y II	47
III	56
IV y V	64

Tabla 4.5. Intensidad de campo eléctrico estándar NTSC, área de cobertura secundaria

Constelación	Tasa de codificación	CNR	$E_{min}$ (dB $\mu$ V/m) 70%	$E_{min}$ (dB $\mu$ V/m) 95%
QPSK	1/2	6,23	32	38,2
QPSK	3/4	9,15	34,9	41,1
QPSK	7/8	11,1	36,9	43,1
16QAM	1/2	11,61	37,4	43,6
16QAM	3/4	15,62	41,4	47,6
16QAM	7/8	17,72	43,5	49,7
64QAM	1/2	17,34	43,1	49,3
64QAM	3/4	21,06	46,9	53
64QAM	7/8	23,35	49,1	55,3

Tabla 4.6. Intensidad de campo eléctrico estándar ISDB-Tb para recepción al 70% y 95%

Constelación	Tasa de codificación	CNR	E <sub>min</sub> (dBμV/m) 70%	E <sub>min</sub> (dBμV/m) 95%
QPSK	1/2	2,67	27,7	33,9
QPSK	2/3	4,87	29,9	36,0
QPSK	3/4	5,87	30,9	37,0
QPSK	5/6	7,07	32,1	38,2
16QAM	1/2	7,87	32,9	39,0
16QAM	2/3	10,57	35,6	41,7
16QAM	3/4	11,87	36,9	43,0
16QAM	5/6	13,17	38,2	44,3
64QAM	1/2	12,27	37,3	43,4
64QAM	2/3	15,39	40,4	46,5
64QAM	3/4	16,91	41,9	48,1
64QAM	5/6	18,68	43,7	49,8
256QAM	1/2	16,31	41,3	47,5
256QAM	2/3	20,02	45	51,2
256QAM	3/4	22,06	47,1	53,2
256QAM	5/6	24,38	49,4	55,5

Tabla 4.7. Intensidad de campo eléctrico estándar DVB-T2 para recepción al 70% y 95%

Constelación	Tasa de codificación	CNR	E <sub>min</sub> (dBμV/m) 70%	E <sub>min</sub> (dBμV/m) 95%
QPSK	1/2	4,6	40,9	47,1
QPSK	3/4	7,8	44,1	50,3
16QAM	1/2	10,6	46,9	53,1
16QAM	3/4	14,0	50,3	56,5
64QAM	1/2	15,7	52	58,2
64QAM	3/4	19,6	55,9	62,1

Tabla 4.8. Intensidad de campo eléctrico estándar DVB-RCT para recepción al 70% y 95%

Constelación	Tasa de codificación	CNR	E <sub>min</sub> (dBμV/m) 70%	E <sub>min</sub> (dBμV/m) 95%
QPSK	1/2	2,67	27,6	33,8
QPSK	3/4	5,87	30,8	37
16QAM	1/2	7,87	32,8	39
16QAM	3/4	11,87	36,8	43
64QAM	1/2	12,27	37,2	43,4
64QAM	3/4	16,91	41,9	48
256QAM	1/2	16,31	41,3	47,4
256QAM	3/4	22,06	47	53,2

Tabla 4.9. Intensidad de campo eléctrico estándar DVB-RCT2 para recepción al 70% y 95%.

#### 4.2.4. Planeación de frecuencias

##### Planeación de frecuencias para el estándar NTSC

Para el servicio de Televisión Analógica (estándar NTSC) se establecen las bandas de frecuencias y grupos de canales para televisión VHF y UHF, definidos en la Tabla 4.10.

Servicio de TV	Bandas de frecuencias	Grupos	Canales
Televisión VHF	Banda I: de 54 a 72 MHz y de 76 a 88 MHz Banda III: de 174 a 216 MHz	A1	2 4 5
		A2	3 6
		B1	8 10 12
		B2	7 9 11 13
Televisión UHF	Banda IV: de 500 a 608 MHz y de 614 a 644 MHz Banda V: de 644 a 686 MHz	G1	19 21 23 25 27 29 31 33 35
		G2	20 22 24 26 28 30 32 34 36
		G3	39 41 43 45 47 49
		G4	38 40 42 44 46 48

**Tabla 4.10.** Bandas de frecuencias, grupos y canales para TV VHF y UHF estándar NTSC [8]

Para la distribución de estos grupos y canales de la Tabla 4.10, se han definido en el Ecuador zonas geográficas detalladas en [8], pero para este estudio se hará referencia a la zona geográfica “B” que comprende las provincias de Bolívar y Chimborazo, excepto cantón Echeandía y zona occidental de la Cordillera Occidental, en donde se utilizan los grupos A1, B2 para VHF y G1, G2 para UHF. Es por esto que únicamente se detallarán en la Tabla 4.11 los canales de 6 MHz correspondientes a la banda I frecuencia VHF de 54 a 88 MHz; y en la banda IV frecuencia UHF de 500 a 608 MHz. Cabe destacar además que la banda 608-614 MHz (canal 37) está atribuida a título primario al servicio de Radioastronomía.

Banda de frecuencias (MHz)	Banda	Canal	Portadoras (MHz)	
			Portadora de video	Portadora de audio
VHF 54-72	I	2 (54-60)	55.25	59.75
		3 (60-66)	61.25	65.75
		4(66-72)	67.25	71.75
VHF 76-88	I	5 (76-82)	77.25	81.75
		6 (82-88)	83.25	87.75
		13(210-216)	211.25	215.75
		19 (500-506)	501.25	505.75
		20 (506-512)	507.25	511.75
		21 (512-518)	513.25	517.75
		22 (518-524)	519.25	523.75
		23 (524-530)	525.25	529.75
		24 (530-536)	531.25	535.75
UHF 500-608	IV	25 (536-542)	537.25	541.75
		26 (542-548)	543.25	547.75
		27 (548-554)	549.25	553.75
		28 (554-560)	555.25	559.75
		29 (560-566)	561.25	565.75
		30 (566-572)	567.25	571.75
		31 (572-578)	573.25	577.75

		32 (578-584)	579.25	583.75
		33 (584-590)	585.25	589.75
		34 (590-596)	591.25	595.75
		35 (596-602)	597.25	601.75
		36 (602-608)	603.25	607.75

**Tabla 4.11.** Rango de frecuencias Bandas I y IV para TV Analógica provincia de Chimborazo [8]

## Planeación de frecuencias para TDT

El Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) identificó las bandas y canales para la implementación de la TDT en el Ecuador, tal como se muestra en la Tabla 4.12.

Banda (MHz)	Canales
174-216	7-13
470-482	14-15
512-608	21-36
614-686	38-49
686-698	50-51

**Tabla 4.12.** Bandas para la implementación de la TDT en Ecuador [31]

La banda de frecuencias que se usará para la transmisión de la TDT es la banda UHF del espectro radioeléctrico, atribuida para el Servicio de Radiodifusión con emisiones de Televisión. Se identifica la banda de VHF correspondiente a los canales del 7 al 13 para la transmisión de TDT y su uso estará sujeto a los desarrollos futuros que se realicen sobre la norma ISDB-T internacional.

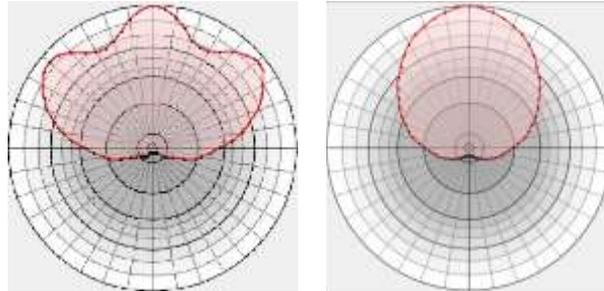
Durante el período de Simulcast se utilizarán los canales adyacentes y los canales principales del servicio de TV Analógica, en la banda de canales del 21 al 51, dependiendo de la disponibilidad existente. La asignación de canales virtuales se realizará de acuerdo a la normativa correspondiente que se emita para el efecto. Los canales 14 y 15 serán considerados para la operación de TDT en las zonas que el CONATEL determine [32]. No obstante, la operación de la TDT, se enmarcará dentro de lo dispuesto en el Plan Nacional de Frecuencias [33].

## 4.3. Escenario y consideraciones a tomar en cuenta para el cálculo de cobertura

### 4.3.1. Escenario

Para los ejercicios de diseño y planificación de cobertura e interferencias, así como el estudio de distancia óptima, se consideró un escenario rural con línea de vista (*LOS – Line Of Sight*) ubicado en la provincia de Chimborazo, el mismo que está caracterizado porque los receptores

de usuario utilizan antenas fijas en el tejado con ganancia de 11 dB. Para las estaciones base por su parte se consideraron sistemas radiantes directivos constituidos por arreglos de antenas diédricas [34] de ganancia 11 dB y que usan patrones de radiación horizontal y vertical similares a los representados en la Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Patrón de radiación horizontal y vertical de las antenas en las estaciones base

Para la estimación de cobertura NTSC se tomó como referencia la banda VHF, puesto que en el Ecuador se ha desarrollado la difusión de TV analógica en dicha banda, debido a sus características de propagación y a la existencia de equipos. Para la provincia de Chimborazo se han definido cinco áreas de operación, tomando como referencia la proximidad de los transmisores y el alcance de cobertura de los mismos, de tal manera que al asignar las frecuencias VHF correspondientes a esta zona, no exista la misma frecuencia asignada a transmisores cercanos, puesto que esto generaría interferencia. Para los sistemas de TDT en cambio se tomó como referencia la banda IV de UHF, pero se siguió el mismo criterio para la asignación de las frecuencias. Se definió además que el porcentaje de cobertura objetivo propuesto para las tecnologías de TDT deberá ser mayor o igual al de cobertura de TV analógica.

Con estos antecedentes, las áreas de operación y sus frecuencias, además de otros parámetros de transmisión así como las coordenadas de los sitios de transmisión se indican en la Tabla 4.13.

Ubicación del transmisor		Coordenadas geográficas	Altura sitio (m)	Altura antenas (m)	Potencia (W)	Azimut de radiación	Canal/Frecuencia (MHz) NTSC	Canal/Frecuencia (MHz) TDT
<b>SITIOS DE TRANSMISIÓN PRINCIPAL (ESTACIONES BASE)</b>								
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>					
<b>ÁREA DE OPERACIÓN 1</b>								
Cerro Agua Santa	(1)	01°41'46.80''S	78°39'59.80''O	2763	36	1000	60 °	2/55.25 21/513.25
Cerro Amula Cacha	(2)	1° 41' 31,90''S	78° 42' 58,60''O	3254	36	1000	68 °	4/67.25 23/525.25
Cerro La Mira	(3)	1° 30' 32,70''S	78° 35' 05,20''O	3633	36	1000	200°	6/83.25 25/537.25
Cerro Santa Vela	(4)	1° 34' 17''S	78° 30' 53''O	2832	36	1000	270 °	3/61.25 27/549.25
Cerro Amula Rayoloma	(5)	1°41'22.10''S	78° 43' 45.70''O	3289	36	1000	320 °	5/77.25 29/561.25
Cerro Gatazo Grande	(6)	1°39'41.30''S	78°45'00.80''O	3070	36	1000	270 °	2/55.25 21/513.25
<b>ÁREA DE OPERACIÓN 2</b>								
5 Km Sur-Oriente Guamote	(7)	1°57'34''S	78° 40' 51''O	3507	36	1000	290 °	2/55.25 21/513.25
Cerro El Retorno	(8)	1° 57' 02''S	78° 56' 36''O	2463	36	1000	190 °	4/67.25 23/525.25
Cerro Alausí	(9)	2° 13' 11''S	78° 50' 50''O	2692	36	1000	25 °	6/83.25 25/537.25
Cerro Cruz Loma	(10)	2°17' 13''S	78° 54' 16''O	2694	36	1000	210 °	3/61.25 27/549.25
Cerro Tamborpungo	(11)	2°15' 33''S	78° 46' 31''O	3441	36	1000	130 °	5/77.25 29/561.25
Recinto Buenos Aires Cumandá	(12)	2°12' 42''S	79° 08' 55''O	302	36	1000	90 °	2/55.25 21/513.25
<b>SITIOS DE TRANSMISIÓN DE USUARIO</b>								
Cantón Alausí		2° 12' 10''S	78° 50' 46''O	2473	10	1	--	No utilizado 19 / 501.25
Cantón Chambo		1° 43' 44,26''S	78° 35' 57,46''O	3056	10	1	--	
Cantón Chunchi		2° 16' 60''S	78° 55' 0''O	2270	10	1	--	
Cantón Colta		1° 42' 0'' S	78° 45' 0''O	3200	10	1	--	
Cantón Cumandá		2° 12' 57.28''S	79° 5' 36,78''O	1200	10	1	--	
Cantón Guamote		1°55' 60''S	78° 43' 0''O	3050	10	1	--	
Cantón Guano		1° 36' 0''S	78° 37' 60''O	2720	10	1	--	
Cantón Pallatanga		1° 59' 52''S	78° 57' 56''O	1462	10	1	--	
Cantón Penipe		1° 33' 52,2''S	78° 31' 43,8''O	2670	10	1	--	
Cantón Riobamba		1° 40' 00''S	78° 37' 60''O	2757	10	1	--	

**Tabla 4.13.** Características principales estaciones base y sitios de usuario



#### 4.3.2. Datos de población en la provincia de Chimborazo

Para obtener el porcentaje de cobertura poblacional, es importante conocer la población del área de estudio, la misma se indica en la Tabla 4.14, y refleja los datos organizados en cuanto a parroquias urbanas y rurales de cada cantón existente en la provincia de Chimborazo.

Cantón	Parroquias Urbanas	Parroquias Rurales	Población (habitantes)
Alausí	ALAUSSI	--	10.210
	--	ACHUPALLAS	10.529
	--	GUASUNTOS	2.413
	--	HUIGRA	2.352
	--	MULTITUD	2.084
	--	PISTISHI (NARÍZ DEL DIABLO)	345
	--	PUMALLACTA	905
	--	SEVILLA	803
	--	SIBAMBE	3.869
	--	TIXAN	10.579
<b>POB. TOTAL ALAUSÍ</b>		<b>44.089</b>	
Colta	VILLA LA UNION	--	18.561
	--	CAÑI	962
	--	COLUMBE	15.862
	--	JUAN DE VELASCO (PANGOR)	3.918
	--	SANTIAGO DE QUITO	5.668
<b>POB. TOTAL COLTA</b>		<b>44.971</b>	
Cumandá	CUMANDA	--	12.922
<b>POB. TOTAL CUMANDA</b>		<b>12.922</b>	
Chambo	CHAMBO	--	11.885
<b>POB. TOTAL CHAMBO</b>		<b>11.885</b>	
Chunchi	CHUNCHI	--	7.405
--	CAPZOL	--	899
--	COMPUD	--	878
--	GONZOL	--	1.729
--	LLAGOS	--	1.775
<b>POB. TOTAL CHUNCHI</b>			<b>12.686</b>
Guamote	GUAMOTE	--	24.638
	--	CEBADAS	8.218
	--	PALMIRA	12.297
<b>POB. TOTAL GUAMOTE</b>			<b>45.153</b>
Guano	GUANO	--	16.517
	--	SAN ISIDRO DE PATULU	4.744
	--	ILAPO	1.662
	--	LA PROVIDENCIA	553
	--	SAN GERARDO DE PACAICAGUAN	2.439
	--	SAN ANDRES	13.481
	--	SAN JOSE DEL CHAZO	1.037

	--	SANTA FE DE GALAN	1.673
	--	VALPARAISO	404
	--	GUANANDO	341
<b>POB. TOTAL GUANO</b>			<b>42.851</b>
<b>Pallatanga</b>	PALLATANGA	--	11.544
<b>POB. TOTAL PALLATANGA</b>			<b>11.544</b>
<b>Penipe</b>	PENIPE	--	2.089
	--	BILBAO	196
	--	EL ALTAR	1.265
	--	LA CANDELARIA	475
	--	MATUS	991
	--	PUELA	622
	--	BAYUSHIG	1101
<b>POB. TOTAL PENIPE</b>			<b>6.739</b>
<b>Riobamba</b>	RIOBAMBA	--	156.723
	--	CACHA	3.160
	--	CALPI	6.469
	--	CUBIJIES	2.514
	--	FLORES	4.546
	--	LICAN	7.963
	--	LICTO	7.807
	--	PUNGALA	5.954
	--	PUNIN	5.976
	--	QUMIAG	5.257
	--	SAN JUAN	7.370
--	SAN LUIS	12.002	
<b>POB. TOTAL RIOBAMBA</b>			<b>225.741</b>
<b>POB. TOTAL CHIMBORAZO</b>			<b>458.581</b>

Tabla 4.14. Datos de población provincia de Chimborazo [35]

#### 4.3.3. Número de hogares en la provincia de Chimborazo

Se ha considerado el número de hogares puesto que cada uno dispondría de un decodificador para recibir la señal de TDT. En este sentido en la Tabla 4.15, muestra el número de hogares en la provincia de Chimborazo organizados en cuanto a parroquias urbanas y rurales por cantón. El promedio de personas por hogar es de 3,63 (se utilizará para los estudios el valor de 4); y la densidad poblacional en esta provincia es de 71 habitantes/Km<sup>2</sup> [35].

Cantón	Parroquias Urbanas	Parroquias Rurales	Hogares
<b>Alausí</b>	ALAUSI	--	2.618
	--	ACHUPALLAS	2.582
	--	GUASUNTOS	731
	--	HUIGRA	674
	--	MULTITUD	566
	--	PISTISHI (NARÍZ DEL DIABLO)	84

	--	PUMALLACTA	240
	--	SEVILLA	219
	--	SIBAMBE	1.016
	--	TIXAN	2.531
<b>TOTAL HOGARES ALAUSÍ</b>			<b>11.261</b>
<b>Colta</b>	VILLA LA UNION	--	5.906
	--	CAÑI	270
	--	COLUMBE	4.089
	--	JUAN DE VELASCO (PANGOR)	972
	--	SANTIAGO DE QUITO	2.468
<b>TOTAL HOGARES COLTA</b>			<b>14.425</b>
<b>Cumandá</b>	CUMANDA	--	3.482
<b>TOTAL HOGARES CUMANDA</b>			<b>3.482</b>
<b>Chambo</b>	CHAMBO	--	3.099
<b>TOTAL HOGARES CHAMBO</b>			<b>3.099</b>
<b>Chunchi</b>	CHUNCHI	--	1.896
	--	CAPZOL	252
	--	COMPUD	234
	--	GONZOL	489
		LLAGOS	488
<b>TOTAL HOGARES CHUNCHI</b>			<b>3.359</b>
<b>Guamote</b>	GUAMOTE	--	6.167
	--	CEBADAS	2.115
	--	PALMIRA	2.788
<b>TOTAL HOGARES GUAMOTE</b>			<b>11.070</b>
<b>Guano</b>	GUANO	--	4.332
	--	SAN ISIDRO DE PATULU	1.287
	--	ILAPO	438
	--	LA PROVIDENCIA	163
	--	SAN GERARDO DE PACAICAGUAN	673
	--	SAN ANDRES	3.674
	--	SAN JOSE DEL CHAZO	281
	--	SANTA FE DE GALAN	411
	--	VALPARAISO	112
	--	GUANANDO	116
<b>TOTAL HOGARES GUANO</b>			<b>11.487</b>
<b>Pallatanga</b>	PALLATANGA	--	3.029
<b>TOTAL HOGARES PALLATANGA</b>			<b>3.029</b>
<b>Penipe</b>	PENIPE	--	676
	--	BILBAO	66
	--	EL ALTAR	388
	--	LA CANDELARIA	130
	--	MATUS	310
	--	PUELA	215

	--	BAYUSHIG	357
<b>TOTAL HOGARES PENIPE</b>			<b>2.142</b>
<b>Riobamba</b>	RIOBAMBA	--	42.537
	--	CACHA	1.192
	--	CALPI	1.826
	--	CUBIJIES	675
	--	FLORES	1.696
	--	LICAN	1.928
	--	LICTO	2.397
	--	PUNGALA	1.589
	--	PUNIN	1.818
	--	QUMIAG	1.480
	--	SAN JUAN	1.891
	--	SAN LUIS	3.024
<b>TOTAL HOGARES RIOBAMBA</b>			<b>62.053</b>
<b>TOTAL HOGARES CHIMBORAZO</b>			<b>125.407</b>

**Tabla 4.15.** Total de hogares provincia de Chimborazo [35]

#### 4.4. Análisis de cobertura e interferencias

##### 4.4.1. Estimación de cobertura

Conociendo la Emin y tomado en cuenta las consideraciones para el cálculo de cobertura mencionadas anteriormente, se realizaron ejercicios de cobertura tanto para el estándar de TV analógica NTSC como para los estándares de TDT ISDB-Tb, DVB-T2 y DVB-RCT2.

Para el estándar ISDB-Tb, como no se cuenta con los datos reales de planificación de la red de TDT en Ecuador; la estimación de cobertura estuvo basada en la guía de implementación definida en [28] y en la pruebas de TDT realizadas en el país para adoptar esta tecnología [27], es por esto que se utilizó el MODCOD 64QAM  $\frac{3}{4}$ , el mismo que brinda una capacidad de transmisión de 19,32 Mbps.

Para la cobertura de la tecnología DVB-T2, se buscó un MODCOD que tuviera una CNR parecida a la de ISDB-Tb, siendo este 256QAM  $\frac{3}{4}$  que da una capacidad de 32,91 Mbps comparada con los 18,25 Mbps que brinda ISDB-Tb; se hizo esto con el objetivo de calcular la ganancia en capacidad de DVB-T2 para la misma cobertura (valor de CNR y distancia SFN). En la Tabla 4.20, se puede ver más claramente estos aspectos.

Para la tecnología DVB-RCT2, se buscó el modo de transmisión que pueda utilizar un usuario en el borde de cobertura, utilizando ISDB-Tb en DL y DVB-RCT2 en UL; siendo el MODCOD encontrado QPSK  $\frac{1}{2}$ .

MODCOD	Tecnología	CNR	Capacidad de transmisión
64QAM $\frac{3}{4}$	ISDB-Tb	21,06	18,25 Mbps
256 QAM $\frac{3}{4}$	DVB-T2	22,06	32,91 Mbps

**Tabla 4.20.** Ganancia en capacidad de DVB-T2 sobre ISDB-Tb para una CNR parecida

Además para obtener las zonas de cobertura e interferencias se aplicaron retardos artificiales a los transmisores de TV de forma automática con un algoritmo de asignación dinámica que implementa el software ICS Telecom. Luego de haber obtenido los retardos artificiales se calcula nuevamente la zona de cobertura e interferencias, se identifican las nuevas zonas de interferencia y se aplican retardos de forma manual en los transmisores que sean necesarios, esto para conseguir que la señal recibida en un punto dado contribuya positivamente con la señal emitida por otro transmisor, es decir que las señales lleguen dentro del intervalo de guarda definido.

### **Cobertura TV analógica NTSC**

En la Tabla 4.13, se especifican los canales/frecuencias utilizados para realizar los ejercicios de cobertura para TV analógica NTSC. Utilizando además los datos de población se llegó a determinar que la cobertura del estándar NTSC en la provincia de Chimborazo es aproximadamente al 96% de la población.



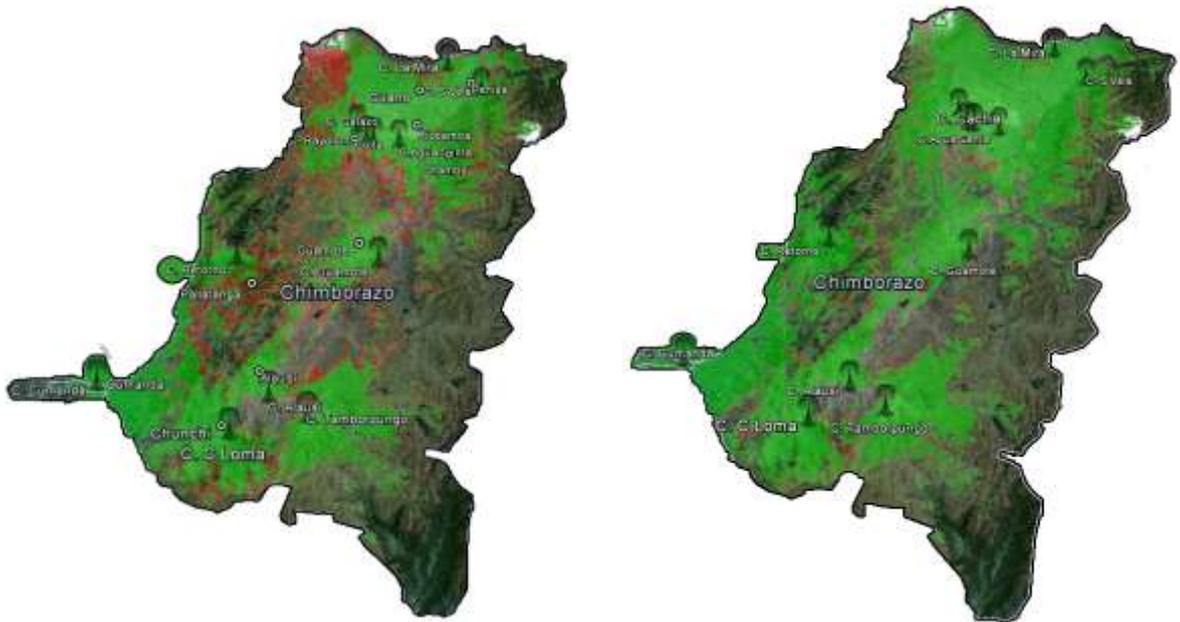
**Figura 4.4.** Cobertura TV analógica NTSC

## COBERTURA DL

**Caso 1: una frecuencia y cada transmisor emitiendo el mismo contenido (modo SFN).**

### a. Resultados de cobertura de TDT ISDB-Tb

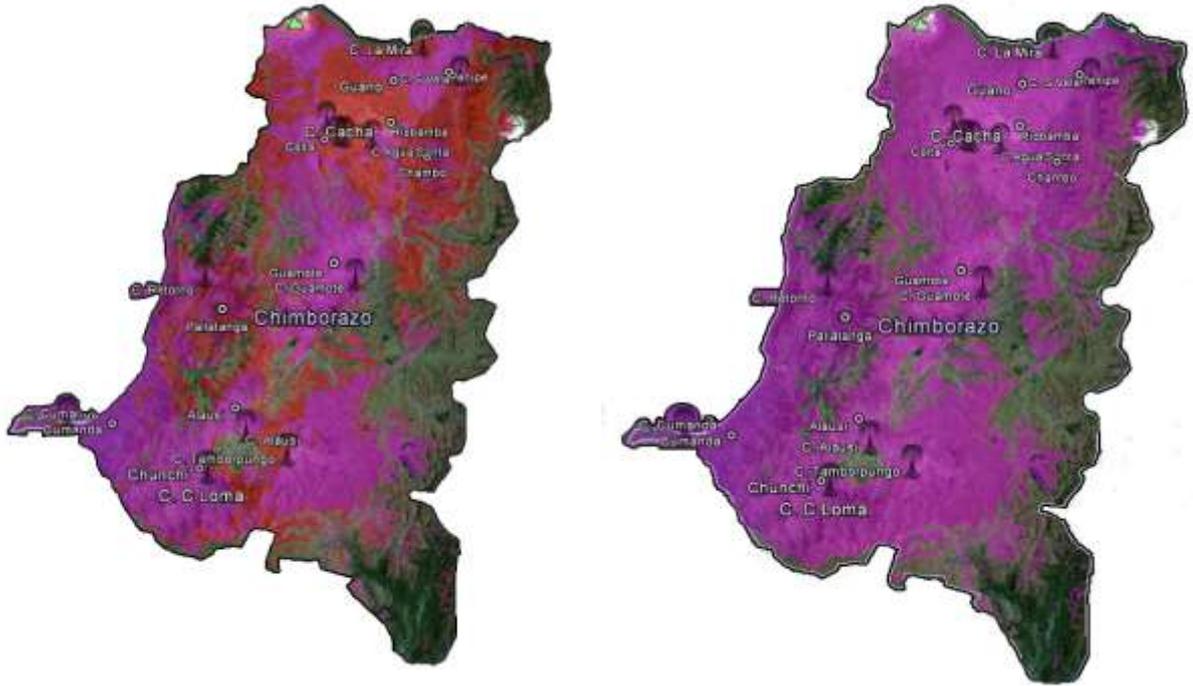
Para obtener la cobertura de la tecnología de TDT ISDB-Tb los transmisores trabajaron en modo SFN utilizando la frecuencia de 513.25 MHz, pero además se les aplicaron retardos artificiales. Con lo anteriormente mencionado se obtuvo un porcentaje de cobertura poblacional de aproximadamente el 91%.



**Figura 4.5.** Cobertura enlace descendente ISDB-Tb MODCOD 64QAM  $\frac{3}{4}$ , recepción al 70%, (Izquierda) sin retardos artificiales, (Derecha) con retardos artificiales en los transmisores.

## b. Resultados de cobertura de TDT DVB-T2

Al igual que en el caso anterior los transmisores operaron en modo SFN, obteniéndose un porcentaje de cobertura poblacional de aproximadamente el 92% para DVB-T2.



**Figura 4.6.** Cobertura enlace descendente DVB-T2 MODCOD 256QAM  $\frac{3}{4}$ , recepción al 70%, (Izquierda) sin retardos artificiales, (Derecha) con retardos artificiales en los transmisores.

### Caso 2: una frecuencia y cada transmisor emitiendo contenido diferente.

Para el caso de transmitir contenido diferente se consideraron las dos áreas de operación definidas en la Tabla 4.13, en donde cada área estuvo operativa una a la vez con sus transmisores trabajando a la misma frecuencia (513.25 MHz), es así que se obtuvieron los porcentajes de cobertura poblacional definidos en las Tablas 4.21 y 4.22 al transmitir contenido diferente por área de operación. A modo de ejemplo se graficará el área de operación 1 y las zonas de interferencia.

- a. Cobertura enlace descendente ISDB-Tb para DVB-RCT2, utilizando una frecuencia y transmitiendo contenido diferente.



**Figura 4.7.** Cobertura enlace descendente ISDB-Tb para DVB-RCT2, utilizando una frecuencia y transmitiendo contenido diferente, área de operación 1.

Área de operación	Porcentaje de población cubierta
1	58,58%
2	7,45%

**Tabla 4.21.** Porcentaje de población cubierta en ISDB-Tb, al transmitir contenido diferente por área de operación utilizando una frecuencia

- b. Cobertura enlace descendente DVB-T2 para DVB-RCT2, utilizando una frecuencia y transmitiendo contenido diferente.



**Figura 4.8.** Cobertura enlace descendente DVB-T2 para DVB-RCT2, utilizando una frecuencia y transmitiendo contenido diferente, área de operación 1.

Área de operación	Porcentaje de población cubierta
1	66,27%
2	12,42%

**Tabla 4.22.** Porcentaje de población cubierta en DVB-T2, al transmitir contenido diferente por área de operación utilizando una frecuencia

**Caso 3: varias frecuencias y cada transmisor emitiendo contenido diferente.**

Para los transmisores se han asignado las áreas de operación y las frecuencias definidas en la Tabla 4.13 para TDT, al igual que en el caso 2 se detallan en tablas los porcentajes de cobertura, y a modo de ejemplo se graficará el área de operación 1.

**a. Cobertura enlace descendente ISDB-Tb para DVB-RCT2, utilizando varias frecuencias y transmitiendo contenido diferente**



**Figura 4.9.** Cobertura enlace descendente ISDB-Tb para DVB-RCT2, utilizando varias frecuencias y transmitiendo contenido diferente, área de operación 1.

Área de operación	Porcentaje de población cubierta
1	63,23%
2	10,13%

**Tabla 4.23.** Porcentaje de población cubierta en ISDB-Tb, al transmitir contenido diferente por área de operación utilizando varias frecuencias



## COBERTURA UL

### a. Cobertura UL DVB-RCT2 utilizando QPSK $\frac{1}{2}$

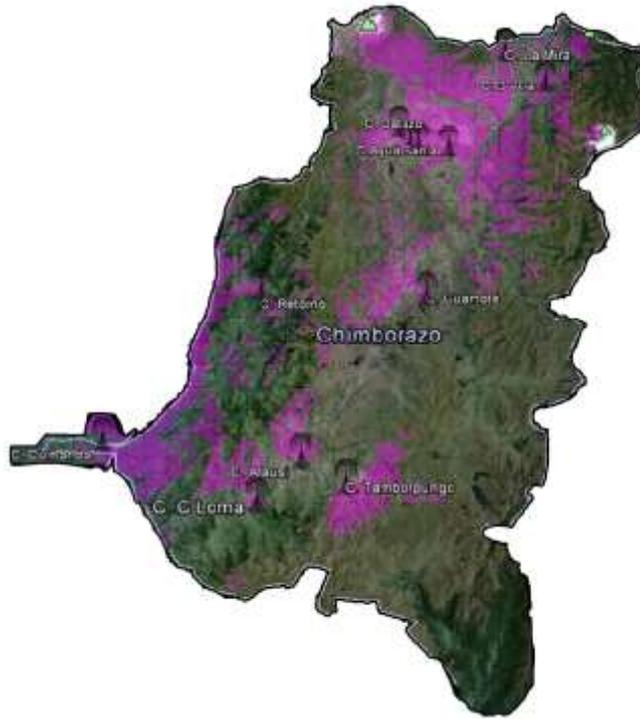
Para esta cobertura en UL se consideró el MODCOD QPSK  $\frac{1}{2}$ , obtenido al balancear la cobertura entre ISDB-Tb y DVB-RCT2. Se asumió además que los transmisores en el UL están en modo SFN trabajando en la frecuencia 501.25 MHz (canal 19) y por lo tanto no hay interferencias. Con esto se obtuvo un porcentaje de cobertura poblacional del 82%.



**Figura 4.11.** Cobertura enlace ascendente DVB-RCT2 MODCOD QPSK  $\frac{1}{2}$

### b. Cobertura enlace ascendente DVB-RCT PARA QPSK $\frac{1}{2}$

Al igual que en el caso anterior se consideró el MODCOD QPSK  $\frac{1}{2}$ , a efectos de comparar la cobertura entre DVB-RCT2 y DVB-RCT. El porcentaje de cobertura poblacional alcanzado con DVB-RCT fue del 75%.



**Figura 4.12.** Cobertura UL DVB-RCT MODCOD QPSK  $\frac{1}{2}$

En las Figuras 4.11 y 4.12, se observan las zonas de cobertura en UL para DVB-RCT2, considerando MODCOD QPSK  $\frac{1}{2}$ , asegurando de esta forma que los equipos de usuario (set-top-box) cuenten con la cobertura que les proporcionará una u otra estación base en determinada zona. En este caso, se asumió que los set-top-box que permiten la recepción de señales de TDT en DL, y a su vez la transmisión de las peticiones de internet en UL, pertenecen a la misma celda y no tienen movimiento, por lo que comparten el canal de RF, no existiendo interferencias.

Por lo anteriormente mencionado, es posible hacer una red SFN ISDB-T para toda la región, dedicando un canal RF para el DL y otro para el UL, o en su defecto reutilizando frecuencias de tal modo que la misma frecuencia se usada en la región para transmitir contenidos en dos sitios diferentes (tanto en DL como en UL), pero además cuando existan pocos usuarios a ser conectados en determinada zona, se podría utilizar un solo canal de RF para DL y UL usando FEFs, con lo cual se optimizaría los canales disponibles

#### 4.4.2. Análisis de interferencia

Es importante mencionar que existen dos tipos de interferencias, las de enlace descendente que son originadas por una torre de TV hacia usuarios que están asociados a otro sitio de transmisión principal, esto ocurre cuando las estaciones base operan a la misma frecuencia pero transmiten contenido diferente. En el caso de que las estaciones operen a la misma frecuencia y además emitan el mismo contenido (SFN), no se generarían interferencias en el DL pero el ancho de banda (capacidad) se compartiría entre todos los usuarios.

Por su parte las interferencias de enlace ascendente son originadas por los equipos de usuario hacia una torre de TV a la que no están asociados, dicha interferencia se percibe en el sitio de transmisión principal. En la Figura 4.13, se presentan los tipos de interferencias existentes.

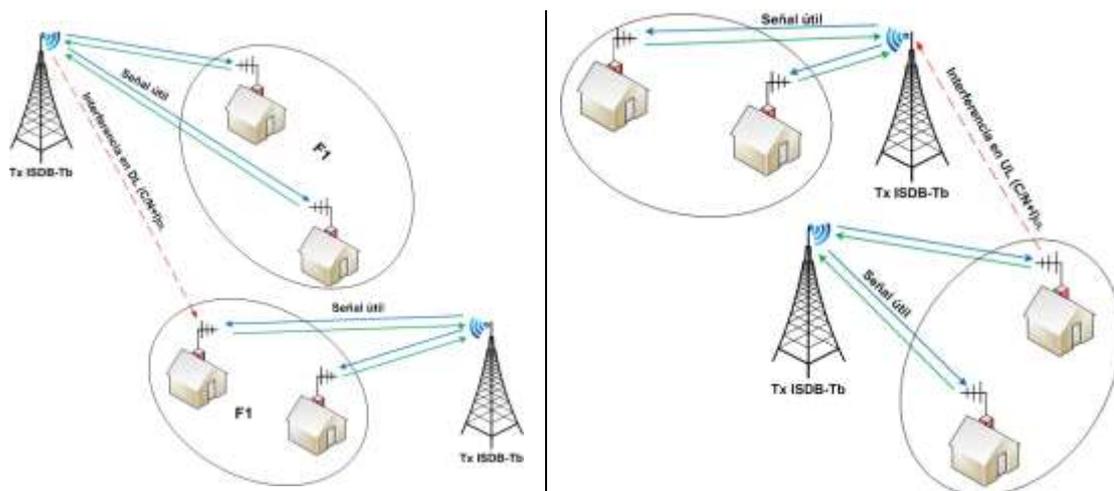


Figura 4.13. Interferencias en enlace descendente y ascendente

#### Interferencias en enlace descendente ISDB-Tb y DVB-T2

Las figuras de interferencia en enlace descendente fueron mostradas en las diferentes figuras de cobertura.

#### Interferencias enlace ascendente para DVB-RCT2

Se analizó si los equipos de usuario configurados con una potencia de emisión de 1W, operando a una frecuencia de 501.25 MHz, con MODCOD QPSK  $\frac{1}{2}$  y que se encuentren dentro del área de cobertura de un sitio de transmisión principal, generan o no interferencias hacia una estación de TV. A modo de ejemplo se evaluó la interferencia hacia la torre de TV ubicada en el cerro Amula Rayoloma, en donde se indica si los RCTTs generaron o no interferencias,

representándolos de rojo si genera interferencias y de verde si es el caso contrario. En la Figura 4.14, se representa la situación propuesta.



**Figura 4.14** Interferencias en canal ascendente causadas por distintos RCTTs hacia la torre de TV “Rayoloma”

#### 4.4.3. Estudio de distancia óptima

Si se diera el caso de tener que instalar nuevos transmisores de TV (estaciones base), se tendría que hacerlo de tal modo que las interferencias se reduzcan y el área de cobertura aumente, en este sentido con el objetivo de encontrar la distancia a la que deberían encontrarse las estaciones base en una red en la que todas trabajen a la misma frecuencia (SFN), se realizó un estudio de distancia óptima para las tecnologías ISDB-Tb y DVB-T2. Cabe destacar que el estudio realizado para DVB-T2 abarca a la tecnología DVB-T.

##### Distancia óptima SFN para ISDB-Tb

Para realizar el estudio de distancia óptima SFN para ISDB-Tb, se utilizó MODCOD 64QAM  $\frac{3}{4}$ , además de los GI permitidos en esta tecnología para una FFT 8K, con el objetivo de analizar a qué distancia podrían estar los transmisores para que las interferencias sean menores y los porcentajes de área y población cubierta aumenten. Cabe destacar que en cada transmisor se han configurado retardos artificiales para reducir las interferencias.

Los valores de la Tabla 4.25, fueron utilizados para calcular las interferencias para cada GI.

GI	Duración del GI (us)	Duración del símbolo útil (us)
1/4	252	1260
1/8	126	1134
1/16	63	1071
1/32	31,5	1039,5

Tabla 4.25. Duración del intervalo de guarda y símbolo útil para diferentes valores de GI, ISDB-Tb

FFTT 8K, GI 1/4



FFTT 8K, GI 1/8



FFTT 8K, GI 1/16



FFTT 8K, GI 1/32



Figura 4.15. Cobertura transmisores de TV en SFN, FFT 8K y diferentes GI, ISDB-Tb

En la Tabla 4.26, se observa que los intervalos de guarda con los que menor interferencia existe y mayor población y área se cubren son 1/4 y 1/8. Para este estudio de doctorado se

utilizará el GI 1/8 puesto que ofrece una mayor capacidad de transmisión que GI 1/4 para una misma cobertura tanto de área como poblacional.

GI	1/4	1/8	1/16	1/32
Distancia entre Txs (Km)	89,5	<b>44,8</b>	22,4	11,2
Capacidad útil (64QAM 3/4) (Mbps)	16,43	<b>18,25</b>	19,39	19,91
% de área cubierta	55,07	<b>54,53</b>	49,41	44,81
% de población cubierta	90,88	<b>90,87</b>	89,49	83,95

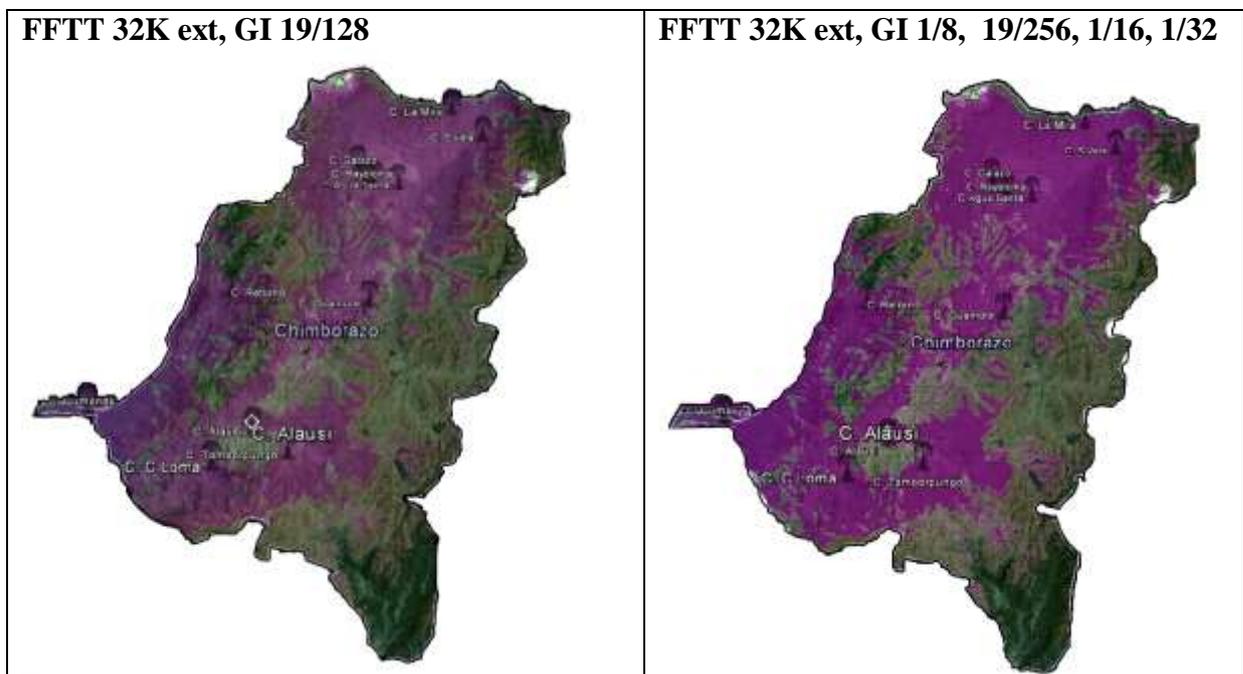
Tabla 4.26. Distancia, capacidad, área y población cubierta para diferentes valores de GI, ISDB-Tb

### Distancia óptima para DVB-T2

El estudio de distancia óptima para ISDB-Tb se extendió para el estándar DVB-T2, para lo cual se utilizó la CNR que más se aproximó, siendo la del MODOCOD 256QAM 3/4 con un valor de 22,06. Para DVB-T2 se utilizó además los GI permitidos para una FFT 32K extendido, en la Tabla 4.27 se muestran los valores mediante los cuales se calcularon las interferencias. Cabe destacar que luego de aplicar retardos artificiales a los transmisores la interferencia fue nula.

GI	Duración del GI (us)	Duración del símbolo útil (us)
1/4	N/A	N/A
<b>19/128</b>	709	4779
1/8	597	4779
<b>19/256</b>	355	4779
1/16	299	4779
1/32	149	4779
<b>1/128</b>	37	4779

Tabla 4.27. Duración del intervalo de guarda y símbolo útil para diferentes valores de GI, DVB-T2





## Capítulo 5

# Estudio del impacto de la posible implementación de DVB-RCT2

### **5.1. Terminología, conceptos y teoría sobre la evaluación de impacto**

#### **5.1.1. Concepto de evaluación**

Evaluar constituye un proceso sistemático, metódico y neutral que hace posible el conocimiento de los efectos de un proyecto o programa, relacionándolos con las metas propuestas y los recursos movilizados. Se podría decir que la evaluación es un proceso que facilita la identificación, recolección e interpretación de informaciones útiles a los encargados de tomar decisiones y a los responsables de la ejecución y gestión de los programas [36].

#### **5.1.2. Tipos de evaluación**

Según la estructuración y el enfoque elegidos, los procesos de evaluación pueden clasificarse en: pseudoevaluaciones, evaluaciones verdaderas cuantitativas puras (cuasi experimentales y experimentales) y evaluaciones verdaderas mixtas o cuantitativas.

Enfoques de la evaluación	
<b>Pseudoevaluaciones</b>	En ellas, se cumple un proceso evaluatorio, pero con fuerte injerencia de alguna de las partes comprometidas con el proyecto y que presiona para que aparezcan resultados preestablecidos. El evaluador no actúa neutralmente.
<b>Evaluaciones experimentales y cuasi experimentales</b>	<p>Son evaluaciones exclusivamente cuantitativas. Este diseño exige que se constituya un grupo de control (tarea ardua y compleja). Se mide el impacto por comparación estadística entre el grupo de control y el grupo beneficiario de las acciones del programa.</p> <p><i>Se miden:</i> incremento del bienestar de los beneficiarios, según <i>empleo</i> (empleabilidad, inserción laboral posterior, tipo de trabajo, satisfacción laboral) <i>ingresos</i> y <i>ciudadanía</i>. Asimismo, puede medirse focalización, deserción, retención, cobertura.</p>
<b>Evaluaciones verdaderas mixtas cuantitativas</b>	<p>El abordaje mixto permite tener los datos señalados en el grupo anterior y agrega el aporte cualitativo.</p> <p>Entre estos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> cambios actitudinales</li> <li><input type="checkbox"/> cambios psicosociales</li> <li><input type="checkbox"/> autoestima</li> <li><input type="checkbox"/> empleabilidad</li> <li><input type="checkbox"/> necesidad y satisfacción con el programa</li> </ul> <p>Puede medirse también el impacto sobre los restantes actores (capacitadores, empresarios, informantes claves de la población).</p> <p>Se utilizan los estudios de casos, las observaciones, las entrevistas, en profundidad.</p> <p>El aporte mixto ayuda a entender más por qué unos programas son exitosos y otros fracasan.</p>

**Figura 1:** Enfoques de la evaluación [36]

### 5.1.3. Etapas de evaluación

La evaluación al ser un proceso sistemático, consta de etapas las mismas que van en relación al momento en el cual se desarrollan, siendo estas:

- **EX ANTE.-** Se cumple antes del inicio de la ejecución. Se evalúan el contexto socioeconómico e institucional; los problemas identificados; las necesidades detectadas; población objetivo; los insumos; las estrategias de acción.
- **INTRA.-** Se desarrolla durante la ejecución del programa. Se evalúan las actividades del proceso mientras estas se están desarrollando, identificando los aciertos, los errores, las dificultades.
- **POST.-** Se corresponde con la finalización inmediata de la ejecución del proyecto, detectando, registrando y analizando los resultados tempranos.

- **EX POST.**- Se realiza tiempo después (meses o años) de concluida la ejecución. Evalúa los resultados mediatos y alejados, consolidados en el tiempo.

#### **5.1.4. Concepto de impacto**

El impacto está compuesto por los efectos a mediano y largo plazo que tiene un proyecto o programa para la población objetivo y para el entorno, sean estos efectos o consecuencias deseadas (planificadas) o sean no deseadas [37].

#### **5.1.5. Propósito de Evaluación de impacto**

La evaluación de impacto tiene como propósitos determinar si un proyecto o programa produjo los efectos deseados en las personas, hogares e instituciones a los cuales este se aplica; obtener una estimación cuantitativa de estos beneficios de mediano y largo plazo y evaluar si estos son o no atribuibles a la intervención del proyecto o programa.

Una evaluación de impacto debe identificar si existen o no relaciones de causa-efecto entre el proyecto o programa y los resultados obtenidos y esperados, ya que pueden existir otros factores que ocurren durante el periodo de intervención del proyecto o programa, que están correlacionados con los resultados y que no han sido necesariamente causados por dicho proyecto o programa [38].

Para ello un elemento importante en la evaluación de impacto es la construcción a través de métodos estadísticos de un escenario contrafactual para el proyecto o programa, es decir construir una situación hipotética en la cual hubiesen estado los beneficiarios en caso de que dicho proyecto o programa no se hubiese implementado. A través de la comparación de la realidad con esta situación contrafactual, se intenta aislar mediante el uso de técnicas estadísticas la influencia de estos factores externos agregados que inciden en los resultados. Evaluando de esta manera si efectivamente existen relaciones de causa-efecto (efecto causal) entre el proyecto o programa y los resultados, procediendo a una cuantificación de los beneficios.

#### **5.1.6. Metodología para implementar una evaluación de impacto [39]**

A continuación se detallarán los pasos operativos para realizar una evaluación de impacto. Estos pasos serán los que permitan establecer el efecto causal del proyecto o programa y responder a las preguntas formuladas por una evaluación de impacto. Dicha metodología, se ha definido en 5 fases que serán detalladas y desarrolladas a continuación.

### **FASE 1: Preparar la evaluación**

- Identificar el/los problemas de investigación a ser evaluados.
- Formular la pregunta de evaluación – Objetivo central y específicos de la investigación.
- Especificar la teoría del cambio – Identificación de las variables de la evaluación del impacto.
- Determinar la cadena de resultados.
- Formular la hipótesis.
- Definir indicadores de evaluación de impacto.

### **FASE 2: Hacer operativo el diseño de la evaluación**

- Definir reglas operativas.
- Elegir método de evaluación de impacto.
- Definir la relación entre las reglas operativas y los métodos de evaluación de impacto.
- Determinar la escala mínima de intervención.
- Confirmar que el diseño de la evaluación es ético.
- Formar un equipo de evaluación.
- Definir el cronograma de la evaluación.
- Definir el presupuesto para la evaluación.

### **FASE 3: Elegir la muestra de una población dada**

- Decidir el tamaño de la muestra
- Decidir la estrategia de muestreo

### **FASE 4: Recolectar datos**

- Desarrollar y aplicar el cuestionario.
- Hacer una prueba piloto de la técnica de recolección empleada.
- Tabular e interpretar los resultados.

### **FASE 5: Producir y divulgar los resultados**

- Plan de evaluación de impacto.
- Informe de línea base.
- Informe final de la evaluación de impacto.

## **A. FASE 1: Preparar la evaluación**

En esta fase se describen los pasos iniciales para desarrollar una evaluación. Estos incluyen identificar el/los problema/s a ser evaluados, determinar el tipo de pregunta a la que responderá la evaluación, especificar una teoría del cambio que describa cómo se supone que el proyecto logrará los resultados previstos, elaborar una cadena de resultados, formular qué hipótesis serán comprobadas por la evaluación y seleccionar los indicadores de evaluación de impacto.

### **A.1. Identificar el/los problema/s de investigación a ser evaluados**

Aquí se describirá de forma detallada el o los problemas a ser evaluados. La identificación del problema consiste en aislar del conjunto posible de situaciones concretas que puede ofrecer un tema determinado, una situación particular que pueda ser sometida a observación y análisis a fin de establecer preguntas y respuestas hipotéticas que serán sometidas a comprobación.

### **A.2. Formular pregunta de evaluación**

La pregunta de evaluación determinará el objetivo central de la investigación. El cual será utilizado para definir los indicadores de evaluación de impacto. Por lo tanto, la evaluación consiste en la generación de evidencias creíbles para responder a esa pregunta. Dicha pregunta puede formularse como: ¿Cuál es el impacto (o efecto causal) de un proyecto o programa sobre un resultado de interés?

El objetivo que se defina debe contar con una estructura básica que exponga claramente lo que se espera lograr. Para ello, es bastante útil definir unos componentes mínimos para su formulación y realizar una validación a partir de los criterios utilizados por la metodología de selección de objetivos EMARF, en inglés conocido como SMART (*Specific, Measurable, Attributable, Realistic, Targeted*).

- **Específicos.-** para medir la información necesaria con la máxima proximidad.
- **Medibles.-** para asegurar que es factible obtener la información.
- **Atribuibles.-** para asegurar que el objetivo está relacionado con los logros del proyecto.
- **Realistas.-** para asegurar que los datos se pueden obtener puntualmente, con una frecuencia y costo razonables.
- **Focalizados.-** en la población objetivo.

En la Tabla 5.1 se presenta la matriz de evaluación de objetivos utilizando la metodología SMART. Cuyos niveles de ponderación serán: 1= Muy malo; 2 = Malo; 3 = Regular; 4 = Bueno; 5 = Muy bueno.

Matriz de validación de objetivos – Metodología SMART							
Objetivos	Verbo Infinitivo	Específico	Medible	Atribuible	Realista	Focalizado	Puntaje total
	SI/NO						

**Tabla 5.1.** Matriz de validación de objetivos – Metodología SMART [39]

### A.3. Especificar la teoría del cambio

Una teoría del cambio es una descripción de cómo se supone que una intervención conseguirá los resultados deseados. Describe la lógica causal de cómo y por qué un proyecto o un programa lograrán los resultados deseados o previstos.

La teoría del cambio es fundamental para cualquier evaluación de impacto, ya que esta se basa en relaciones de causa-efecto. Al tratarse de uno de los primeros pasos en el diseño de la evaluación, formular una teoría del cambio puede ayudar a especificar las preguntas de investigación.

Las teorías del cambio describen una secuencia de eventos que generan resultados, examinando las condiciones y suposiciones necesarias para que se produzca el cambio, hacen explícito además la lógica causa-efecto detrás del proyecto o programa y ayudan a trazar el mapa de las intervenciones que tendría dicho proyecto o programa a lo largo de su desarrollo.

#### A.3.1. Identificación de las variables de la evaluación de impacto

Son todas las características que, al ser medidas antes y después del proyecto o programa, para luego ser comparadas, dan el peso del impacto de dicho proyecto o programa.

Una variable es un atributo que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de adoptar diferentes valores, los cuales pueden medirse u observarse.

#### A.3.2. Tipos de variables

La clasificación más común de las variables es: por su medición (cualitativas y cuantitativas) y por su influencia (independientes y dependientes).

**Variables cualitativas.-** expresan cualidades, características o modalidad, se subdividen en:

- **Variable cualitativa ordinal o variable cuasicuantitativa.-** puede tomar distintos valores ordenados siguiendo una escala establecida, aunque no es necesario que el intervalo entre mediciones sea uniforme.
- **Variable cualitativa normal.-** los valores no pueden ser sometidos a un criterio de orden.

**Variabes cuantitativas.-** pueden ser medidas numéricamente, por lo que los hechos estudiados se distribuyen a lo largo de una escala, se subdividen en:

- **Variable discreta.-** se miden sobre una escala de valores que se corresponde a un número finito o limitado.
- **Variable continua.-** su escala de medición es infinita.

**Variabes independientes.-** no depende de otra variable.

**Variabes dependientes.-** sus valores dependen de otra variable.

Para la evaluación de impacto se utilizarán variables cuantitativas, con el objetivo de medir si la implementación de un proyecto o programa ha tenido una afectación positiva o negativa.

### **A.3.3. Determinar la cadena de resultados**

Una teoría del cambio puede diseñarse de varias maneras, por ejemplo, mediante modelos teóricos, modelos lógicos, marcos lógicos, modelos de resultados y cadenas de resultados. Todos ellos incluyen los elementos básicos de una teoría del cambio, es decir, la cadena causal, que debe ser capaz de discernir entre los logros del proyecto o programa y las condiciones o influencias ajenas a estos. Para el estudio de impacto realizado en esta tesis doctoral se usará la cadena de resultados debido a que es el modelo más sencillo y claro para describir la teoría del cambio.

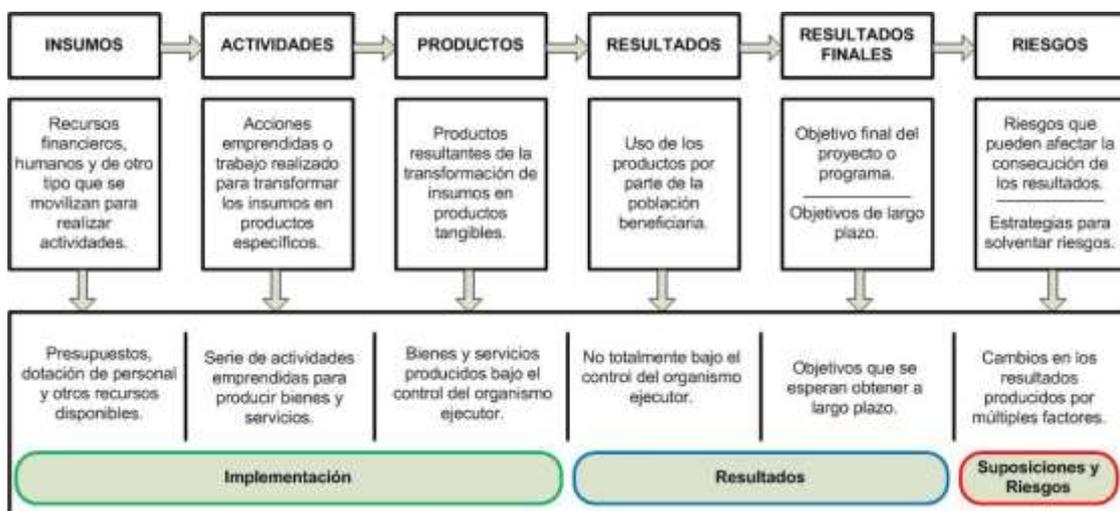
Una cadena de resultados establece la secuencia de insumos, actividades y productos de los que se espera que mejoren los resultados y los resultados finales. Dicha cadena representará como mínimo los elementos detallados a continuación, mismos que están representados en la Figura 5.1.

- **Insumos.-** Los recursos de los cuales dispone el proyecto o programa, que incluyen el personal y el presupuesto.
- **Actividades.-** Las acciones emprendidas y el trabajo realizado para transformar los insumos en productos.

- **Productos.-** Los bienes tangibles y los servicios que producen las actividades del programa (están directamente bajo el control del organismo ejecutor).
- **Resultados.-** Los resultados que se espera alcanzar una vez que la población se beneficie de los productos del proyecto (los resultados se dan normalmente a corto o mediano plazo).
- **Resultados finales.-** Los objetivos finales del proyecto (pueden estar influidos por múltiples factores y se alcanzan normalmente después de un largo período).
- **Riesgos.-** Probabilidad de que ocurra un contratiempo que puede afectar a la obtención de los resultados y los resultados finales.

La cadena de resultados tiene tres partes principales:

- **Implementación.-** El trabajo programado producido por el proyecto, que incluye los insumos, las actividades y los productos. Se trata de los aspectos que pueden ser supervisados directamente por el organismo ejecutor para medir el desempeño del proyecto o programa.
- **Resultados.-** Se refiere a lo que se ha denominado resultados y resultados finales. No dependen solo del control directo del organismo ejecutor sino también de cambios de comportamiento de los beneficiarios del proyecto o programa. Es decir dependen de las interacciones entre el lado de la implementación y el lado de los resultados más las suposiciones y riesgos. Cabe destacar que los resultados son los aspectos que se someten a la evaluación de impacto para medir la efectividad.
- **Suposiciones y riesgos.-** Hacen referencia a los riesgos que pueden afectar a la consecución de los resultados esperados, además de las estrategias para solventar dichos riesgos. Incluyen cualquier evidencia en la bibliografía especializada sobre la relación causa-efecto propuesta y las suposiciones en que se basa.



**Figura 5.1:** Cadena de resultados. Adaptado de [39]

#### **A.3.4. Formular la hipótesis**

Una vez que se haya descrito la cadena de resultados, se puede formular la hipótesis que se quiere comprobar mediante la evaluación de impacto.

#### **A.3.5. Definir indicadores de evaluación de impacto**

Para la definición de Indicadores es necesario seguir un procedimiento que permita articular todos los componentes de la construcción del sistema de indicadores con el objetivo central de la investigación, para de esa forma determinar objetivamente los resultados de las intervenciones o acciones tomadas a través de un producto o servicio a la sociedad [40].

Para la construcción de indicadores se definen las etapas descritas a continuación. Es importante destacar que un solo indicador no da cuenta del impacto de un proyecto o programa, por lo cual es necesario construir un sistema de indicadores. Dichos indicadores no podrán ser pre elaborados puesto que se necesita conocer el contexto específico en donde se desea realizar la evaluación del impacto.

- Identificación del objetivo.
- Definición de la topología del indicador.
- Redacción del indicador.
- Identificación de posibles indicadores.
- Selección de indicadores.
- Ficha metodológica del indicador.

#### **Identificación del objetivo**

Proceso definido al formular la pregunta de evaluación.

#### **Definición de la topología del indicador**

Una vez identificado el objetivo cuyo cumplimiento se quiere verificar y el proyecto o programa al cual está asociado, se procede a formular el indicador. El primer paso es identificar la tipología del indicador que se requiere, de acuerdo al nivel en el que se encuentre definido el objetivo. Posteriormente, se debe realizar una lista de los posibles indicadores a ser utilizados y finalmente seleccionar los más adecuados. A continuación se presentan algunos elementos útiles para realizar cada uno de estos pasos.

La tipología del indicador permite identificar, lo que está siendo cuantificado. Dependiendo de la meta a la que se le quiere hacer seguimiento y el nivel en el que esté definida, el indicador tendrá una de estas tres tipologías.

- **Gestión.-** cuantifica los recursos físicos, humanos y financieros utilizados en el desarrollo de las acciones; y mide la cantidad de acciones, procesos, procedimientos y operaciones realizadas durante de la etapa de implementación.
- **Producto.-** cuantifica los bienes y servicios (intermedios o finales) producidos y/o provisionados a partir de una determinada intervención, así como los cambios generados por ésta que son pertinentes para el logro de los efectos directos.
- **Efecto.-** mide los cambios resultantes en el bienestar de la población objetivo de la intervención como consecuencia (directa o indirecta) de la entrega de los productos y/o servicios.

A partir de estos criterios se identifica el tipo de indicador que se requiera de acuerdo al objetivo al cual se le quiere hacer seguimiento.

### **Identificación y redacción de posibles indicadores**

Todo indicador se compone de dos elementos: el objeto a cuantificar y la condición deseada del objeto, cuya secuencia es importante. En primer lugar debe ir el objeto a cuantificar, descrito por un sujeto, y posteriormente la condición deseada, definida a través de un verbo en participio que denote la característica deseada del sujeto. Por ejemplo el indicador “Proyectos de investigación y desarrollo construidos”, estaría formado por: **Sujeto:** Proyectos de investigación y desarrollo + **Verbo en participio pasado:** construidos.

Este aspecto es de gran importancia ya que es en la formulación del indicador en donde se debe garantizar que la información que este capture sea la necesaria para realizar una medición precisa del cumplimiento del objetivo. Es decir, mientras más precisa sea la definición del objeto a cuantificar, y más exacta sea su característica deseada, el indicador será mucho más exacto en su medición.

En teoría, la formulación de indicadores debería darse a partir de una deducción lógica de los objetivos a las cuales se les quiere hacer seguimiento. No obstante, esto en la práctica no siempre es posible debido a restricciones en los medios disponibles para recolectar la información, así como los costos asociados a su aplicación. Sin embargo, este ejercicio deductivo sirve como referente para iniciar la formulación de otros indicadores que puedan suplir esta función.

A partir de este indicador, se realiza la formulación de indicadores proxy. Estos son indicadores que a pesar de no ser los más precisos pueden dar una medida aproximada del avance en el cumplimiento del objetivo. Para su formulación es necesario encontrar sujetos similares o equivalentes a partir de la estructura del indicador.

## Selección de indicadores

Una cadena de resultados claramente definida ofrece un mapa útil para la selección de los indicadores que se medirán a lo largo de la cadena. Incluirá indicadores tanto para seguir la implementación del proyecto o programa como para evaluar los resultados. Con este objetivo una de las medidas más utilizadas para realizar la validación técnica de los indicadores es la metodología CREMA desarrollada por el Banco Mundial.

- **Claro.-** preciso e inequívoco.
- **Relevante.-** apropiado al tema en cuestión.
- **Económico.-** disponible a un costo razonable.
- **Medible.-** abierto a validación independiente.
- **Adecuado.-** Ofrece una base suficiente para estimar el desempeño.

El o los indicadores; seleccionados no deben necesariamente cumplir con todos los criterios CREMA definidos. Estos simplemente deben ser tenidos en cuenta para elegir o desechar indicadores, siendo el formulador en últimas el que define cuales utilizar. Asimismo, con respecto al número de indicadores seleccionados es importante que este no sea excesivo ya que esto genera cargas adicionales innecesarias y desperdicio de recursos. Por tal razón, la selección debe ser estratégica y concentrarse en escoger los que permitan contar con la información de mejor calidad.

Al elegir indicadores, es importante identificarlos a lo largo de toda la cadena, y no solo al nivel de los resultados. Así, se podrá seguir determinar las relaciones causa-efecto de cualquier resultado observado del proyecto o programa.

Aparte de seleccionar los indicadores, también resulta útil considerar los mecanismos para la producción de datos. La Tabla 5.2 enumera los elementos básicos de un plan de monitoreo y evaluación, y menciona los mecanismos necesarios para producir cada uno de los indicadores de manera fiable y puntual.

Elemento	Descripción
Resultados esperados (resultados y productos)	Obtenido de los documentos de diseño del programa y de la cadena de resultados
Indicadores (con líneas de	Derivados de la cadena de resultados (los

base y objetivos indicativos)	indicadores deben ser EMARF)
Fuente de datos	Fuente y lugar de donde se obtienen los datos; por ejemplo, una encuesta, un examen, una reunión de partes interesadas
Frecuencia de los datos	Frecuencia de disponibilidad de datos.
Responsabilidades	¿Quién es responsable de organizar la recolección de datos y comprobar la calidad y el origen de los mismos?
Análisis e información	Frecuencia del análisis, método de análisis y responsabilidad de informar.
Recursos	Estimación de los recursos necesarios y comprometidos para llevar a cabo las actividades programadas de monitoreo y evaluación.
Uso final	Estimación de los recursos necesarios y comprometidos para llevar a cabo las actividades programadas de monitoreo y evaluación.
Riesgos	¿Cuáles son los riesgos y las suposiciones que conlleva la ejecución de las actividades programadas de monitoreo y evaluación? ¿Cómo podrían afectar a las actividades programadas y a la calidad de los datos?

**Tabla 5.2.** Elementos de un plan de monitoreo y evaluación [39]

En la Tabla 5.3 se presenta una aplicación que puede resultar útil para la elección de los indicadores.

CÓMO SELECCIONAR UN INDICADOR									
Tipología	Indicador	Calificación de criterios					Puntaje total	Seleccionado	
		C	R	E	M	A		Si	No
Gestión	Indicador 1								
	..... Indicador n								
Producto	Indicador 1								
	..... Indicador n								
Efecto	Indicador 1								
	..... Indicador n								

**CALIFIQUE DE 1 A 5 CADA CRITERIO DE CADA INDICADOR**  
C = ¿Es el indicador lo suficientemente preciso para garantizar una medición objetiva?  
R = ¿Es el indicador un reflejo lo más directo posible del objetivo?  
E = ¿Es el indicador capaz de emplear un medio práctico y asequible para la obtención de datos?  
M = ¿Están las variables del indicador suficientemente definidas para asegurar que lo que se mide hoy es lo mismo que se va a medir en cualquier tiempo posterior, sin importar quién haga la medición?  
A = ¿Es el indicador suficientemente representativo del total de los resultados deseados y su comportamiento puede ser observado periódicamente?

**Tabla 5.3.** Elementos de un plan de monitoreo y evaluación [39]

## Ficha metodológica del indicador

Una vez realizado el proceso de selección, es necesario registrar toda la información asociada al indicador en una hoja de vida. Este instrumento permite documentar el proceso de formulación del indicador de tal manera que cualquier persona lo pueda entender fácilmente. Asimismo, permite consignar metas y registrar los resultados y avances logrados durante la vida útil del indicador.

Para esto se utilizará un esquema (Tabla 5.4) en donde se presenta la identificación de los indicadores, a través de las siguientes variables.

- **Nombre.-** Debe ser claro, corto, conciso y auto explicativo.
- **Descripción.-** Breve descripción de la información que el indicador va a proporcionar. Identifica los principales aspectos por los cuales se definió el indicador, qué se va a medir y porqué es importante medirlo.
- **Unidad de medida.-** Corresponde al parámetro de referencia para determinar las magnitudes de medición del indicador.
- **Fórmula.-** Descripción de los cálculos necesarios para obtener un valor cuantitativo del indicador. En caso de ser necesario se debe especificar la técnica estadística utilizada.
- **Variables del indicador.-** Serie de campos en los que se detalla la información de cada una de las variables contenidas en la fórmula del indicador. Incluye el nombre de la variable, una breve descripción, la fuente de información (primaria o secundaria), y la frecuencia con la cual se actualiza la información.
- **Periodicidad de la medición del indicador.-** Frecuencia con la cual se recolecta la información de avances y a partir de la cual se realiza su análisis.
- **Tipología.-** Nivel de la cadena de intervención en la cual el indicador realiza la medición. Puede ser de gestión, producto, o efecto.
- **Fecha de creación.-** Corresponde al día, mes y año en el cual se formuló el indicador.

Ficha metodológica del Indicador		
Nombre del indicador		
Descripción del Indicador		
Fórmula del Indicador		
Unidad de medida	Tipología	Fecha de creación

Tabla 5.4. Esquema para la identificación de los indicadores [40]

## **B. FASE 2: Hacer operativo el diseño de la evaluación**

En esta fase se considerarán los aspectos prácticos de la elección del método de evaluación, el mismo que sirve para crear grupos de comparación válidos para la evaluación, a partir de los cuales se podrá estimar el efecto causa-efecto de un proyecto o programa. Para generar grupos de comparación válidos y elegir el método de evaluación que más se ajuste a cada caso, es necesario definir reglas operativas adecuadas para el proyecto o programa. Las reglas operativas de un proyecto o programa determinan qué método de evaluación de impacto se puede aplicar y no a la inversa.

### **B.1. Definir reglas operativas**

Las reglas operativas más pertinentes para el diseño de la evaluación son las que determinan los criterios de elegibilidad del proyecto o programa y la manera como se selecciona a los participantes. Los grupos de comparación deberán provenir de aquellas unidades o individuos que sean elegibles pero que no se incorporan al proyecto o programa o las que se encuentran cerca del umbral de elegibilidad. Para encontrar grupos de comparación válidos es necesario que las reglas que determinan la elegibilidad y la selección de los beneficiarios cumplan con los principios de equidad, transparencia y rendición de cuentas. Por lo tanto las reglas operativas deberán ser:

- **Equitativas.-** porque deben clasificar o priorizar la elegibilidad de los participantes mediante indicadores comúnmente acordados basados en las necesidades de los individuos.
- **Transparentes.-** es decir deben ser públicas, para que la sociedad civil las acepte implícitamente y compruebe que se siguen realmente. Las reglas transparentes deben ser cuantificables y fáciles de observar.
- **Sujetas a rendición de cuentas.-** Las reglas operativas son responsabilidad de los funcionarios del proyecto o programa, quienes están sujetos a rendición de cuentas, a veces incluso para determinar las compensaciones de los funcionarios

Como se mencionó anteriormente, las reglas operativas se ocupan de la elegibilidad de los participantes del proyecto o programa, pero además se ocupan de los criterios de asignación cuando los recursos son limitados, y del orden de incorporación de los beneficiarios. Las reglas principales que sirven como hoja de ruta para los grupos de comparación responden a tres preguntas operativas fundamentales relacionadas con el la financiación, la focalización y la calendarización, así se tiene que:

- **Financiación.-** ¿Cuenta el proyecto o programa con suficientes recursos para llegar a escala y atender a todos los beneficiarios elegibles?

Los Gobiernos y las organizaciones no gubernamentales (ONGs) no siempre disponen de suficiente dinero para ofrecer servicios a todas las personas que son elegibles o solicitan beneficios. En esos casos, el Gobierno debe decidir quiénes reciben los beneficios del proyecto o programa y quiénes quedan excluidos. Muchas veces, los proyectos o programas se limitan a regiones geográficas específicas, áreas rurales o pequeñas comunidades, a pesar de que pueda haber beneficiarios elegibles en otras regiones o comunidades más grandes.

- **Reglas de focalización.-** ¿Quién es elegible para los beneficios del proyecto o programa? ¿El proyecto o programa está focalizado en función de un umbral de elegibilidad o está a disposición de todos?

La escuela primaria y la atención primaria a la salud se ofrecen normalmente de manera universal. Muchos otros proyectos o programas usan reglas operativas de focalización basadas en una clasificación continua con un límite o umbral definido. Por ejemplo, los programas de pensiones establecen una edad por encima de la cual las personas se vuelven elegibles. Los programas de transferencias monetarias condicionadas suelen clasificar a los hogares en función de su nivel estimado de pobreza, y los hogares que se encuentran por debajo de un umbral predeterminado se consideran elegibles.

- **Calendarización.-** ¿Cómo se incorporan durante el transcurso del proyecto o programa los posibles beneficiarios: todos al mismo tiempo o por fases?

Muchas veces, las limitaciones administrativas y de recursos impiden que un Gobierno ofrezca inmediatamente el proyecto o programa a todas las unidades elegibles. Si se expande el proyecto o programa con el tiempo, debe decidirse quién recibe primero los beneficios y quién se incorpora más tarde. Un método habitual es expandir el programa geográficamente, incorporando a todos los beneficiarios de una comunidad o región antes de pasar a la siguiente.

## **B.2. Elegir método de evaluación de impacto**

La clave para estimar el impacto causal es encontrar un grupo de comparación válido, lo cual se obtiene mediante los métodos de evaluación de impacto, entre los que se tiene, la selección aleatoria, el diseño de regresión discontinua, el método de diferencias en diferencias, el método de pareamiento, y los métodos combinados. A continuación se detalla cada uno de ellos.

## **Estimación del contrafactual**

Un objetivo clave de una evaluación de impacto es identificar a un grupo de participantes en el proyecto o programa (el grupo de tratamiento) y a un grupo de no participantes (el grupo de comparación) estadísticamente idénticos en ausencia de dicho proyecto o programa. Si los dos grupos son iguales, a excepción de que uno de ellos participa en el proyecto o programa y el otro no, cualquier diferencia en los resultados (contrafactual) deberá provenir del proyecto o programa aplicado

Por lo tanto, el reto principal es identificar a un grupo de comparación con las mismas características que el grupo de tratamiento. Para definir esto, los dos grupos deben ser iguales en al menos en tres aspectos.

1. Ambos grupos deben ser idénticos en ausencia del programa. Aunque no es necesario que todas las unidades del grupo de tratamiento sean idénticas a todas las unidades del grupo de comparación, las características promedio de los grupos de tratamiento y de comparación deben ser las mismas. Por ejemplo la edad media debe ser la misma.
2. Los grupos deben reaccionar de la misma manera al proyecto o programa. Por ejemplo, las probabilidades de que los ingresos del grupo de tratamiento mejoren gracias a la formación deben ser las mismas para el grupo de comparación.
3. Ambos grupos no pueden estar expuestos de manera diferente a otras intervenciones durante el período de la evaluación. Por ejemplo el grupo de tratamiento no puede estar expuesto a otros proyectos o programas que mejoren alguna situación en particular.

Si se cumplen estas tres condiciones, solo la existencia del proyecto o programa de interés explicará cualquier diferencia en el resultado de los grupos. Con este antecedente queda claro entonces que un grupo de comparación no válido difiere del grupo de tratamiento de alguna manera distinta a la ausencia del tratamiento. Estas diferencias adicionales pueden hacer que una estimación del impacto sea inválida o, en términos estadísticos sesgada (errónea), no permitiendo estimar el verdadero impacto del programa.

## **Estimaciones falsas del contrafactual**

Antes de describir los métodos de evaluación de impacto que permitirán encontrar el contrafactual, es importante mencionar dos métodos habituales y muy arriesgados, para definir grupos de comparación, que pueden generar estimaciones inadecuadas de dicho contrafactual.

Estas dos estimaciones “falsas” de los contrafactuales son: 1) comparaciones antes-después, que comparan los resultados de los mismos participantes del programa antes y después de la

introducción de un proyecto o programa, y 2) comparaciones con tratamiento-sin tratamiento entre unidades que deciden inscribirse y unidades que no deciden inscribirse a un proyecto o programa.

En el primer caso se supone esencialmente que si el programa nunca hubiera existido, el resultado para los participantes del proyecto o programa (grupo de tratamiento) habría sido equivalente a su situación previa a dicho proyecto o programa. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos este supuesto no puede sostenerse. Aunque las comparaciones antes-después pueden no ser válidas para la evaluación de impacto, esto no significa que no sean valiosas para otros fines.

En el segundo caso es posible que existan factores externos que no se han considerado para el grupo elegido, lo que puede hacer pensar erróneamente que la realización del proyecto o programa produjo alguna mejora en el grupo, no pudiéndose calcular el verdadero impacto del proyecto o programa mediante una comparación con tratamiento-sin tratamiento.

Después de analizar dos métodos que, pese a ser empleados frecuentemente para estimar contrafactuales, adolecen de un alto sesgo potencial (las comparaciones antes-después y con tratamiento-sin tratamiento), a continuación se verán otros métodos que permiten estimar con mucha mayor precisión el impacto de los programas.

### **B.2.1. Selección aleatoria**

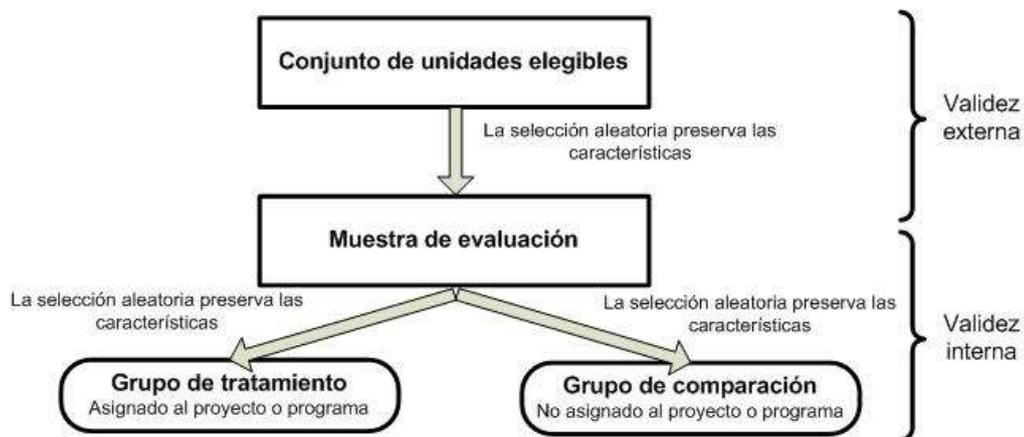
Es importante partir de la premisa de que todos los proyectos o programas deben tener reglas justas y transparentes para su asignación. Es así que en este apartado se examinarán varios métodos de evaluación de impacto de selección aleatoria comparables a un sorteo (regla más justa y transparente para asignar recursos o hacer partícipes a determinado grupo de un programa o proyecto) para decidir quién participa en un proyecto o programa. Estos métodos de selección aleatoria no solo ofrecen a los administradores del proyecto o programa una regla justa y transparente para asignar por ejemplo recursos entre poblaciones con igual derecho a ellos, sino que son también los métodos más sólidos para evaluar el impacto del mismo.

#### **¿Cuándo se puede usar la asignación aleatoria?**

En la práctica, se debe considerar la asignación aleatoria siempre que el número de posibles participantes sea superior al número de plazas disponibles y cuando sea necesario implementar progresivamente el proyecto o programa (ampliar un proyecto o programa gradualmente). En algunas circunstancias también es necesaria la asignación aleatoria como un instrumento de evaluación, aunque los recursos del programa no estén limitados.

## Asignación aleatoria de beneficiarios

Cuando se asigna aleatoriamente a los beneficiarios de un proyecto o programa entre una población elegible numerosa, se puede hacer una estimación robusta del contrafactual, lo que se considera la regla de oro de la evaluación de impacto. La figura 5.2 representa la asignación aleatoria, en donde de todas las unidades elegibles se toma una muestra de selección aleatoria que preserve las características del conjunto de unidades elegibles (población).



**Figura 5.2:** Diagrama de selección aleatoria. Adaptado de [39]

Cuando en una evaluación se emplea la asignación aleatoria se generan grupos de tratamiento y de comparación equivalentes. Por lo tanto, si después de poner en marcha un proyecto o programa se observan diferencias en los resultados entre los grupos de tratamiento y de comparación, se sabrá que solo pueden deberse a la introducción de dicho programa o programa, ya que la selección de los dos grupos fue idéntica y ambos están expuestos a los mismos factores externos.

Los pasos descritos anteriormente para la asignación aleatoria del tratamiento aseguran tanto la validez interna como externa de la evaluación de impacto, siempre que la muestra de la evaluación sea suficientemente grande. En este sentido se tiene que:

**Validez externa** significa que el impacto estimado en la muestra de evaluación puede generalizarse al conjunto de todas las unidades elegibles. Para que esto sea posible, la muestra de evaluación debe ser representativa del conjunto de unidades elegibles, es decir que la muestra de evaluación debe seleccionarse de entre la población mediante asignación aleatoria.

**Validez interna** significa que el impacto estimado del programa está libre de todos los otros factores que pueden afectar el resultado de interés, o que el grupo de comparación representa el verdadero contrafactual, por lo que se estima el verdadero impacto del proyecto o programa.

Es importante mencionar que se han definidos dos tipos diferentes de selección aleatoria: una para fines de muestreo (validez externa) y otra como método de evaluación de impacto

(validez interna). Una evaluación de impacto puede producir estimaciones internamente válidas mediante la asignación aleatoria del tratamiento; sin embargo, si se realiza una evaluación a partir de una muestra no aleatoria de la población, el impacto estimado puede no ser generalizable al conjunto de unidades elegibles. Inversamente, si en la evaluación se emplea una muestra aleatoria del conjunto de unidades elegibles, pero el tratamiento no es asignado de manera aleatoria, la muestra será representativa pero el grupo de comparación puede no ser válido.

### **Metodología de la selección aleatoria**

1. El primer paso de la asignación aleatoria consiste en definir las unidades elegibles (población). Según el proyecto o programa, una unidad puede ser una persona, un centro de salud, una escuela o incluso todo un pueblo o municipalidad. El conjunto de unidades elegibles está formado por aquellas acerca de las cuales interesa conocer el impacto de un programa. Una vez determinadas las unidades elegibles se analiza si las mismas son pocas, puede ser que se necesite incluir todas las unidades para la evaluación, en caso contrario se deberá seleccionar una muestra.
2. Para seleccionar una muestra de evaluación (limita los costos de la recolección de datos), se debe seleccionar una muestra representativa de la población, a fin de recolectar los datos necesarios para realizar la evaluación de impacto.
3. Formar los grupos de tratamiento y comparación a partir de la muestra de evaluación, esto se conseguirá primero definiendo una regla (propuesta por el evaluador, por ejemplo con las cifras aleatorias más altas se conformará el grupo de tratamiento, mientras que las más bajas serán para conformar el grupo de comparación) para la asignación de la muestra basada en cifras aleatorias. Es decir se asignará un número aleatorio a cada unidad de la muestra de evaluación y se usa la regla elegida definida para formar los grupos.

### **Estimación del impacto con la asignación aleatoria**

Una vez que se han formado los grupos de tratamiento y evaluación de forma aleatoria, es bastante fácil estimar el impacto de la ejecución de un proyecto o programa que haya estado funcionando durante algún tiempo, mediante el análisis de los resultados obtenidos tanto para los grupos definidos. Así el impacto del programa es simplemente la diferencia entre el resultado promedio para el grupo de tratamiento y el resultado promedio para el grupo de comparación. Por ejemplo, si el resultado promedio para el grupo de tratamiento es 100, y el resultado promedio para el grupo de comparación es 80, el impacto del programa equivale a 20.

## **Variaciones de la asignación aleatoria**

A continuación se analizan dos variaciones de la asignación aleatoria: la oferta aleatoria y la promoción aleatoria o diseño de incentivos.

- **Oferta aleatoria**

Hace referencia cuando tanto los grupos de tratamiento y evaluación no cumplen adecuadamente su asignación. Es decir que algunas unidades del grupo de tratamiento no participan del proyecto o programa, mientras que algunas unidades del grupo de evaluación si lo hacen, aunque no estuvieran preseleccionadas para hacerlo. En otras palabras, se estima el impacto del proyecto o programa sobre las unidades que de hecho recibieron el tratamiento. Esta medida es la estimación del “tratamiento en tratados”.

- **Promoción aleatoria o diseño de incentivos**

A continuación se propone un método que puede aplicarse a la evaluación de proyectos o programas con elegibilidad universal o inscripción abierta, o en los que el administrador de un proyecto o programa no puede controlar quién participa y quién no. La promoción aleatoria o diseño de incentivos permite estimular a las personas para que participen en un proyecto o programa, esta puede consistir en una campaña informativa dirigida a quienes no se inscriben porque no conocen o no entienden el contenido del programa, u ofrecer incentivos para la inscripción, como pequeños regalos o premios, o que los participantes tengan acceso a transporte o asistencia, entre otras.

Se debe cumplir una serie de condiciones para que la promoción aleatoria permita una evaluación válida de impacto.

1. El grupo en el que se ha promovido el programa y el grupo en el que no se ha promovido tienen que ser comparables. Las características de ambos deben ser similares. Esto se logra mediante la asignación aleatoria de las actividades de divulgación o promoción entre las unidades de la muestra de evaluación.
2. La campaña de promoción debe aumentar la inscripción del grupo en que se ha realizado la promoción sustancialmente por encima de la del grupo sin promoción. Esto puede verificarse comprobando que las tasas de inscripción del primer grupo sean superiores a las del segundo.
3. Es importante que la promoción no afecte directamente a los resultados de interés, para que se pueda afirmar que los cambios en los resultados de interés se deben al proyecto o programa y no a la promoción.

La promoción aleatoria es un método similar a la oferta aleatoria. En lugar de seleccionar aleatoriamente las unidades a las que se ofrece el tratamiento, se seleccionan aleatoriamente las unidades entre las que se promueve el tratamiento. Así, el proyecto o programa se mantiene abierto a todas las unidades.

### **B.2.2. Regresión discontinua**

El diseño de regresión discontinua (DRD) es un método de evaluación del impacto que puede usarse para los programas con un índice continuo de elegibilidad y una puntuación límite claramente definida para determinar quién tiene derecho a participar y quién no. Para aplicar un diseño de regresión discontinua es necesario:

1. Un índice continuo de elegibilidad, es decir, una medida continua con la que se puede clasificar a la población de interés, como el índice de pobreza, la puntuación de un examen o la edad.
2. Una puntuación mínima claramente definida, es decir, un punto en el índice por debajo o por encima del cual se elige a la población beneficiaria. Por ejemplo, las personas mayores de 66 años se podrían clasificar como pensionistas, y los estudiantes con una puntuación superior a 89 sobre 100 podrían considerarse elegibles para una beca. Las puntuaciones límite en estos ejemplos son 67 y 90 respectivamente.

### **B.2.3. Diferencias en diferencias**

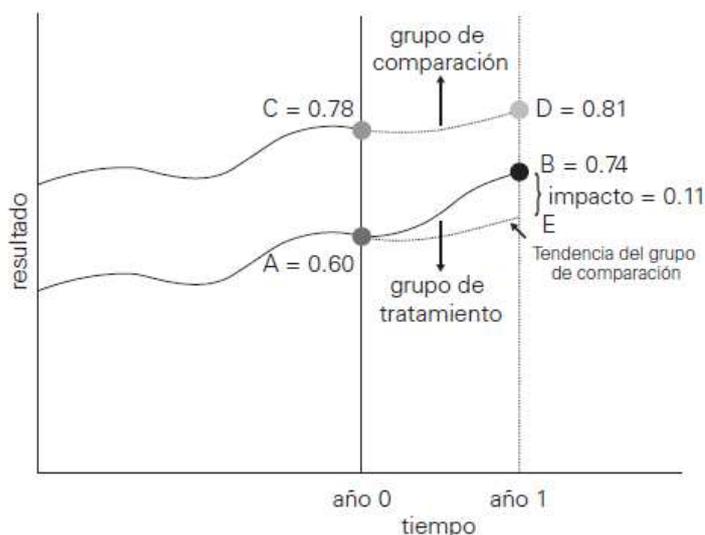
El método de diferencias consiste en aplicar una doble diferencia. Compara los cambios a lo largo del tiempo en la variable de interés entre una población inscrita en un proyecto o programa (grupo de tratamiento) y una población no inscrita (grupo de comparación). Para esto el método de diferencias en diferencias combina los dos falsos contrafactuales (comparaciones antes - después y comparaciones con tratamiento – sin tratamiento), con el objetivo de generar una mejor estimación del contrafactual, en este sentido este método compara los cambios antes –después de los resultados de un grupo inscrito en un proyecto o programa, con los cambios antes-después de un grupo no inscrito en el proyecto o programa.

La diferencia de los resultados antes-después del grupo inscrito (la primera diferencia) considera factores constantes en el tiempo para dicho grupo, ya que se compara al grupo con sí mismo. Sin embargo, todavía nos quedan los factores externos que varían con el tiempo. Una manera de observar estos factores variables en el tiempo es medir el cambio antes-después de los resultados del grupo que no se inscribió en el proyecto o programa, pero estuvo expuesto a las mismas condiciones ambientales (la segunda diferencia). Ahora si a la primera diferencia se le quita los factores externos que podrían afectar a la estimación del contrafactual, restándola de

la segunda diferencia, se habrá eliminado la principal causa de sesgo que se consideraba en las comparaciones simples antes-después.

En este método el contrafactual que se estima es el cambio producido en el grupo de tratamiento. Los grupos de tratamiento y de comparación no tienen que contar necesariamente con las mismas condiciones previas a la intervención. No obstante, para que el método de diferencias en diferencias sea válido, el grupo de comparación debe representar el cambio en los resultados que habría experimentado el grupo de tratamiento en ausencia del programa. Para aplicar diferencias en diferencias, solo hace falta medir los resultados del grupo que recibe el programa (el grupo de tratamiento) y del grupo que no lo recibe (el grupo de comparación) antes y después del proyecto o programa. Este método no requiere que se especifiquen las reglas para la asignación del tratamiento.

La Figura 5.3, ilustra el método de diferencias en diferencias, en donde un grupo de tratamiento está inscrito en un proyecto o programa, mientras que el grupo de comparación no lo está. Se considera además una línea temporal (año 0 hacia año 1) en donde se verifican los cambios en los grupos antes descritos desde A hacia B para el grupo de tratamiento y desde C hasta D para el grupo de comparación.



**Figura 5.3.** Método de diferencias en diferencias [39]

Las relaciones presentadas en la Figura 5.3, pueden representarse en un cuadro simple, en donde en la primera fila están los resultados del grupo de tratamiento antes (A) y después (B) de la intervención del programa o proyecto. La comparación antes-después del grupo de tratamiento es la primera diferencia (B-A). La segunda fila contiene los resultados del grupo de comparación, sin intervención del proyecto o programa para el año 0 (C) y para el año 1 (D), por lo que la segunda diferencia (estimación del contrafactual) es (D-C).

	Después	Antes	Diferencia
<b>Grupo de tratamiento (inscritos proyecto o programa)</b>	B 0,74	A 0,60	(B-A) 0,14
<b>Grupo de comparación (NO inscritos proyecto o programa)</b>	D 0,81	C 0,78	(D-C) 0,03
<b>DIFERENCIAS EN DIFERENCIAS</b>			(B-A) – (D-C) 0,14-0,03 = 0,11

**Tabla 5.5.** Método de diferencias en diferencias

Aunque diferencias en diferencias permite tener en cuenta las características constantes en el tiempo entre los grupos de tratamiento y de comparación, no ayuda a eliminar el sesgo producido por aquellas características que varían a lo largo del tiempo entre los grupos de tratamiento y de comparación, entendiéndose como características que varían en el tiempo a aquellas que podrían mejorar o no, la condición de los grupos de tratamiento o comparación.

Por lo anteriormente dicho, para que el método de diferencias en diferencias genere una estimación válida del contrafactual, se debe suponer la inexistencia de estas diferencias que podrían aparecer a lo largo del tiempo entre los grupos antes mencionados. Es decir, se debe suponer que en ausencia del programa, las diferencias en los resultados entre los grupos de tratamiento y de comparación tendrían que evolucionar paralelamente, es decir que los resultados aumentarían o disminuirían al mismo ritmo en ambos grupos.

#### **B.2.4. Pareamiento**

Es una técnica estadísticas también llamada emparejamiento o matching. Los métodos de emparejamiento se pueden aplicar a casi todas las reglas de asignación de un proyecto o programa, siempre que se cuente con un grupo que no haya participado en dicho proyecto o programa. Los métodos de emparejamiento se basan en características observadas para construir un grupo de comparación y, por lo tanto, suponen que no hay diferencias NO observadas entre los grupos de tratamiento y de comparación que estén asociadas también con los resultados de interés. Debido a esta suposición, los métodos de emparejamiento son normalmente más útiles en combinación con alguna de las metodologías mencionadas anteriormente.

El emparejamiento usa grandes series de datos y técnicas estadísticas complejas para construir el mejor grupo artificial de comparación posible para el grupo de tratamiento, para lo cual cada unidad que recibe tratamiento, se identifica con una unidad (o una serie de unidades) sin tratamiento, la(s) cual(es) debe(n) tener características lo más similares posibles a las que recibió el tratamiento, sin embargo en la práctica en la práctica esto es complicado debido a que puede ser que las características que se consideren en el grupo de tratamiento para encontrar el grupo de comparación sean muy pocas, por lo que se podría dejar de lado características importantes que relacionan a los dos grupos, o en su defecto se podría elegir demasiadas

características, con lo cual no se podría encontrar individuos en el grupo de comparación lo más parecido posibles al grupo de tratamiento.

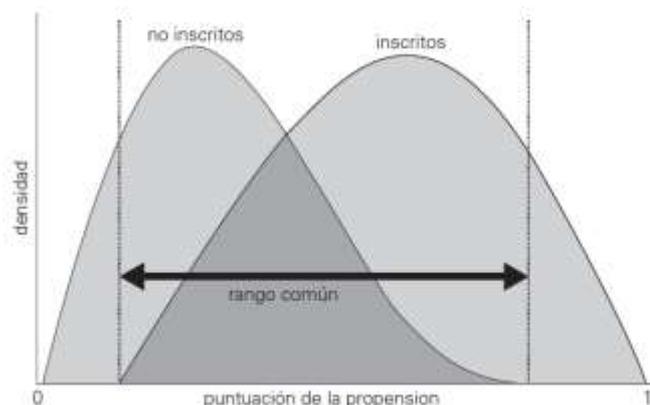
Para resolver el problema anteriormente expuesto, existe un método conocido como pareamiento de las propensiones a participar (propensity score matching), en donde ya no se necesita parear cada unidad inscrita con una unidad no inscrita con un valor idéntico en todas las características de control observadas. En este método, para cada unidad del grupo de tratamiento y del grupo de comparación, se calcula la propensión (probabilidad) de su participación en el programa mediante los valores observados de sus características, a lo que se le conoce como “puntuación de la propensión”. Esta puntuación es un número real entre 0 y 1 que resume todas las características observadas de las unidades y su influencia en la probabilidad de inscripción en el proyecto o programa.

Una vez que se calcula la puntuación de la propensión de todas las unidades, las unidades del grupo de tratamiento pueden emparejarse con las unidades del conjunto de no inscritos mediante la puntuación más próxima. Estas unidades próximas se convierten en el grupo de comparación y se usan para estimar el contrafactual. El método de pareamiento mediante la puntuación de la propensión a participar intenta reproducir la asignación aleatoria de los grupos de tratamiento y de comparación mediante la selección de las unidades del grupo de comparación con una propensión similar a la de las unidades del grupo de tratamiento. Dado que el emparejamiento mediante la puntuación de la propensión a participar no es realmente un método de asignación aleatoria, sino que intenta imitarlo, pertenece a la categoría de los métodos cuasi experimentales. La diferencia de los resultados entre las unidades de tratamiento o inscritas y sus unidades de comparación correspondientes constituye el impacto estimado del programa.

Para que el emparejamiento de la puntuación produzca estimaciones que tengan validez externa, debe lograrse un emparejamiento de cada unidad de tratamiento o inscrita con una unidad no inscrita. Puede ocurrir que para algunas unidades inscritas no se pueda encontrar una unidad no inscrita que tenga puntuación similar. En términos técnicos, puede haber una falta de rango común, o falta de superposición, entre las puntuaciones de la propensión del grupo de inscritos (grupo tratamiento) y del conjunto de no inscritos.

En la Figura 5.4, se muestra un ejemplo de falta de rango o soporte común. En primer lugar, se estima la probabilidad de que cada unidad de la muestra se inscriba en el programa mediante las características observadas, o sea, se calcula la propensión a participar. La figura muestra la distribución de las propensiones a participar para los inscritos y los no inscritos por separado, en donde se nota claramente que estas distribuciones no se superponen perfectamente. En la zona media de la distribución, es relativamente fácil encontrar parejas porque inscritos y no inscritos

comparten características similares. Sin embargo, los inscritos con propensiones cercanas a 1 no pueden corresponderse con ningún no inscrito porque no existen no inscritos con este nivel de puntuación. Intuitivamente lo que ocurre es que las unidades que tienen alta probabilidad de inscribirse al programa son tan diferentes de las unidades no inscritas que no se puede encontrar una buena pareja para ellas. Por lo tanto, se observa una falta de rango común en los extremos, o colas, de la distribución de las puntuaciones. En [39], se resumen los pasos a seguir cuando se aplica la técnica de pareamiento.



**Figura 5.4.** Emparejamiento de las propensiones a participar y rango común [39]

En general, es importante recordar dos cuestiones esenciales acerca del emparejamiento. Primero, que debe hacerse usando características de la línea de base, y segundo, que es eficaz únicamente en la medida en que las características empleadas sean las adecuadas, por lo que es crucial contar con un gran número de características básicas.

### B.2.5. Combinación de métodos

A pesar de que todos los métodos de evaluación corren el riesgo de estar sesgados, a veces se puede reducir el riesgo mediante una combinación de métodos. Al combinar métodos, frecuentemente se aumenta la solidez de la estimación del contrafactual.

El **emparejamiento con diferencias en diferencias (emparejamiento con DD)** es un ejemplo de métodos combinados. Como se señaló anteriormente, la simple correspondencia en la distribución de la puntuación de la propensión no puede tener en cuenta las características no observadas que podrían explicar las razones por las que un grupo decide inscribirse en un programa y que también podrían afectar a los resultados. Por el contrario, el emparejamiento combinado con diferencias en diferencias puede tener en cuenta al menos cualquier característica no observada entre los dos grupos que se mantenga constante en el tiempo. Se aplica de la siguiente manera:

- Primero se realiza el emparejamiento a partir de las características básicas observadas.

- Segundo, se aplica el método de diferencias en diferencias para estimar un contrafactual para el cambio en los resultados en cada subgrupo de unidades emparejadas.
- Finalmente, se obtiene la media de estas diferencias dobles entre los subgrupos emparejados.

Otro ejemplo combinado es el conocido como **diferencias en diferencias con diseño de regresión discontinua (DD DRD)**. Se debe recordar que DRD simple supone que las unidades a ambos lados del umbral de elegibilidad son muy similares. En la medida en que se mantengan algunas diferencias entre las unidades a cada lado del umbral, la agregación de diferencias en diferencias permite tener en cuenta las diferencias en las características no observadas que no varían a lo largo del tiempo. Se puede implementar la DD DRD considerando la doble diferencia en los resultados para las unidades a ambos lados del umbral de elegibilidad.

### **Imperfección del cumplimiento y efecto derrame**

La imperfección del cumplimiento es la discrepancia entre la situación prevista del tratamiento y la situación real del tratamiento. Se ha analizado este concepto en el método de asignación aleatoria pero, en realidad, la imperfección del cumplimiento puede ser un problema de muchos métodos de evaluación de impacto. Antes de poder interpretar las estimaciones del impacto generadas con cualquier método, tiene que saber si se ha producido una imperfección del cumplimiento en el programa. Dicha imperfección puede producirse de diversas maneras:

- No todos los participantes previstos participan realmente en el programa. A veces, algunas unidades a las que se ofrece el programa deciden no participar.
- No se ofrece el programa a algunos participantes previstos debido a errores administrativos o de ejecución.
- Se ofrece el programa por error a algunas unidades del grupo de comparación, que se inscriben en él.
- Algunas unidades del grupo de comparación logran participar en el programa a pesar de que no se les ofrece. Esto se denomina a veces “contaminación” del grupo de comparación. Si la contaminación afecta a una gran parte del grupo de comparación, no se puede obtener estimaciones no sesgadas del contrafactual.
- El programa se asigna a partir de una puntuación continua de priorización, pero no se aplica estrictamente el umbral de elegibilidad.
- Se produce una migración selectiva en función de la situación del tratamiento. Por ejemplo, es posible usar el método de diferencias en diferencias para comparar los resultados de los

municipios tratados y no tratados, pero las personas pueden decidir trasladarse a otro municipio si no les gusta la situación del tratamiento en su municipio.

Además de las consideraciones enumeradas por las cuales se produce imperfección, es importante mencionar el efecto derrame, el mismo que se produce cuando el grupo de comparación se ve indirectamente afectado por alguna consideración empleada para el grupo de tratamiento. Por ejemplo si se ofrece agua potable a un municipio A (grupo de tratamiento), y no se brinda este servicio a un municipio B (grupo de comparación), puede que los habitantes del municipio B que viven en el área colindante con el municipio A, dispongan de agua potable, puesto que sus vecinos les han cedido dicho servicio.

### B.3. Definir la relación entre las reglas operativas y los métodos de evaluación de impacto

En la Tabla 5.6 se presentan qué grupos de comparación son posibles de acuerdo con las características del proyecto o programa, las reglas operativas y las tres preguntas fundamentales sobre financiación, focalización y calendarización, formuladas anteriormente. Las columnas se dividen en función de si el proyecto o programa cuenta o no con recursos suficientes para atender a todos los beneficiarios elegibles (financiación) y se subdividen entre programas focalizados o con cobertura universal (focalización). Las filas se dividen en programas implementados o expandidos en fases y programas de implementación inmediata (calendarización). En cada celda se mencionan los posibles métodos de evaluación de impacto para obtener grupos de comparación válidos. Cada celda se nombra primero según su fila (A, B) y luego según la columna (1-4).

CALENDARIZACIÓN	FINANCIACIÓN →	Esceso de demanda del programa (recursos limitados)	Sin exceso de demanda del programa (recursos suficientes)		
	FOCALIZACIÓN →	Índice continuo de focalización y umbral (1)	Sin índice continuo de focalización y umbral (2)	Índice continuo de focalización y umbral (3)	Sin índice continuo de focalización y umbral (4)
	Expansión en fases a lo largo del tiempo (A)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asignación aleatoria.</li> <li>Diseño de regresión discontinua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asignación aleatoria.</li> <li>Promoción aleatoria.</li> <li>Diferencias en diferencias con pareamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asignación aleatoria en fases.</li> <li>Diseño de regresión discontinua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asignación aleatoria en fases.</li> <li>Promoción aleatoria para participación temprana.</li> <li>Diferencias en diferencias con pareamiento.</li> </ul>

	<b>Implementación inmediata (B)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asignación aleatoria.</li> <li>• Diseño de regresión discontinua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asignación aleatoria.</li> <li>• Promoción aleatoria.</li> <li>• Diferencias en diferencias con pareamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño de regresión discontinua</li> </ul>	<p>Si la participación no es plena:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Promoción aleatoria.</li> <li>• Diferencias en diferencias con pareamiento.</li> </ul>
--	-------------------------------------	--	--	---	---

**Tabla 5.6.** Relación entre las reglas operativas y los métodos de evaluación de impacto [39]

#### **B.4. Determinar la escala mínima de intervención**

Además de lo comentado anteriormente, las reglas operativas también determinan la escala mínima de intervención. La escala de intervención es en la que se ejecuta un proyecto o programa. Por ejemplo, si se implementa un programa de salud a nivel de distrito, todas las comunidades del distrito recibirán el programa (en conjunto) o no lo recibirán. Algunos proyectos o programas se pueden implementar eficientemente a nivel de unidades o individuos, hogares o instituciones, mientras que otros deben ejecutarse a nivel de comunidad o distrito administrativo (niveles superiores). Implementar una intervención en uno de estos niveles superiores (por ejemplo, provincia o estado) puede ser problemático para la evaluación por tres razones principales:

1. El tamaño de la muestra de evaluación y el costo de la evaluación aumentan con la escala de la intervención.
2. Conforme aumenta la escala, es más difícil encontrar un número suficiente de unidades para incluirlas en la evaluación.
3. Hay más probabilidades de poner en riesgo la validez externa de la evaluación con unidades de intervención a gran escala.

La evaluación de intervenciones implementadas a niveles superiores requiere muestras más grandes y será más costosa que las intervenciones a nivel inferior. El nivel de intervención define la unidad de asignación de los grupos de tratamiento y de comparación, lo que incide en el tamaño de la muestra de evaluación y su costo. Las intervenciones implementadas a niveles superiores necesitan una muestra más grande para detectar el impacto del proyecto o programa.

Otra cuestión es que con altos niveles de agregación se dificulta conseguir grupos de tratamiento y de comparación comparables. La clave para generar grupos comparables es la cantidad de unidades que son asignadas a los grupos de tratamiento y control, y no el número total de personas u hogares en la muestra.

El tercer problema de las intervenciones a gran escala es que tienen más probabilidad de que las diferencias en los cambios a lo largo del tiempo comprometan la validez interna de la selección aleatoria, aunque las características de los grupos sean comparables en la línea de base.

Para evitar los problemas de implementar una intervención a un nivel geográfico o administrativo muy grande, los administradores de un proyecto o programa deben determinar la escala mínima de intervención en la que se puede implementar dicho proyecto o programa. Varios factores determinarán esto:

- Economías de escala y complejidad administrativa en la oferta del proyecto o programa.
- Capacidad administrativa de asignar beneficios a nivel individual o de hogares.
- Preocupación acerca de posibles conflictos civiles.
- Preocupación sobre la contaminación del grupo de comparación.

La escala mínima de intervención se define normalmente por las economías de escala y por la complejidad administrativa que supondría el proyecto o programa en determinada situación, por ejemplo un programa de seguro de salud puede requerir una oficina local para que los beneficiarios presenten reclamaciones y para pagar a los proveedores, por lo que podría ser ineficiente implementar el programa a nivel individual; será entonces más eficiente ejecutarlo a nivel comunitario. Sin embargo puede haber programas que sea mejor implementarlos a nivel individual o de hogares, con el objetivo de cuantificar más detalladamente los beneficios recibidos de un proyecto o programa.

Aunque en ocasiones sea mejor implementar un proyecto o programa a nivel comunitario que individual, podría generarse una preocupación por la existencia de posibles conflictos civiles que se generarían cuando los miembros del grupo de comparación observan cómo sus vecinos del grupo de tratamiento reciben los beneficios antes que ellos. Sin embargo, no se han aportado evidencias contundentes que apoyen dichas afirmaciones.

Finalmente, cuando un programa se implementa a un nivel muy desagregado la contaminación del grupo de comparación puede comprometer la validez interna de la evaluación. Por ejemplo, se evalúa el efecto del suministro de agua corriente sobre la salud de los hogares. Si se instala el suministro para un hogar, pero no en el barrio, es factible que el hogar tratado comparta el suministro con su vecino; por lo que el hogar vecino no sería una comparación válida, ya que se beneficiaría del efecto (llamado efecto de derrame).

Por lo tanto, los administradores de proyectos o programas necesitan determinar la escala mínima de una intervención que:

1. Permita contar con una muestra suficientemente grande para la evaluación;
2. Mitigue los riesgos para la validez interna, y
3. Sea compatible con el contexto operativo.

### **B.5. Confirmar que el diseño de la evaluación es ético**

Cuando se decide diseñar una evaluación de impacto, deben considerarse algunas cuestiones éticas importantes. Entre ellas destacan las reglas que se emplean para asignar los beneficios de un proyecto o programa y los métodos mediante los que se estudia a las personas. En [39] se enuncian algunos principios básicos para la protección de sujetos humanos de estudio entre los que se tiene que:

- La selección de sujetos sea equitativa.
- Se minimicen los riesgos para los sujetos.
- Los riesgos para los sujetos sean razonables en relación con los beneficios previstos.
- Se solicite el consentimiento informado de cada posible sujeto o su representante legal.
- Existan disposiciones adecuadas para proteger la privacidad de los sujetos y mantener la confidencialidad.
- Se incluyan salvaguardias adicionales para proteger a los sujetos más vulnerables, como los niños y las personas económicamente desfavorecidas.

### **B.6. Formar un equipo de evaluación**

Aunque cada evaluación es diferente, el equipo técnico de cualquier iniciativa que vaya a recolectar sus propios datos, cualitativos o cuantitativos, tendrá que contar casi siempre con los siguientes profesionales:

- **Un gestor de la evaluación.-** Responsable de definir los principales objetivos, las preguntas sobre políticas, los indicadores y las necesidades de información de la evaluación; también es responsable de seleccionar la metodología de evaluación, conformar el equipo de evaluación y redactar los términos de referencia para los componentes de la evaluación que se contratarán o subcontratarán.
- **Un experto en muestreo.-** para realizar los cálculos de potencia y muestreo. En el caso de las evaluaciones de impacto cuantitativas, debería poder llevar a cabo cálculos de la potencia para determinar el tamaño adecuado de la muestra en función de los indicadores

establecidos, seleccionar la muestra, comparar los resultados de la muestra real con los de la prevista, y ofrecer recomendaciones en el momento del análisis; también es el encargado de seleccionar los lugares y los grupos para la prueba piloto.

- **Una persona o un equipo responsable del diseño de instrumentos de recolección de datos, manuales y libros de códigos.-** Esta persona o equipo colabora con el gestor de la evaluación para garantizar que los instrumentos de recolección de datos generen la información necesaria para el análisis, y también participa en la prueba piloto de los cuestionarios.
- **Un equipo de campo.-** Incluye a un coordinador del trabajo de campo que puede supervisar toda la iniciativa de recolección de datos, desde la planificación de rutas para la recopilación de información hasta la formación y la programación de los equipos de campo, compuestos generalmente por supervisores y encuestadores.
- **Administradores de datos y digitadores.-** Diseñan los programas de digitación de datos, digitan los datos, controlan su calidad, ofrecen la documentación necesaria sobre los datos y producen los resultados básicos que pueden verificar los analistas de datos.
- **Analistas.-** Trabajan con los datos producidos y con el gestor de la evaluación para realizar el análisis necesario y redactar los informes de evaluación.

### **B.7. Definir el cronograma de la evaluación**

La evaluación de impacto debe adaptarse a la implementación del proyecto o programa, no condicionando al mismo. Las evaluaciones están sujetas a los plazos del programa, debiendo adaptarse a los posibles desfases en la implementación cuando los programas se demoran en la asignación de los beneficios o se retrasan a causa de factores externos. En general, aunque la evaluación debería incorporarse al proyecto desde el principio, los evaluadores deben estar dispuestos a ser flexibles y hacer modificaciones durante la implementación del proyecto. Además, se debe dar seguimiento a las intervenciones mediante un sistema de monitoreo, para que la evaluación se base en el avance real de la intervención.

### **B.8. Definir el presupuesto para la evaluación**

Los recursos necesarios para implementar una evaluación de impacto, dependerán de que tan rigurosa sea dicha evaluación, pero como regla general los gastos más comunes serán los relacionados con el equipo de evaluación, además de los costos de viaje y subsistencia, los materiales y equipos utilizados en la fase de recolección de datos, capacitaciones, entre otros. Se

necesitará presupuestar además recursos para la divulgación, con frecuencia en forma de talleres, informes y/o documentos académicos.

### **C. FASE 3: Elegir la muestra de una población dada**

#### **C.1. Decidir el tamaño de la muestra**

Es necesario contar con datos de buena calidad para evaluar el impacto de una intervención sobre los resultados de interés. La cadena de resultados analizada anteriormente ofrece una base para definir qué indicadores deben medirse y cuándo. Los primeros y principales datos necesarios son los indicadores de resultados vinculados a los objetivos directos del programa, sin embargo no son los únicos, pudiendo existir además datos sobre indicadores de resultados indirectos o no intencionados del programa, mismos que si son tomados en cuenta, indudablemente maximizarán el valor de la información generada por la evaluación de impacto. Además de los indicadores de resultado, también es útil considerar lo siguiente:

- **Datos administrativos sobre la oferta de la intervención.-** Se necesitan datos de monitoreo para saber cuándo empieza un programa y quién recibe beneficios, así como para obtener una medida de la “intensidad” de la intervención cuando no se la pueda ofrecer a todos los beneficiarios con el mismo contenido, calidad o duración.
- **Datos sobre factores exógenos que pueden afectar el resultado de interés.-** Sirven para considerar las influencias externas. Este aspecto es importante cuando se usan métodos que se basan en más suposiciones que los métodos aleatorios. Considerar estos factores también puede contribuir a aumentar la potencia estadística.
- **Datos sobre otras características.-** La inclusión de variables de control adicionales o el análisis de la heterogeneidad de los efectos del programa en función de ciertas características hace posible una estimación más precisa de los efectos de tratamiento.

Cabe destacar que al principio de un proyecto o programa casi siempre son necesarios algunos datos existentes para estimar los valores de referencia de los indicadores o efectuar cálculos de potencia, además que estos pueden disminuir considerablemente el costo de una evaluación de impacto, sin embargo es raro que sólo los datos existentes alcancen para realizar la evaluación de impacto, a menos que está sea una evaluación ex ante.

Las evaluaciones de impacto requieren datos exhaustivos que abarquen una muestra suficientemente grande que sea representativa de los grupos tanto de tratamiento como de comparación.

Con el fin de determinar si se pueden usar los datos existentes para cierta evaluación de impacto, se deben considerar las siguientes preguntas:

- **Tamaño.-** ¿Las series de datos son suficientemente grandes para detectar cambios en los indicadores de resultado con suficiente potencia?
- **Muestreo.-** ¿Se dispone de datos existentes tanto para el grupo de tratamiento como para el grupo de comparación? ¿Las muestras existentes se han extraído de un marco muestral que coincide con la población de interés? ¿Se extrajeron las unidades del marco muestral mediante un procedimiento de muestro probabilístico?
- **Alcance.-** ¿Los datos existentes contienen todos los indicadores necesarios para responder la pregunta de interés sobre políticas?
- **Frecuencia.-** ¿Los datos existentes se recolectan con suficiente frecuencia? ¿Se dispone de ellos para todas las unidades de la muestra a lo largo del tiempo?

Si los datos existentes no son suficientes para realizar la evaluación, es probable que se tenga que recurrir a datos de encuestas. Además de analizar si se pueden usar encuestas existentes, también se debe determinar si se planea alguna recopilación de datos a escala local o nacional. La mayoría de las evaluaciones de impacto requieren la recolección de datos de encuestas, que incluyen al menos una encuesta de línea de base y una encuesta de seguimiento. Los datos de encuestas pueden ser de varios tipos según el programa que se evalúe y la unidad de análisis.

### **Cálculos de potencia**

El primer paso para decidir si se usan los datos existentes o se recolectan nuevos consistirá en determinar el tamaño de muestra que se necesita. Si los datos existentes tienen un número suficiente de observaciones es posible que puedan usarse. De lo contrario, será necesario recolectar datos adicionales. A esto es lo que se le conoce como cálculos de potencia.

Los cálculos de potencia indican el tamaño mínimo de la muestra que se necesita para llevar a cabo una evaluación de impacto. Los cálculos de potencia pueden usarse para lo siguiente:

- Valorar si los datos existentes son suficientes para ejecutar una evaluación de impacto.
- Evitar recolectar demasiada información, lo que puede resultar muy costoso.
- Evitar recolectar pocos datos.

Los cálculos de potencia indican la muestra más pequeña (y el presupuesto mínimo) con la que es posible medir el impacto de un proyecto o programa, es decir, la menor muestra que

permitirá detectar diferencias significativas en los resultados entre los grupos de tratamiento y de comparación. Por lo tanto, estos cálculos son cruciales para determinar qué proyectos o programas tienen éxito.

La mayoría de las evaluaciones de impacto comprueban la hipótesis expresada en la pregunta: ¿Tiene impacto el programa? En otras palabras: ¿El impacto del programa es diferente de cero? La respuesta a esta pregunta requiere dos pasos:

1. Estimar los resultados promedio para los grupos de tratamiento y de comparación.
2. Valorar si existe una diferencia entre el resultado promedio del grupo de tratamiento y el resultado promedio del grupo de comparación.

### **Dos posibles errores en las evaluaciones de impacto**

Cuando se comprueba si un programa tiene impacto, se puede incurrir en dos tipos de errores.

- **Error tipo I.-** si una evaluación concluye que un programa ha tenido impacto, cuando en realidad no lo ha tenido.
- **Error tipo II.-** consiste en lo contrario, es decir si una evaluación concluye que un programa no ha tenido impacto, cuando en realidad sí lo ha tenido.

Para minimizar la probabilidad de errores de tipo I, puede usarse un parámetro conocido como nivel de confianza, que generalmente se fija en el 5%, lo que significa que se puede tener una confianza del 95% de que el proyecto o programa ha tenido impacto. Sin embargo si se desean datos más concretos de que el proyecto o programa tuvo impacto, se puede fijar dicho nivel de confianza en un 1%.

Para evitar errores de tipo II, el tamaño de la muestra es esencial, debiendo ser el adecuado. Es así que en muestras grandes, la diferencia de la media entre la muestra tratada y la muestra de comparación constituye una mejor estimación de la verdadera diferencia de la media entre todas las unidades tratadas y de comparación.

Bajo este contexto la definición de potencia (potencia estadística) sería, la probabilidad de detectar un impacto cuando se haya producido. Una evaluación de impacto tiene una potencia elevada si existe poco riesgo de que no se detecten los impactos reales del programa, es decir, de cometer un error del tipo II.

El propósito de los cálculos de potencia es determinar el tamaño necesario de una muestra para evitar incurrir en un error de tipo II. Una evaluación de impacto tiene mucha potencia cuando es improbable que se cometa un error de tipo II, es decir que es improbable verse

decepcionado por resultados que indican que un programa no ha tenido impacto cuando en realidad sí lo ha tenido.

### **Principios básicos de los cálculos de potencia**

Para efectuar cálculos de potencia hay que examinar las siguientes seis cuestiones:

1. ¿El programa genera conglomerados?
2. ¿Cuál es el indicador de resultado?
3. ¿El objetivo es comparar los impactos del programa entre subgrupos?
4. ¿Cuál es el nivel mínimo de impacto que justificaría la inversión que se ha efectuado en la intervención?
5. ¿Cuál es el nivel de potencia razonable para realizar la evaluación?
6. ¿Cuál es la media y la varianza de los indicadores de resultado en la línea de base?

En el primer paso se identifica si una intervención tiene un nivel diferente del nivel en el que se querrían medir los resultados, esta intervención genera conglomerados. Por ejemplo puede ser necesario implementar un programa a nivel de hospitales, escuelas o comunidades (conglomerados), pero el impacto se mide sobre pacientes, estudiantes o residentes locales

En el segundo paso, se deben identificar los indicadores de resultado más importantes que el programa tiene previsto mejorar, ayudando a entender además el tipo de indicadores que son más adecuados para las evaluaciones de impacto.

El tercer punto se centra en las políticas de la evaluación, mismas que pueden conllevar la comparación de los impactos del proyecto o programa entre subgrupos, divididos por variables tales como la edad o los ingresos. Si este fuera el caso, se requerirá una muestra más grande, y los cálculos de potencia tendrán que ajustarse en consecuencia.

El cuarto paso determina el nivel mínimo de impacto que justificaría la inversión en un programa. Los cálculos de potencia permiten ajustar el tamaño de la muestra para detectar el efecto mínimo deseado. Para que una evaluación identifique un impacto moderado, será necesario que las estimaciones de cualquier diferencia en los resultados medios entre los grupos de tratamiento y de comparación sean muy precisas, lo que requiere una muestra grande. En cambio, para las intervenciones que solo se considera que valen la pena si generan grandes cambios en los indicadores del resultado, las muestras para evaluar impacto serán más pequeñas. No obstante, el efecto mínimo detectable debe fijarse de manera conservadora, ya que es poco probable que se detecte cualquier impacto inferior al efecto mínimo deseado.

Para el quinto paso, el evaluador necesita determinar el nivel de potencia razonable de la evaluación de impacto. La potencia de una prueba es equivalente a 1 menos la probabilidad de un error de tipo II, por lo tanto, la potencia va de 0 a 1, y cuanto más alto es el valor, menor es el riesgo existente de no identificar un impacto real.

En el sexto paso se determinará la media y la varianza de la línea base, de los indicadores de resultado, los mismos que deben obtenerse preferiblemente de los datos existentes recolectados en una situación similar a las condiciones en las que se implementará el programa bajo estudio.

Una vez completados los seis pasos, se puede efectuar un cálculo de potencia mediante programas estadísticos. El cálculo de la potencia resultante indicará el tamaño requerido de la muestra en función de los parámetros establecidos en los pasos 1 a 6. En la práctica, las dificultades de implementación suelen hacer que el tamaño real de la muestra sea inferior al tamaño previsto. Es necesario considerar detenidamente este tipo de desviaciones; se recomienda agregar un margen del 10% o del 20% al tamaño de la muestra definido por los cálculos de potencia para dar cuenta de estos factores [39].

### **C.1. Decidir la estrategia de muestreo**

El tamaño no es el único factor relevante para asegurar que una muestra es apropiada. El proceso mediante el que se la extrae de la población de interés también es crucial. Los principios de muestreo pueden guiar la extracción de muestras representativas. El muestreo requiere tres pasos:

1. Determinar la población de interés.
2. Identificar un marco muestral.
3. Extraer el número de unidades requeridas por los cálculos de potencia del marco muestral.

Primero, se debe definir claramente la población de interés. Esto requiere una definición precisa de la unidad de observación de la que se medirán los resultados, especificando claramente la cobertura geográfica o cualquier otro atributo pertinente que caracterice a la población.

Segundo, una vez establecida la población de interés, se debe establecer un marco muestral. El marco muestral es la lista que se puede obtener de unidades de la población de interés. Idealmente, debe coincidir exactamente con la población de interés. Se produce un sesgo de cobertura cuando el marco muestral no corresponde perfectamente con la población de interés. En la práctica, se suelen usar como marcos muestrales listas existentes como los censos de población, los censos de instalaciones o los listados de inscritos.

Tercero, cuando se considera extraer una nueva muestra o valorar la calidad de una muestra existente es importante determinar si el marco muestral disponible coincide con la población de interés, con el objetivo de disminuir el sesgo de cobertura. Los sesgos en la cobertura constituyen un riesgo real, y la elaboración de marcos muestrales es una labor delicada. Por ejemplo, los datos del censo pueden contener todas las unidades de una población. Sin embargo, si ha pasado mucho tiempo entre el momento del censo y la recolección de la muestra de datos, el marco muestral ya no estará totalmente al día y se creará un sesgo de cobertura.

Una vez que se haya identificado a la población de interés y un marco muestral, se debe elegir un método para extraer la muestra. Se pueden utilizar varios procedimientos de muestreo. Los métodos de muestreo probabilístico son los más rigurosos porque asignan una probabilidad de extracción bien definida a cada unidad del marco muestral. Los tres métodos principales de muestreo probabilístico son los siguientes:

- **Muestreo aleatorio.-** Cada unidad de la población tiene la misma probabilidad de ser extraída.
- **Muestreo aleatorio estratificado.-** La población se divide en grupos (por ejemplo, hombres y mujeres) y el muestreo aleatorio se realiza dentro de cada grupo. Como consecuencia, cada unidad dentro de cada grupo (o estrato) tiene la misma probabilidad de ser extraída. Siempre que cada grupo sea lo suficientemente grande, el muestreo aleatorio permite inferir resultados no solo a nivel de la población, sino también dentro de cada grupo. La estratificación es esencial para las evaluaciones destinadas a comparar los impactos del proyecto o programa entre subgrupos.
- **Muestreo de conglomerados.-** Las unidades se agrupan en conglomerados y se extrae una muestra aleatoria de estos, después de lo cual todas las unidades de los seleccionados constituyen la muestra, o se extrae aleatoriamente una serie de unidades dentro del conglomerado. Esto significa que cada conglomerado tiene una probabilidad bien definida de resultar seleccionado, y las unidades dentro de un conglomerado seleccionado también la tienen.

## **D. FASE 4: Recolectar datos**

### **D.1. Desarrollar el cuestionario**

Los instrumentos de recolección de datos deben permitir medir toda la información necesaria para responder a las preguntas formuladas por la evaluación de impacto. Para esto se deben medir los indicadores a lo largo de toda la cadena de resultados, entre ellos los

indicadores de resultado final, indicadores de resultados intermedios, medidas de la exposición a la intervención, factores exógenos y características de control.

Es importante ser selectivo acerca de qué indicadores se miden. Esto contribuye a limitar los costos de recolección de datos y mejora la calidad de los datos recolectados al minimizar la duración de las entrevistas. Recolectar datos que no sean pertinentes o que no se vayan a usar tiene un costo muy elevado.

Una vez que se han definido los indicadores esenciales que se deben recolectar, el siguiente paso será determinar cómo medir esos indicadores. Se deben medir de la misma manera todos los indicadores, tanto del grupo de tratamiento como del de comparación. Usar diferentes métodos de recolección de datos (por ejemplo, encuestas telefónicas para un grupo y entrevistas personales para otro) crea un riesgo de sesgos. Lo mismo ocurre con la recolección de datos en diferentes momentos para los dos grupos (por ejemplo, recolectar datos para el grupo de tratamiento durante la temporada de lluvias y para el grupo de comparación durante la temporada seca). Por esta razón, los procedimientos para medir cualquier indicador de resultado deben formularse con mucha precisión.

## **D.2. Hacer una prueba piloto de la técnica de recolección empleada**

Es muy importante efectuar pruebas piloto y de campo del cuestionario antes de darlo por finalizado. Las pruebas piloto servirán para comprobar el formato del cuestionario, así como la claridad del contenido y de la formulación de las preguntas. Las pruebas de campo del cuestionario completo en condiciones reales son fundamentales para comprobar su extensión y que su formato sea suficientemente congruente y exhaustivo para generar medidas precisas de la información pertinente.

## **D.3. Tabular e interpretar los resultados**

Se basa, como su nombre lo indica en la tabulación e interpretación de los resultados, de las técnicas de recolección de datos empleadas, en este caso, de la encuesta aplicada a los pobladores de las parroquias rurales de los cantones Riobamba y Guano de la provincia de Chimborazo en la República del Ecuador.

## **E. FASE 5: Producir y divulgar los resultados**

Para difundir los resultados, existen algunos instrumentos que son de utilidad, según el caso lo amerite, sin embargo el informe final de evaluación, resume los documentos detallados a continuación.

### **E.1. Plan de evaluación de impacto**

Durante la fase de preparación, el gestor de la evaluación prepara un plan de evaluación de impacto, que explica en detalle los objetivos, el diseño y las estrategias de muestreo y recolección de datos para la evaluación, a continuación se muestra una estructura recomendada para este documento.

- Introducción
- Descripción de la intervención
- Objetivos de la evaluación
  - Desarrollo de hipótesis, teoría del cambio, cadena de resultados
  - Preguntas sobre políticas
  - Principales indicadores de resultado
- Diseño de la evaluación
- Muestreo y datos
  - Estrategia de muestreo
  - Cálculos de potencia
- Plan de recolección de datos
  - Encuesta de línea base
  - Encuesta (s) de seguimiento
- Productos a generar
  - Informe de línea de base
  - Informe de la evaluación de impacto
  - Notas de política económica
  - Bases de datos totalmente documentadas
- Plan de divulgación

- Cuestiones éticas
- Cronograma
- Presupuesto y financiamiento
- Composición del equipo de evaluación

Los principales productos de una evaluación son un informe final de la evaluación de impacto y una serie de notas de política económica que resumen los resultados fundamentales. Pueden pasar varios años desde el comienzo de la evaluación hasta completar dicho informe, ya que las observaciones de la evaluación solo pueden producirse cuando se disponga de datos de seguimiento. Debido a este lapso, se suele solicitar productos de evaluación intermedios, como un informe de línea base, para contar con información preliminar que apoye la toma de decisiones a corto y mediano plazo.

## **E.2. Informe de línea base**

Los principales objetivos de un informe de línea base son determinar si el diseño de la evaluación de impacto elegido resulta válido en la práctica, y describir las características de línea base (previas a la implementación del proyecto o programa) y los indicadores de resultados de la población elegible. El informe de línea base también genera información acerca del proyecto o programa y sus beneficiarios. El informe de línea base se produce a partir del análisis de una base de datos limpia recolectada antes de comenzar el proyecto o programa, complementada con datos administrativos sobre la pertenencia de cada unidad al grupo de tratamiento o de comparación. La asignación de hogares, personas o instalaciones al grupo de tratamiento o control se realiza generalmente después de recopilar los datos de línea de base. A continuación se muestra la estructura recomendada de dicho informe.

- Introducción
- Descripción de la intervención (beneficios, reglas de elegibilidad, etc.)
- Objetivos de la evaluación
  - Hipótesis, teoría del cambio, cadena de resultados
  - Preguntas sobre políticas
  - Principales indicadores de resultado
- Diseño de la evaluación
  - Diseño original

- Unidades que participan y no participan en el programa
- Muestreo y datos
  - Estrategia de muestreo
  - Cálculos de potencia
  - Datos recolectados
- Validación del diseño de la evaluación
- Estadísticas descriptivas detalladas
- Conclusión y recomendaciones para la implementación

Las primeras secciones del informe de línea base se centran en el plan de evaluación de impacto para presentar los motivos de la evaluación, la descripción de la intervención (incluidos los beneficios del programa y sus reglas de asignación), los objetivos de la evaluación (incluida la teoría del cambio, las preguntas fundamentales sobre políticas públicas, las hipótesis y los indicadores de resultados del programa) y el diseño de la evaluación.

La sección sobre el diseño de la evaluación debe explicar si la asignación de los beneficios del programa se efectuó de manera compatible con el diseño previsto. Dado que la asignación se ejecuta normalmente después de haber terminado la encuesta de línea base, es recomendable incluir la información sobre la asignación real en el informe de línea de base.

La sección sobre muestreo empieza explicando la estrategia empleada y los cálculos de potencia producidos para el plan de evaluación, antes de pasar a describir en detalle cómo se recolectaron los datos de línea base y el tipo de información disponible.

### **E.3. Informe final de la evaluación de impacto**

Los principales objetivos del informe de evaluación final son presentar los resultados de la evaluación incluyendo descripciones detalladas del análisis de datos y las especificaciones econométricas. Como complemento, el informe también debe demostrar que la evaluación se basa en estimaciones válidas del contrafactual y que los impactos estimados pueden atribuirse completamente al proyecto o programa. A continuación se describe el contenido de un informe completo.

- Introducción
- Descripción de la intervención (beneficios, reglas de elegibilidad, etc.)
  - Diseño

- Implementación
- Objetivos de la evaluación
  - Desarrollo de hipótesis, teoría del cambio, cadena de resultados
  - Preguntas de políticas públicas
  - Principales indicadores de resultado
- Diseño de la evaluación
  - En la teoría
  - En la práctica
- Muestreo y datos
  - Estrategia de muestreo
  - Cálculos de potencia
  - Datos recolectados
- Validación del diseño de la evaluación
- Resultados
- Pruebas de robustez
- Conclusión y recomendaciones políticas

La parte introductoria del informe final debe exponer las razones para la intervención y la evaluación, y describir la intervención (beneficios y reglas de asignación de beneficios), los objetivos de la evaluación (incluidas la teoría del cambio, las preguntas fundamentales de políticas públicas, las hipótesis y los indicadores), el diseño original de la evaluación y la manera como se implementó en la práctica.

En la sección sobre muestreo y datos, se debe describir la estrategia de muestreo y los cálculos de potencia antes de pasar a analizar detenidamente los datos de línea base y de seguimiento recolectados.

Una vez que se han descrito los datos, el informe puede presentar los resultados para todos los indicadores de resultado y todas las preguntas sobre políticas públicas que se identificaron como objetivos de la evaluación. La organización de la sección sobre resultados dependerá de los tipos de preguntas sobre políticas públicas que se pretenda responder. Por ejemplo, ¿la evaluación compara la efectividad de distintas alternativas de programas o solo si una intervención funciona o no?.

Como se ha señalado, el informe de la evaluación de impacto debe ofrecer pruebas sólidas de que los impactos estimados son totalmente atribuibles al programa. Por lo tanto, el informe debe examinar detenidamente la validez del diseño de la evaluación. Para demostrar su validez, el primer paso consiste en presentar los resultados de las pruebas de control aplicadas a los datos de línea de base. Pero además debe contener también información acerca de cuántas unidades asignadas al grupo de tratamiento participaron efectivamente en el programa y cuántas unidades asignadas al grupo de comparación no participaron en él. Si se ha producido alguna desviación de la asignación original, se debe ajustar el análisis para que tenga en cuenta esta desviación. En paralelo con las comprobaciones de la validez del diseño de la evaluación, el informe final también sirve para analizar exhaustivamente los resultados, su fiabilidad y su robustez. Debe contener una serie de pruebas de robustez que se correspondan con la metodología de evaluación empleada.

Además del informe integral de evaluación, los evaluadores deben elaborar una o dos notas de política económica para contribuir a la comunicación de los resultados a los responsables de políticas y otros agentes. Una nota de política económica se concentra en la presentación de los resultados principales de la evaluación mediante gráficos, diagramas y otros formatos accesibles, y en el análisis de las recomendaciones para el diseño de políticas públicas. También contiene un breve resumen de los aspectos técnicos de la evaluación.

## **5.2. Evaluación de impacto de la posible implementación de DVB-RCT2**

Para este estudio de tesis doctoral se va a realizar una evaluación ex ante, para lo cual se seguirán las cinco fases detalladas previamente en el estado del arte. Como se comentaba anteriormente estas fases serán las que permitan establecer el efecto causal de la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA. A continuación se desarrollarán cada una de las fases propuestas. A modo de ejemplo se tomarán como referencia para las zonas rurales de Latinoamérica, a las zonas rurales de la provincia de Chimborazo, ubicada en la República del Ecuador.

## FASE 1: Preparar la evaluación

### 5.2.1. Identificar el problema de investigación a ser evaluado

El acceso a Internet en zonas rurales de América Latina es deficiente, puesto que la población rural o no tiene acceso a esta tecnología o lo hace desde lugares públicos a una muy baja velocidad de conexión.

### 5.2.2. Formular la pregunta de evaluación – Objetivo general de la investigación

¿Cuál es el impacto de la posible implementación de la segunda generación del estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico, DVB-RCT2, para proveer conectividad a Internet en zonas rurales en Latinoamérica ?.

#### Objetivo General.-

- Evaluar un nuevo estándar de TDT para brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales de Latinoamérica en donde sólo llega la señal de televisión.

#### Objetivos Específicos.-

- Reducir la brecha digital existente en zonas donde la conexión a Internet es deficiente.
- Permitir la utilización de aplicaciones TIC como aprendizaje, salud, gobierno en línea en zonas rurales, generando igualdad de oportunidades y fomentando la participación ciudadana.
- Reducir los costos de conexión a Internet en zonas rurales.

Matriz de validación de objetivos – Metodología SMART							
Objetivo	Verbo Infinitivo	Específico	Medible	Atribuible	Realista	Focalizado	Puntaje total
Evaluar un nuevo estándar de TDT para brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales de Latinoamérica en donde sólo llega la señal de televisión.	SI	5	5	5	4	5	24

**Tabla 5.7.** Matriz de validación del objetivo general de la posible implementación de la tecnología DVB-RCT2– Metodología SMART

Matriz de validación de objetivos – Metodología SMART							
Objetivo	Verbo Infinitivo	Específico	Medible	Atribuible	Realista	Focalizado	Puntaje total
Reducir la brecha digital existente en zonas donde la conexión a Internet es deficiente.	SI	5	5	5	5	5	25
Permitir la utilización de aplicaciones TIC como aprendizaje, salud, gobierno en línea en zonas rurales, generando igualdad de oportunidades y fomentando la participación ciudadana.	SI	5	4	5	5	5	24
Reducir los costos de conexión a Internet en zonas rurales.	SI	5	5	5	5	5	25

**Tabla 5.8.** Matriz de validación de los objetivos específicos de la posible implementación de la tecnología DVB-RCT2– Metodología SMART

**Niveles de ponderación de las tablas:** 1= Muy malo; 2 = Malo; 3 = Regular; 4 = Bueno; 5 = Muy bueno.

Una vez desarrollada la ponderación de los objetivos, se concluye que los mismos son idóneos para la realización de esta tesis doctoral, debido a que cumplen con los criterios de la metodología SMART. Mediante lo cual se garantiza que dichos objetivos permitan formular de forma adecuada los indicadores, mediante los cuales se podrá determinar el impacto positivo o negativo que generaría la posible implementación de la segunda generación del estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico, DVB-RCT2, para proveer conectividad a internet en zonas rurales en Latinoamérica.

### 5.2.3. Especificar la teoría del cambio – Identificación de las variables de la evaluación del impacto

Debido a que el acceso a Internet en zonas rurales de América Latina es deficiente y que la TV es más popular y accesible que el mismo Internet, la telefonía móvil, e incluso que la radio. Se pretende utilizar las características de los servicios de difusión de TV, específicamente los de

Televisión Digital Terrestre (TDT) a fin de proporcionar conectividad a Internet en lugares donde solo llega la señal de TV.

Bajo este contexto, una posible solución para lograr acceso universal a Internet en zonas rurales de Latinoamérica sería la utilización de un canal de retorno inalámbrico de TDT, para lo se reutilizaría la infraestructura de la TV analógica para ponerla al servicio de la TDT, aumentando de esta manera la penetración y disminuyendo los costos de implementación, puesto que llegaría a los hogares que tengan acceso al servicio de televisión.

Además, es importante mencionar que para utilizar la solución de TDT propuesta (DVB-RCT2), es necesario primero liberar el espectro radioeléctrico, mediante el proceso conocido como dividendos digitales, que corresponde en América (Región 1 de la UIT) a la banda de 700 MHz (canales 52 al 69 de TV).

### **Identificar las variables de la evaluación de impacto**

Para la evaluación de impacto de esta tesis doctoral se utilizarán variables cuantitativas, con el objetivo de medir si la posible implementación de la segunda generación del estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico, DVB-RCT2, proveerá de conectividad a Internet en zonas rurales en Latinoamérica.

**Variable 1:** Porcentaje de espectro radioeléctrico liberado (canales liberados) en la República del Ecuador.

**Variable 2:** Porcentaje de hogares con TV en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

**Variable 3:** Porcentaje de hogares con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

**Variable 4:** Porcentaje de personas que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

**Variable 5:** Porcentaje de centros escolares públicos con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

**Variable 6:** Porcentaje de estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

**Variable 7:** Porcentaje de personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

**Variable 8:** Porcentaje de disminución de costos de conexión a internet en zonas rurales.

## 5.2.4. Determinar la cadena de resultados

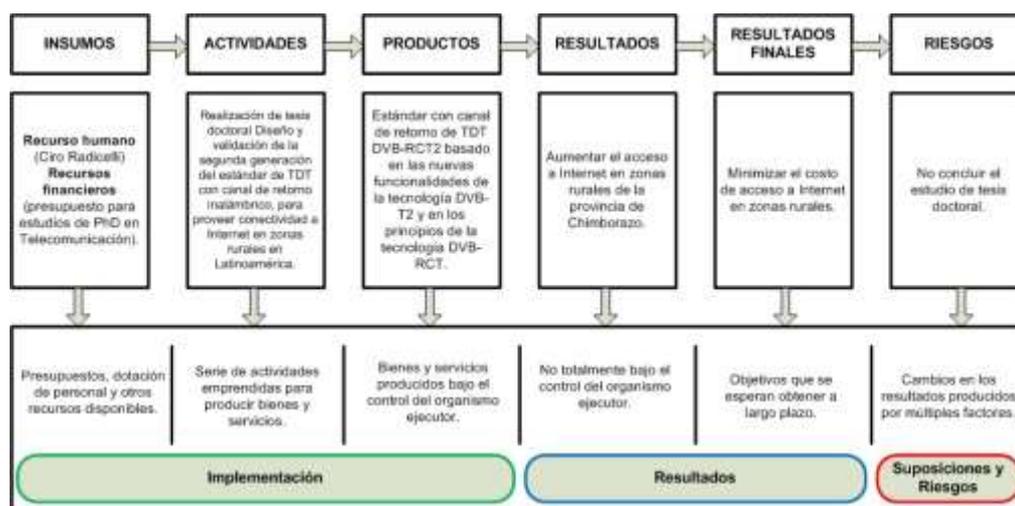


Figura 5.5. Cadena de resultados posible implantación de DVB-RCT2

## 5.2.5. Formular la hipótesis

El diseño de un nuevo estándar con canal de retorno de TDT DVB-RCT2 basado en las nuevas funcionalidades que presenta la tecnología de TDT de segunda generación DVB-T2, y basado en los principios de la tecnología con canal de retorno inalámbrico DVB-RCT, permitirá brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales donde sólo llega la señal de televisión.

## 5.2.6. Definir indicadores de evaluación de impacto

### A. Identificar el objetivo

#### Objetivo General.-

- Evaluar un nuevo estándar de TDT para brindar acceso a Internet en zonas rurales de Latinoamérica en donde sólo llega la señal de televisión.

#### Objetivos Específicos.-

- Reducir la brecha digital existente en zonas donde la conexión a Internet es deficiente.
- Permitir la utilización de aplicaciones TIC como aprendizaje, salud, gobierno en línea en zonas rurales, generando igualdad de oportunidades y fomentando la participación ciudadana.
- Reducir los costos de conexión a Internet en zonas rurales.

## **B. Definir la topología del indicador**

Para este estudio de tesis doctoral, el indicador tendrá una topología de efecto, debido a que se desea proyectar los cambios resultantes en el bienestar de la población de zonas rurales, luego de la posible implementación del estándar DVB-RCT2 para proveer de Internet a este tipo de zonas.

## **C. Identificar y redactar los posibles indicadores**

En este punto se describirán indicadores de efecto, los mismos que tendrán relación con el objetivo al cual van asociados, de esta manera se construirá el sistema de indicadores, mediante el cual se analizará el impacto de la posible implementación de la tecnología DVB-RCT2.

### **INDICADORES DEL OBJETIVO GENERAL**

EVALUAR UN NUEVO ESTÁNDAR DE TDT PARA BRINDAR ACCESO A INTERNET EN ZONAS RURALES DE LATINOAMÉRICA EN DONDE SÓLO LLEGA LA SEÑAL DE TELEVISIÓN.

#### **Indicador 1 – objetivo general**

- Acceso a Internet en zonas rurales de Latinoamérica en donde sólo llega la señal de televisión brindado.

#### **Indicador 2 – objetivo general**

- Estándar con canal de retorno de TDT DVB-RCT2 basado en las nuevas funcionalidades que presenta la tecnología de TDT de segunda generación DVB-T2 y en los principios de la tecnología con canal de retorno inalámbrico DVB-RCT diseñado.

#### **Indicador 3 – objetivo general**

- Porcentaje de espectro radioeléctrico liberado (canales liberados) en la República del Ecuador.

$$\frac{\text{Número de canales liberados}}{\text{Total de canales disponibles para emisiones de TDT}} \times 100$$

#### **Indicador 4 – objetivo general**

- Porcentaje de hogares con TV en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

$$\frac{\text{Número de hogares con TV en zonas rurales}}{\text{Total de hogares en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$$

## INDICADORES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 1

REDUCIR LA BRECHA DIGITAL EXISTENTE EN ZONAS DONDE LA CONEXIÓN A INTERNET ES DEFICIENTE.

### Indicador 1 – objetivo específico 1

- Porcentaje de hogares con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

$$\frac{\text{Número de hogares con acceso a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de hogares en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$$

### Indicador 2 – objetivo específico 1

- Porcentaje de personas que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

$$\frac{\text{Número de personas que acceden a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de personas que habitan en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$$

## INDICADORES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 2

PERMITIR LA UTILIZACIÓN DE APLICACIONES TIC COMO APRENDIZAJE, SALUD, GOBIERNO EN LÍNEA EN ZONAS RURALES, GENERANDO IGUALDAD DE OPORTUNIDADES Y FOMENTANDO LA PARTICIPACIÓN CIUDADANA.

### Indicador 1 – objetivo específico 2

- Porcentaje de centros educativos con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

$$\frac{\text{Número de centros educativos con acceso a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de centros educativos en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$$

### Indicador 2 – objetivo específico 2

- Porcentaje de estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

$$\frac{\text{Número de estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de estudiantes de los centros educativos en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$$

### Indicador 3 – objetivo específico 2

- Porcentaje de personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

$$\frac{\text{Número de personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales}}{\text{Total de personas que habitan en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$$

## INDICADORES DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 3

REDUCIR LOS COSTOS DE CONEXIÓN A INTERNET EN ZONAS RURALES.

### Indicador 1 – objetivo específico 3

- Porcentaje de disminución de costos de conexión a internet en zonas rurales.

$$\frac{\text{Costo de conexión a Internet usuario en zonas rurales}}{\text{Costo de conexión a Internet usuario en zonas urbanas}} \times 100$$

Cada uno de los indicadores redactados anteriormente, tendrán que ser validados técnicamente, con el objetivo de seleccionar los mejores indicadores.

### D. Seleccionar los indicadores

Como se explicó en el apartado 5.1, para asegurar que los indicadores propuestos se ajusten a la realidad y sean lo más idóneos, se utilizará la metodología CREMA. Es importante destacar que en la selección de indicadores se deben escoger los que brinden la información con mejor calidad y que sean fáciles de aplicar para obtener la información necesaria. Con respecto a la selección de los indicadores para este estudio de tesis doctoral; se utilizarán aquellos cuyo puntaje sea por lo menos muy bueno, es decir si el puntaje total es menor igual a 17 el indicador no será seleccionado.

CÓMO SELECCIONAR UN INDICADOR									
Tipología	Indicador	Calificación de criterios					Puntaje total	Seleccionado	
		C	R	E	M	A		Si	No
Efecto	Acceso a Internet en zonas rurales de Latinoamérica en donde sólo llega la señal de televisión brindado.	3	4	3	2	3	15		X
Efecto	Estándar con canal de retorno de TDT DVB-RCT2 basado en	4	2	3	3	3	15		X

	las nuevas funcionalidades que presenta la tecnología de TDT de segunda generación DVB-T2 y en los principios de la tecnología con canal de retorno inalámbrico DVB-RCT diseñado.								
Efecto	Porcentaje de espectro radioeléctrico (canales liberados) liberado en la República del Ecuador.	4	4	4	5	4	21	X	
Efecto	Porcentaje de hogares con TV en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	5	5	5	5	4	24	X	
Efecto	Porcentaje de hogares con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	5	5	5	5	4	24	X	
Efecto	Porcentaje de personas que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	5	5	5	5	5	25	X	
Efecto	Porcentaje de centros educativos con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	5	5	5	5	5	25	X	
Efecto	Porcentaje de estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	5	5	5	5	5	25	X	
Efecto	Porcentaje de personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales de la	5	5	5	5	5	25	X	

	provincia de Chimborazo.								
Efecto	Porcentaje de disminución de costos de conexión a internet en zonas rurales.	5	5	4	5	4	23	X	
<p><b>CALIFIQUE DE 1 A 5 CADA CRITERIO DE CADA INDICADOR</b></p> <p>C = ¿Es el indicador lo suficientemente preciso para garantizar una medición objetiva?</p> <p>R = ¿Es el indicador un reflejo lo más directo posible del objetivo?</p> <p>E = ¿Es el indicador capaz de emplear un medio práctico y asequible para la obtención de datos?</p> <p>M = ¿Están las variables del indicador suficientemente definidas para asegurar que lo que se mide hoy es lo mismo que se va a medir en cualquier tiempo posterior, sin importar quién haga la medición?</p> <p>A = ¿Es el indicador suficientemente representativo del total de los resultados deseados y su comportamiento puede ser observado periódicamente?</p>									

**Tabla 5.9.** Selección de indicadores utilizando metodología CREMA.

## E. Ficha metodológica del indicador

A continuación se va a registrar toda la información asociada al indicador en una ficha metodológica por cada indicador, con el objetivo de documentar el proceso de formulación del mismo.

Ficha metodológica del Indicador N.- 1		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de espectro radioeléctrico (canales liberados) liberado en la República del Ecuador.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Canales liberados para el uso de la TDT, con respecto al total de canales disponibles para emisiones de TDT en Ecuador.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Número de canales liberados}}{\text{Total de canales disponibles para emisiones de TDT}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
Porcentaje	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.10.** Hoja de vida del Indicador N.- 1

Ficha metodológica del Indicador N.- 2		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de hogares con TV en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Hogares que poseen TV en zonas rurales, con respecto al total de hogares en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Número de hogares con TV en zonas rurales}}{\text{Total de hogares en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
Porcentaje	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.11.** Hoja de vida del Indicador N.- 2

<b>Ficha metodológica del Indicador N.- 3</b>		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de hogares con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Hogares que poseen acceso a Internet en zonas rurales, con respecto al total de hogares en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Número de hogares con acceso a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de hogares en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
Porcentaje	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.12.** Hoja de vida del Indicador N.- 3

<b>Ficha metodológica del Indicador N.- 4</b>		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de personas que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Personas que acceden a Internet en zonas rurales, con respecto al total de personas que habitan en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Número de personas que acceden a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de personas que habitan en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
Porcentaje	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.13.** Hoja de vida del Indicador N.- 4

<b>Ficha metodológica del Indicador N.- 5</b>		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de centros educativos con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Centros educativos con acceso a Internet en zonas rurales, con respecto al total de centros educativos existentes en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Número de centros educativos con acceso a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de centros educativos en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
Porcentaje	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.14.** Hoja de vida del Indicador N.- 5

<b>Ficha metodológica del Indicador N.- 6</b>		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales, con respecto al total de estudiantes de los centros educativos existentes en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Número de estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales}}{\text{Total de estudiantes de los centros educativos en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
Porcentaje	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.15.** Hoja de vida del Indicador N.- 6

Ficha metodológica del Indicador N.- 7		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales, con respecto al total de personas que habitan en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Número de personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales}}{\text{Total de personas que habitan en zonas rurales de la provincia de Chimborazo}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
<b>Porcentaje</b>	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.16.** Hoja de vida del Indicador N.- 7

Ficha metodológica del Indicador N.- 8		
<b>Nombre del indicador</b>	Porcentaje de disminución de costos de conexión a internet en zonas rurales.	
<b>Descripción del Indicador</b>	Costo de conexión a Internet de un usuario en zonas rurales, con respecto al costo de conexión de un usuario en zonas urbanas de la provincia de Chimborazo.	
<b>Fórmula del Indicador</b>	$\frac{\text{Costo de conexión a Internet usuario en zonas rurales}}{\text{Costo de conexión a Internet usuario en zonas urbanas}} \times 100$	
<b>Unidad de medida</b>	<b>Tipología</b>	<b>Fecha de creación</b>
<b>Porcentaje</b>	Efecto	Marzo 2015

**Tabla 5.17.** Hoja de vida del Indicador N.- 8

## FASE 2: Hacer operativo el diseño de la evaluación

En este punto se elegirá el método de evaluación, el cual permitirá seleccionar los grupos de comparación que sean válidos para para realizar la evaluación de impacto, con lo cual se podrá estimar las relaciones causa-efecto de la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA.

### 5.3.1. Definir reglas operativas

Las reglas operativas que se utilizarán para la elección del grupo de comparación para la posible implementación de DVB-RCT2 en zonas rurales cumplirán con los criterios de equidad, transparencia y rendición de cuentas, y responden de manera clara a las preguntas de financiación (¿Contará el proyecto con suficientes recursos para llegar a escala y atender a todos los beneficiarios elegibles?), focalización (¿Quién es elegible para los beneficios del proyecto? ¿El proyecto está focalizado en función de un umbral de elegibilidad o está a disposición de

todos?), y calendarización (¿Cómo se incorporan durante el transcurso del proyecto los posibles beneficiarios: todos al mismo tiempo o por fases?). Dichas reglas se detallan a continuación.

DEFINIR REGLAS OPERATIVAS						
Regla	CUMPLIMIENTO DE CRITERIOS			RESPUESTA A PREGUNTAS		
	Equidad	Transparencia	Rendición de cuentas	Financiación	Focalización	Calendarización
Elegir personas que habitan en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	SI	SI	SI	Se contará con recursos limitados, debido a que inicialmente se plantea el proyecto como un estudio de tesis doctoral.	El proyecto está a disposición de todos los habitantes de zonas rurales de la provincia de Chimborazo.	Los posibles beneficiarios se incorporarían al proyecto en fases.
Seleccionar personas con similar nivel socioeconómico.						
Seleccionar personas de zonas rurales con acceso a TV analógica.						

**Tabla 5.18.** Reglas operativas para la elección del grupo de comparación.

### 5.3.2. Elegir método de evaluación de impacto

El método de evaluación de impacto permitirá basado en las reglas operativas, encontrar un grupo de comparación válido. De los métodos citados en el estado del arte, se utilizará para este estudio de tesis doctoral el método combinado de emparejamiento con diferencias en diferencias (emparejamiento con DD), debido a que este método considera que tanto el grupo de tratamiento como el de comparación son muy similares, lo que se logrará con el cumplimiento de las reglas operativas definidas anteriormente.

### 5.3.4. Definir la relación entre las reglas operativas y los métodos de evaluación de impacto

Según el método de evaluación de impacto y las reglas operativas definidas anteriormente, se puede concluir que la relación entre dichas reglas y el método de evaluación seleccionado se encuentra en la celda A2 de la Tabla 5.6, presentada en el apartado 5.1 de esta tesis doctoral.

### 5.3.5. Determinar la escala mínima de intervención

Tal como se detalla en el estado del arte de esta tesis doctoral, implementar un análisis de impacto a un nivel superior, por ejemplo provincia o estado, puede ser problemático para la evaluación debido a tres razones principales:

1. El tamaño de la muestra de evaluación y el costo de la evaluación aumentan con la escala de la intervención.
2. Conforme aumenta la escala, es más difícil encontrar un número suficiente de unidades para incluirlas en la evaluación.
3. Hay más probabilidades de poner en riesgo la validez externa de la evaluación con unidades de intervención a gran escala.

Por este motivo la escala mínima de intervención que se aplicará para la evaluación ex ante de la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA, se la realizará tomando como ejemplo las parroquias rurales de los cantones Riobamba y Guano. En donde las primeras serán el grupo de tratamiento y las segundas corresponderán al grupo de comparación, esto debido a que ambos grupos cumplen los siguientes tres aspectos:

1. Tanto las parroquias rurales del cantón Riobamba, como las del cantón Guano, pertenecen a la provincia de Chimborazo, por lo tanto presentan similar nivel socioeconómico, lo que permitirá conocer en promedio cuantos hogares disponen de TV analógica y de conexión a Internet.
2. Las parroquias rurales de los dos cantones antes mencionados reaccionarían de la misma manera al proyecto para proveer de conectividad a Internet en zonas rurales.
3. Ambos grupos, no están expuestos a otras intervenciones externas con respecto a la provisión de Internet, ni de forma local ni de forma gubernamental.

Con el cumplimiento de estas tres condiciones, se asegura que sólo la posible implementación del estándar DVB-RCT2 para proveer de Internet a zonas rurales en donde sólo llega la señal de TV, proveerá de alguna diferencia en el resultado (contrafactual) de los grupos antes mencionados.

### **5.3.6. Confirmar que el diseño de la evaluación es ético**

Para este estudio de tesis doctoral, se confirma que el diseño de la evaluación es ético debido a que cumple con los principios básicos enumerados para este punto en el estado del arte.

### 5.3.7. Formar un equipo de evaluación

Al tratarse de una evaluación ex ante, y por ser un estudio de tesis doctoral, en este caso el equipo de evaluación estará conformado únicamente por el doctorando, el mismo que será el encargado de:

- Definir los principales objetivos, las preguntas sobre la evaluación, los indicadores y las necesidades de información de la misma, además de seleccionar la metodología de evaluación.
- Realizar los cálculos de potencia y muestreo.
- Diseñar los instrumentos de recolección de datos.
- Tabular los datos obtenidos mediante los instrumentos de recolección, y
- Realizar el informe de evaluación.

### 5.3.8. Definir el cronograma de la evaluación

De acuerdo a la planificación temporal del plan de investigación aprobado en el Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, para el desarrollo de esta tesis doctoral, el estudio de impacto de la posible implementación de DVB-RCT2, se tendrá que realizar en un plazo de cinco meses, por lo tanto este será el plazo con el que se cuenta para realizar dicha evaluación, detallado de la siguiente manera:

FASES	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5
<b>FASE 1: Preparar la evaluación</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Identificar el/los problemas de investigación a ser evaluados.</li><li>• Formular la pregunta de evaluación – Objetivo central y específicos de la investigación.</li><li>• Especificar la teoría del cambio – Identificación de las variables de la evaluación del impacto.</li><li>• Determinar la cadena de resultados.</li><li>• Formular la hipótesis.</li><li>• Definir indicadores de evaluación de impacto.</li></ul>	X				
<b>FASE 2: Hacer operativo el diseño de la evaluación</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Definir reglas operativas.</li><li>• Elegir método de evaluación de impacto.</li><li>• Definir la relación entre las reglas operativas y los métodos de evaluación de impacto.</li><li>• Determinar la escala mínima de</li></ul>	X				

<b>intervención.</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Confirmar que el diseño de la evaluación es ético.</li> <li>• Formar un equipo de evaluación.</li> <li>• Definir el cronograma de la evaluación.</li> <li>• Definir el presupuesto para la evaluación.</li> </ul>					
<b>FASE 3: Elegir la muestra de una población dada</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Decidir el tamaño de la muestra</li> <li>• Decidir la estrategia de muestreo</li> </ul>		X			
<b>FASE 4: Recolectar datos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollar el cuestionario.</li> <li>• Hacer una prueba piloto de la técnica de recolección empleada</li> </ul>			X	X	
<b>FASE 5: Producir y divulgar los resultados</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan de evaluación de impacto.</li> <li>• Informe de línea base.</li> <li>• Informe final de la evaluación de impacto.</li> </ul>				X	X

**Tabla 5.18.** Cronograma de la evaluación de impacto de la posible implementación de DVB-RCT2

### 5.3.9. Definir el presupuesto para la evaluación

De igual manera que al formar un equipo de evaluación, se considerará que por ser un estudio de tesis doctoral, los gastos serán los mismos, que los que se incurren para la obtención del título de PhD, entre los cuales están colegiatura, manutención/movilización, asistencia a congresos, costos de publicación de material científico, material bibliográfico, entre otros.

## FASE 3: Elegir la muestra de una población dada

### 5.4.1. Decidir el tamaño de la muestra

Al tratarse de una evaluación ex ante, los datos existentes o datos de línea base deberían ser suficientes para realizar la evaluación de impacto, sin embargo dichos datos obtenidos del último censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el año 2010, son generales y no muestran de forma concreta los datos necesarios para realizar este estudio de tesis doctoral para las zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

Por tal motivo, es necesario para este estudio de tesis recolectar datos adicionales a los ya provistos por el INEC, por lo que hará falta realizar los cálculos de potencia, con el fin de

obtener el tamaño mínimo de la muestra que se necesita para llevar a cabo la evaluación de impacto del presente estudio doctoral.

#### 5.4.2. Decidir la estrategia de muestreo

Para definir la estrategia de muestreo, se debe en primer lugar determinar la población de interés, lo cual para este estudio de tesis doctoral se conoce con exactitud, puesto que dicha población será la perteneciente a las zonas rurales de las parroquias de Riobamba (grupo de tratamiento) y Guano (grupo de comparación) ubicadas en la provincia de Chimborazo. La Tabla 5.19, muestra este particular.

Cantón	Parroquias Rurales	Población (habitantes)
Riobamba	CACHA	3.160
	CALPI	6.469
	CUBIJIES	2.514
	FLORES	4.546
	LICAN	7.963
	LICTO	7.807
	PUNGALA	5.954
	PUNIN	5.976
	QUMIAG	5.257
	SAN JUAN	7.370
	SAN LUIS	12.002
<b>POB. RURAL TOTAL RIOBAMBA</b>		<b>69.018</b>
Guano	SAN ISIDRO DE PATULU	4.744
	ILAPO	1.662
	LA PROVIDENCIA	553
	SAN GERARDO DE PACAICAGUAN	2.439
	SAN ANDRES	13.481
	SAN JOSE DEL CHAZO	1.037
	SANTA FE DE GALAN	1.673
	VALPARAISO	404
	GUANANDO	341
<b>POB. RURAL TOTAL GUANO</b>		<b>26.334</b>
<b>POB. TOTAL RURAL PARROQUIAS RIOBAMBA Y GUANO</b>		<b>95.352</b>

**Tabla5.19.** Población rural de las parroquias de Riobamba y Guano.

En segundo lugar se define como marco muestral a todos los habitantes de las zonas rurales de las parroquias antes mencionadas, de donde se obtendrá la muestra mediante la aplicación de un método de muestreo, que en este caso será el muestreo aleatorio simple, debido a que cada unidad de la población tendrá la misma posibilidad de ser extraída. Además para este estudio de tesis doctoral se considerará un nivel de confianza del 95%. Con lo anteriormente mencionado se aplica la siguiente fórmula para calcular la muestra.

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{N \cdot E^2 + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

n es el tamaño de la muestra;

Z es el nivel de confianza (1,96 con un nivel de confianza del 95%);

p es la probabilidad de éxito (0,50);

q es la probabilidad de fracaso (0,50) → q = (1 - p);

N es el tamaño de la población (población rural parroquias de Riobamba y Guano);

E es la precisión o el error (0,05).

### Desarrollo cálculo de la muestra de parroquias rurales de Riobamba

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 0,50 \cdot 0,50 \cdot 69018}{69018 \cdot 0,05^2 + 1,96^2 \cdot 0,50 \cdot 0,50}$$

$$n = 382,02$$

De la aplicación de la fórmula se obtiene que la muestra idónea para la aplicación de las encuestas a los habitantes de las parroquias rurales del cantón Riobamba es de 382.

### Desarrollo cálculo de la muestra de parroquias rurales de Guano

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 0,50 \cdot 0,50 \cdot 26334}{26334 \cdot 0,05^2 + 1,96^2 \cdot 0,50 \cdot 0,50}$$

$$n = 378,61$$

De la aplicación de la fórmula se obtiene que la muestra idónea para la aplicación de las encuestas a los habitantes de las parroquias rurales del cantón Guano es de 379. Encuestas que serán aplicadas en proporción al número de habitantes de cada parroquia rural. En la Tabla 5.20, se visualiza dichas muestras.

Cantón	Parroquias Rurales	Población (habitantes)	Muestra (habitantes)
Riobamba	CACHA	3.160	17,49
	CALPI	6.469	35,81
	CUBIJIES	2.514	13,92
	FLORES	4.546	25,16
	LICAN	7.963	44,08
	LICTO	7.807	43,21
	PUNGALA	5.954	32,96
	PUNIN	5.976	33,08
	QUMIAG	5.257	29,09
	SAN JUAN	7.370	40,79
	SAN LUIS	12.002	66,43
<b>POB. RURAL TOTAL</b>		<b>69.018</b>	<b>382,02</b>

<b>RIOBAMBA</b>			
<b>Guano</b>	SAN ISIDRO DE PATULU	4.744	68,21
	ILAPO	1.662	23,89
	LA PROVIDENCIA	553	7,95
	SAN GERARDO DE PACAICAGUAN	2.439	35,07
	SAN ANDRES	13.481	193,82
	SAN JOSE DEL CHAZO	1.037	14,91
	SANTA FE DE GALAN	1.673	24,05
	VALPARAISO	404	5,81
	GUANANDO	341	4,90
	<b>POB. RURAL TOTAL GUANO</b>		<b>26.334</b>
<b>POB. TOTAL RURAL PARROQUIAS RIOBAMBA Y GUANO</b>		<b>95.352</b>	<b>760,63</b>

**Tabla 5.20.** Población rural y muestra seleccionada de las parroquias de Riobamba y Guano

#### **FASE 4: Recolectar datos**

##### **5.5.1. Desarrollar el cuestionario**

Luego de conocer las muestras por cada parroquia de cada cantón definido para realizar la evaluación ex ante de la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA, se puede concluir que la herramienta más útil para recabar la información necesaria será una encuesta, que será elaborada tomando en consideración los indicadores seleccionados anteriormente.

La encuesta será elaborada utilizando preguntas cerradas en donde el encuestado tendrá que responder SI o NO, a algunos de los diferentes planteamientos expuestos, o en su defecto elegir una de las opciones disponibles, con lo cual se minimizará el tiempo de recolección de datos, a la vez que la tabulación de los mismos se la podrá realizar de una manera rápida y eficaz. A continuación se presente el formato de la encuesta a ser aplicada.

**EVALUACIÓN DE IMPACTO SOBRE LA POSIBLE IMPLEMENTACIÓN DE UN ESTÁNDAR DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE (TDT) CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO PARA PROVEER DE INTERNET A ZONAS RURALES**

**Objetivo:**

- Determinar si el servicio de Internet está disponible en zonas rurales.

Edad: .....

Sexo: .....

**Cuestionario:**

1. ¿Estudia usted actualmente?

SI\_\_\_\_\_

NO\_\_\_\_\_

**SI LA RESPUESTA A LA PREGUNTA 1 FUE SI, POR FAVOR CONTESTE A LA SIGUIENTE INTERROGANTE.**

1.1. Cuál es su nivel de estudios?

Primaria.	
Secundaria.	
Universidad/pregrado (Licenciatura, Ingeniería).	
Universidad/postgrado (Maestría, PhD).	
¿Otro?, detalle.	
No sabe/ no contesta.	

2. ¿En su hogar posee Televisión?

SI\_\_\_\_\_

NO\_\_\_\_\_

3. ¿En su hogar posee de conexión a Internet?

SI\_\_\_\_\_

NO\_\_\_\_\_

**SI LA RESPUESTA A LA PREGUNTA 3 FUE NO, POR FAVOR CONTESTE A LA SIGUIENTE INTERROGANTE. ESCOJA UNA ÚNICA RESPUESTA, LA QUE LE PAREZCA MÁS ADECUADA.**

3.1. ¿Cuál es la razón de que en su hogar no tenga conexión a Internet?

Falta de cobertura	
Falta de recursos económicos	
No sabe cómo utilizar el servicio	
No lo necesita	
No le interesa /desconoce su utilidad	
No tiene dispositivo de conexión (Computador, Tablet, Smartphone)	
¿Otro?, detalle	

**SI LA RESPUESTA A LA PREGUNTA 3 FUE SI, POR FAVOR CONTESTE A LA SIGUIENTES INTERROGANTES. ESCOJA UNA ÚNICA RESPUESTA, LA QUE LE PAREZCA MÁS ADECUADA.**

3.2. ¿Qué tipo de acceso a Internet tiene en su hogar?

A través de línea telefónica, y mientras usa el Internet no puede hablar por teléfono (Dial Up).	
A través de línea telefónica, y mientras usa el Internet si puede hablar por teléfono (Línea telefónica	

dedicada)	
A través de una red de televisión por cable y puede ver la TV mientras usa el Internet (Cable Modem).	
A través de medios inalámbricos, como conexión satelital, redes telefónicas (3G), entre otras.	
¿Otro?, detalle.	
No sabe/ no contesta.	

3.3. ¿Cuánto paga mensualmente por el tipo de acceso a Internet que tiene en su hogar?

Entre 0 y 10 USD.	
Entre 10 y 20 USD.	
Entre 20 y 30 USD.	
Más de 30 USD.	
¿Otro?, detalle.	
No sabe/ no contesta.	

3.4. ¿Qué dispositivo utiliza para conectarse a Internet?

Computador de escritorio.	
Computador portátil.	
Tablet.	
Teléfono Celular (Smartphone).	
¿Otro?, detalle.	
No sabe/ no contesta.	

3.5. ¿Con qué fin utiliza Internet?

Estudios (deberes, cursos, etc)	
Entretenimiento (juegos, redes sociales, etc)	
Servicios en línea (páginas gubernamentales, SRI, IESS, banca, etc.)	
¿Otro?, detalle	
No sabe/ no contesta	

3.6. ¿Cuántas horas al día en promedio está conectado a Internet?

De 0 a 2 horas	
De 2 a 4 horas	
De 4 a 6 horas	
De 6 a 8 horas	
¿Otro?, detalle	
No sabe/ no contesta	

3.7. ¿Cómo catalogaría la velocidad de conexión a Internet que actualmente posee?

Muy lenta	
Lenta	
Medianamente lenta	
Rápida	
Veloz	
¿Otro?, detalle	
No sabe/ no contesta	

4. ¿Si Usted dispondría en su parroquia de una conexión a Internet inalámbrica de bajo costo, utilizaría con más frecuencia Internet?

SI \_\_\_\_\_

NO \_\_\_\_\_

**SI LA RESPUESTA A LA PREGUNTA 4 FUE NO, POR FAVOR CONTESTE A LA SIGUIENTE INTERROGANTE. ESCOJA UNA ÚNICA RESPUESTA, LA QUE LE PAREZCA MÁS ADECUADA.**

4.1. ¿Cuál es la razón por que NO utilizaría Internet?

Falta de recursos económicos	
No sabe cómo utilizar el servicio	
No lo necesita	
No le interesa /desconoce su utilidad	
No tiene dispositivo de conexión (Computador, Tablet, Smartphone)	
¿Otro?, detalle	

**SI LA RESPUESTA A LA PREGUNTA 4 FUE SI, POR FAVOR CONTESTE A LA SIGUIENTE INTERROGANTE. ESCOJA UNA ÚNICA RESPUESTA, LA QUE LE PAREZCA MÁS ADECUADA.**

4.2. ¿Cuál es la razón por la que SI utilizaría Internet?

Estudios (deberes, cursos, etc)	
Entretenimiento (juegos, redes sociales, etc)	
Servicios en línea (páginas gubernamentales, SRI, IESS, banca, etc.)	
¿Otro?, detalle	
No sabe/ no contesta	

**AGRADECEMOS SU COLABORACIÓN**

### **5.5.2. Hacer una prueba piloto de la técnica de recolección empleada**

Antes de la puesta en marcha de la encuesta, se realizó una prueba piloto para comprobar el formato del cuestionario, así como la claridad del contenido y de la formulación de las preguntas. Dicha prueba se la realizó en la parroquia San Luis del cantón Riobamba, tomando como submuestra el 10% de la muestra calculada para esta parroquia, es decir se efectuó la encuesta a 6 personas, con lo cual se pudo comprobar que el instrumento de recolección de información planteado cumplió el objetivo para el cual fue diseñado.

### **5.5.3. Tabular e interpretar los resultados**

A continuación se mostrarán los resultados por preguntas de la encuesta realizada a los habitantes de las parroquias rurales de los cantones Riobamba y Guano respectivamente.

#### 5.5.4. Respuestas habitantes parroquias rurales cantón Riobamba

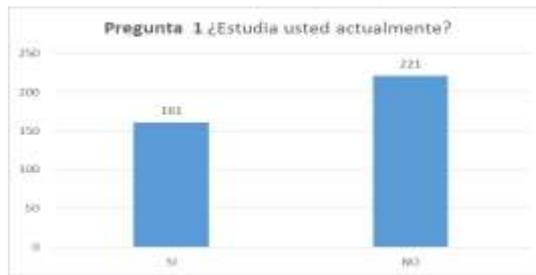


Figura 5.6. Resultados pregunta 1, cantón Riobamba.



Figura 5.7. Resultados pregunta 1.1, cantón Riobamba

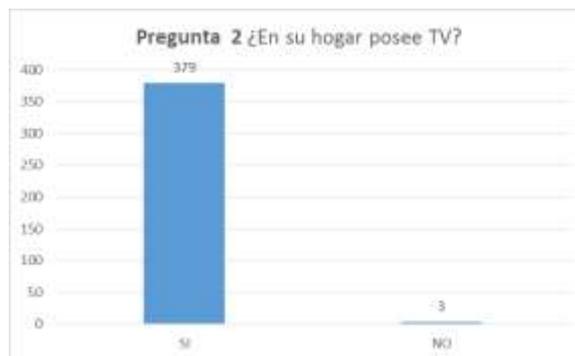
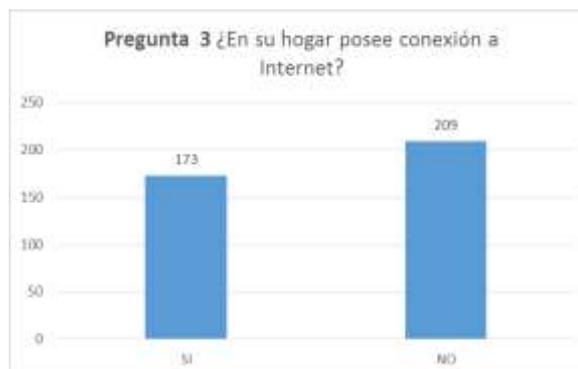
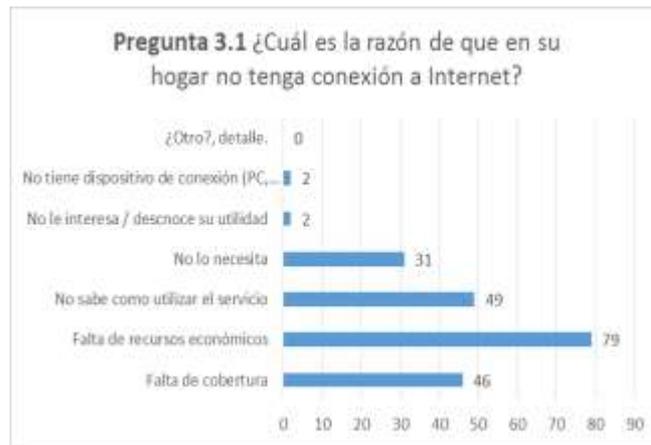


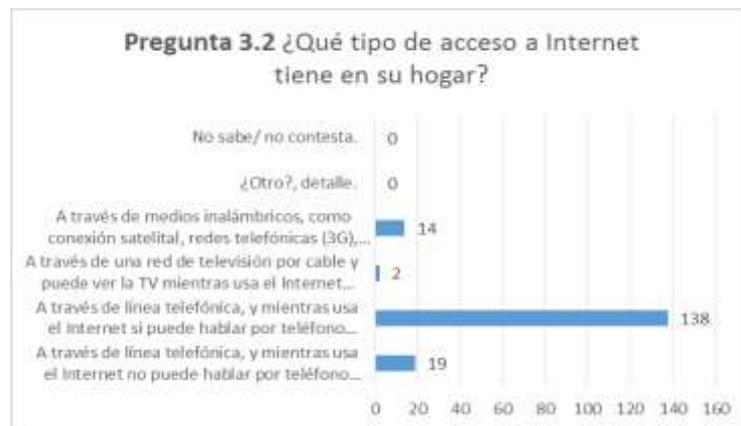
Figura 5.8. Resultados pregunta 2, cantón Riobamba



**Figura 5.9.** Resultados pregunta 3, cantón Riobamba



**Figura 5.10.** Resultados pregunta 3.1, cantón Riobamba



**Figura 5.11.** Resultados pregunta 3.2, cantón Riobamba



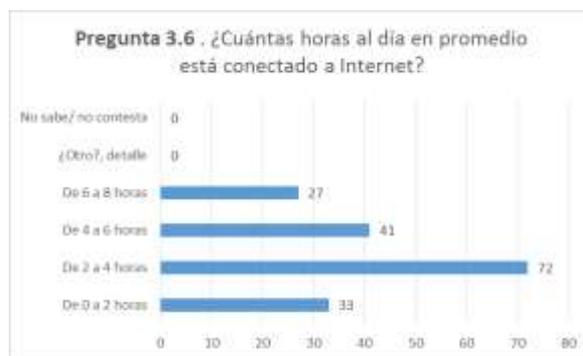
**Figura 5.12.** Resultados pregunta 3.3, cantón Riobamba.



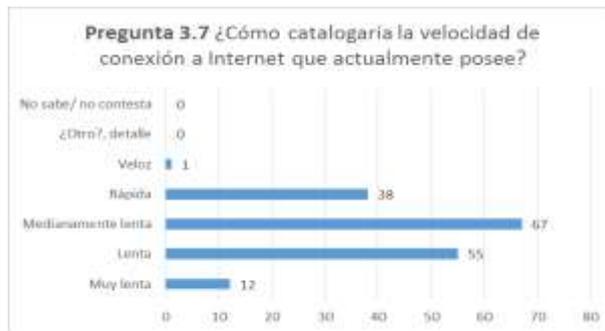
**Figura 5.13.** Resultados pregunta 3.4, cantón Riobamba



**Figura 5.14.** Resultados pregunta 3.5, cantón Riobamba



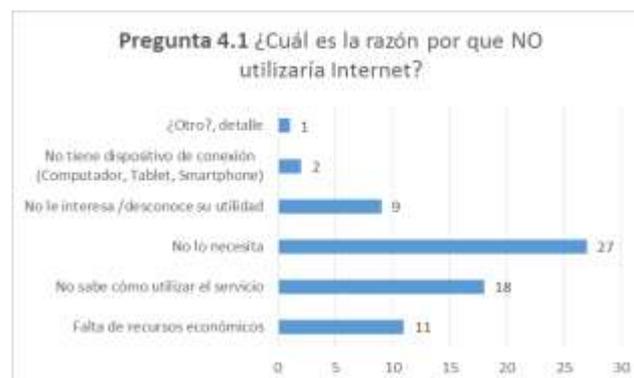
**Figura 5.15.** Resultados pregunta 3.6, cantón Riobamba



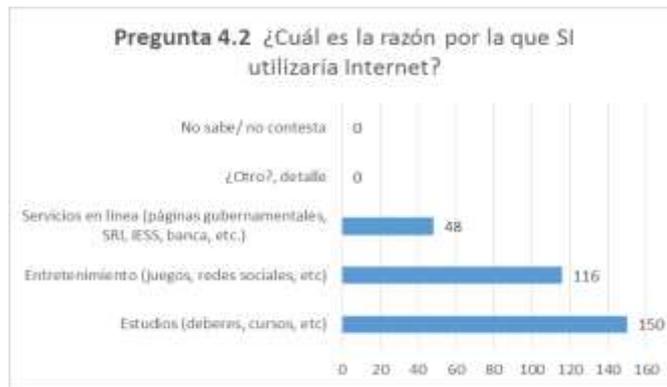
**Figura 5.16.** Resultados pregunta 3.7, cantón Riobamba



**Figura 5.17.** Resultados pregunta 4, cantón Riobamba



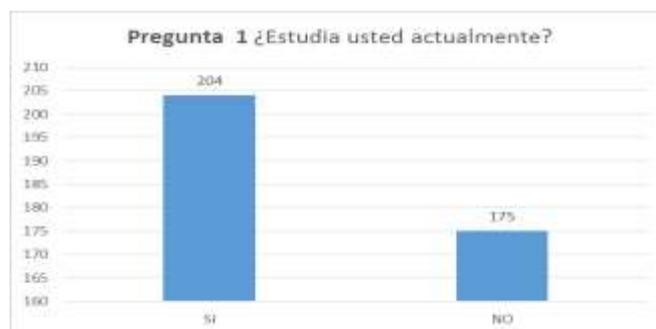
**Figura 5.18.** Resultados pregunta 4.1, cantón Riobamba



**Figura 5.19.** Resultados pregunta 4.2, cantón Riobamba

Interpretando los resultados obtenidos para los habitantes de las zonas rurales del cantón Riobamba, se puede concluir que aproximadamente el 58% de los encuestados estudian en su mayoría en el nivel secundario, además el 99% de los encuestados posee Televisión, pero cerca del 55% no posee conectividad a Internet, la mayoría por falta de recursos económicos, por su parte las personas que cuentan con el servicio de Internet, se conectan en su gran mayoría mediante línea telefónica dedicada (ADSL), pagando entre 20 y 30 USD mensuales, y utilizando en su mayoría una computadora de escritorio. Es importante mencionar que el uso que se le da a Internet es para la realización de trabajos, consultas deberes, aunque le sigue de cerca el entretenimiento (juegos, redes sociales, etc), además el tiempo de conexión utilizado por los pobladores de las parroquias rurales del cantón Riobamba está solamente 2 a 4 horas, con una velocidad de conexión medianamente lenta. Por otro lado cerca del 83% de la población de estas zonas está interesada en contar con una conexión a Internet de bajo costo y lo utilizaría para fines académicos, mientras que el 17% restante, cree que no necesita dicha conexión.

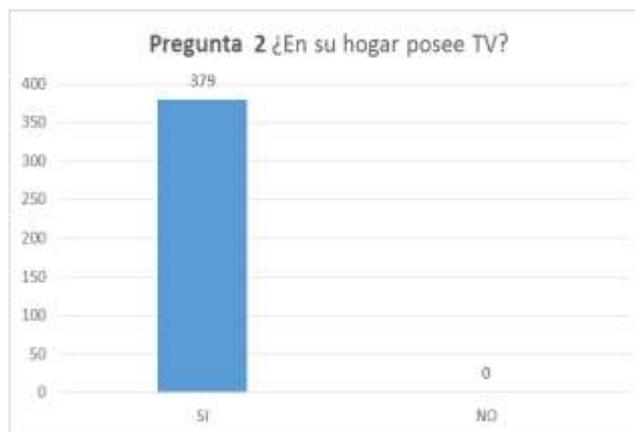
#### 5.5.5. Respuestas habitantes parroquias rurales cantón Guano



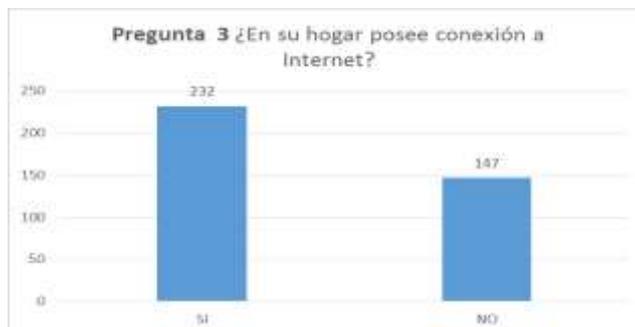
**Figura 5.20.** Resultados pregunta 1, cantón Guano.



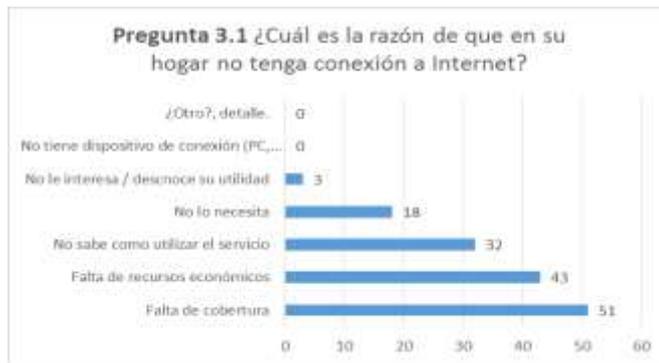
**Figura 5.21.** Resultados pregunta 1.1, cantón Guano



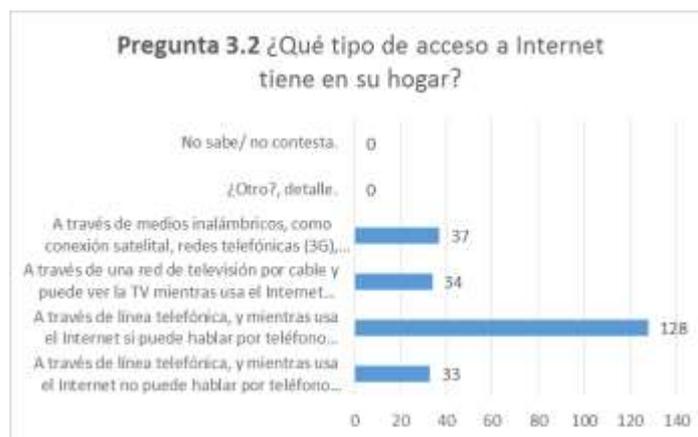
**Figura 5.22.** Resultados pregunta 2, cantón Guano



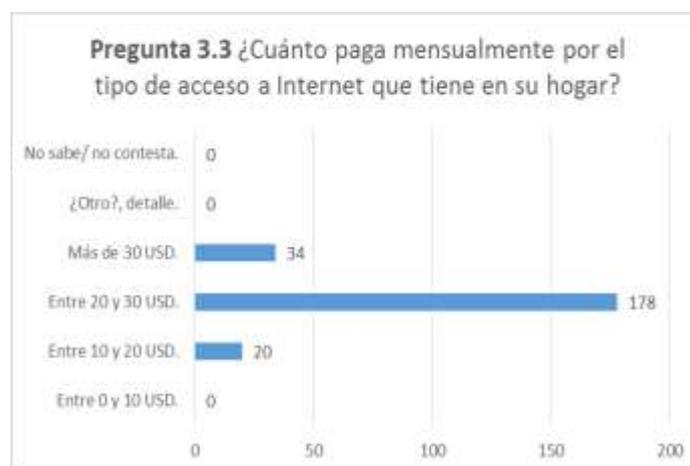
**Figura 5.23.** Resultados pregunta 3, cantón Guano



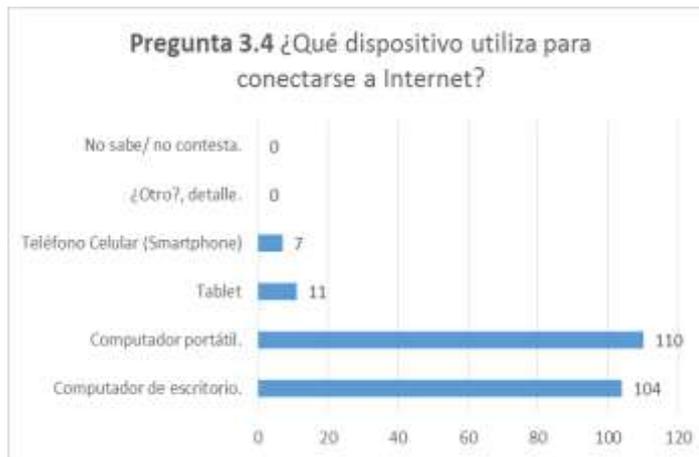
**Figura 5.24.** Resultados pregunta 3.1, cantón Guano



**Figura 5.25.** Resultados pregunta 3.2, cantón Guano



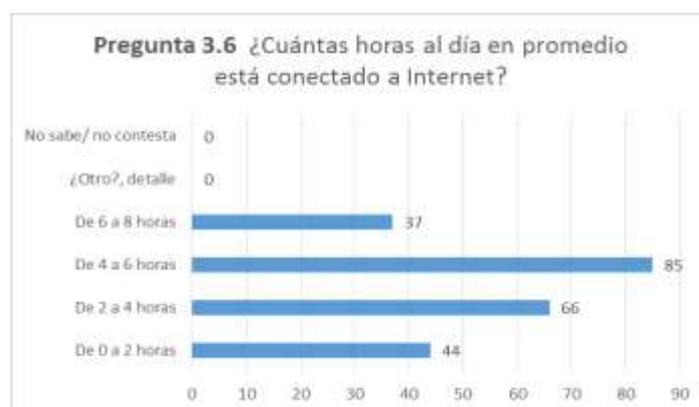
**Figura 5.26.** Resultados pregunta 3.3, cantón Guano



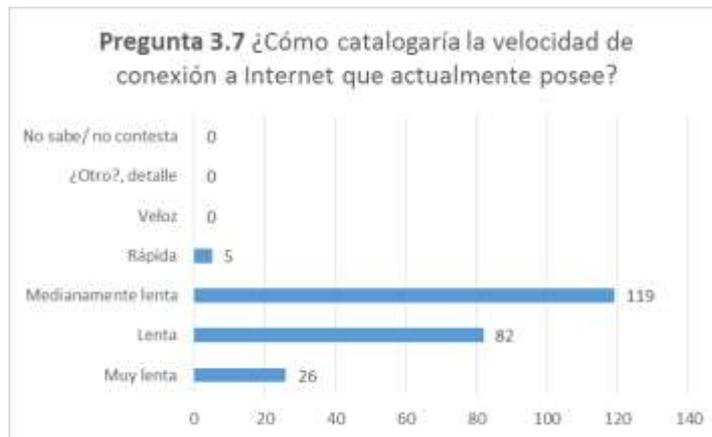
**Figura 5.27.** Resultados pregunta 3.4, cantón Guano



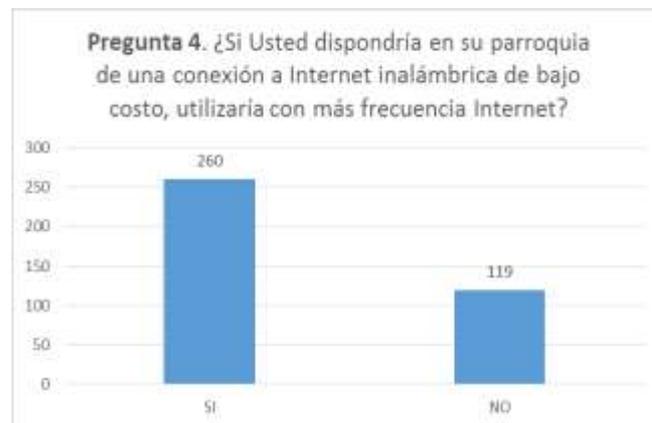
**Figura 5.28.** Resultados pregunta 3.5, cantón Guano



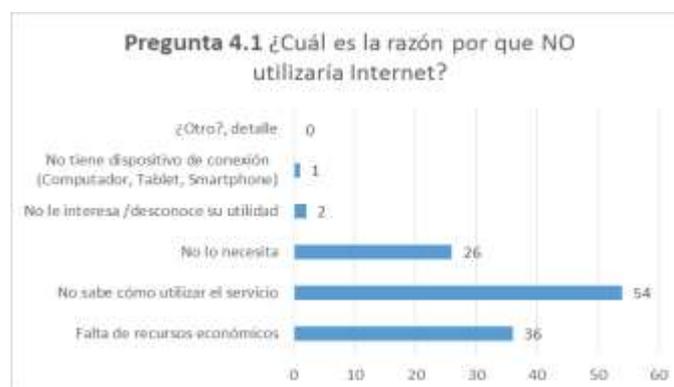
**Figura 5.29.** Resultados pregunta 3.6, cantón Guano



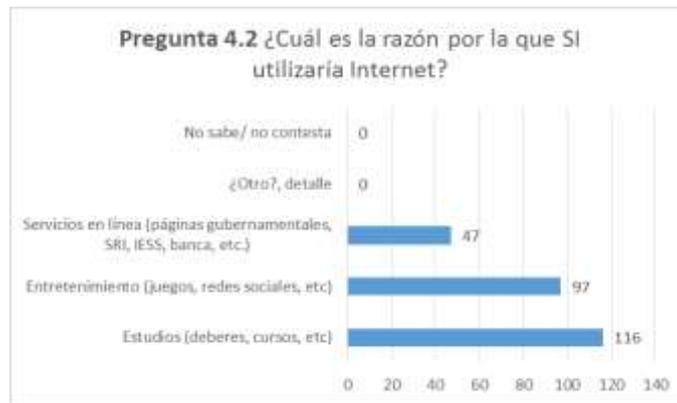
**Figura 5.30.** Resultados pregunta 3.7, cantón Guano



**Figura 5.31.** Resultados pregunta 4, cantón Guano



**Figura 5.32.** Resultados pregunta 4.1, cantón Guano



**Figura 5.33.** Resultados pregunta 4.2, cantón Guano

Interpretando los resultados obtenidos para los habitantes de las zonas rurales del cantón Guano, se puede concluir que aproximadamente el 54% de los encuestados estudian en su mayoría en el nivel secundario, además el 100% de los encuestados posee Televisión, y a diferencia de Riobamba, sólo cerca del 39% no posee conectividad a Internet, en este caso la mayoría por falta de cobertura, por su parte la gran mayoría de personas que cuentan con el servicio de Internet, se conectan al igual que en las parroquias rurales del cantón Riobamba, mediante línea telefónica dedicada (ADSL), pagando entre 20 y 30 USD mensuales, y utilizando en este caso en su mayoría una computadora portátil. Es importante mencionar que el uso que se le da a Internet es al igual que en el caso anterior para fines académico, además el tiempo de conexión utilizado mayoritariamente por los pobladores de las parroquias rurales del cantón Guano está entre 4 a 6 horas, con una velocidad de conexión medianamente lenta. Por otro lado cerca del 69% de la población de estas zonas está interesada en contar con una conexión a Internet de bajo costo y lo utilizaría para fines académicos, mientras que el 31% restante, no sabe cómo utilizar el servicio.

### **5.5.6. Análisis de resultados entre los habitantes de los cantones Riobamba y Guano**

Como se comentaba anteriormente, para este estudio de investigación, se determinó que los habitantes de las parroquias rurales del cantón Riobamba, serán el grupo de tratamiento, mientras que los habitantes de las parroquias rurales del cantón Guano, serán el grupo de comparación, con este antecedente se pudo comprobar que existe una cantidad similar de estudiantes de nivel secundario entre estos dos cantones, que fluctúa entre el 54 y el 58%, además en el cantón Guano el 100% de la población encuestada cuenta con el servicio de TV, mientras que en el cantón Riobamba, existe un 99% de la población con este servicio. Con lo que respecta a Internet, Riobamba tiene solamente un 45% de habitantes con este servicio, mismo que lo utilizan en promedio de 2 a 4 horas al día, utilizando computadoras de escritorio para el efecto;

mientras que los habitantes de Guano, cuentan con un 61% de su población con este servicio, con un promedio de utilización de 4 a 6 horas, utilizando equipos portátiles. Cabe destacar que en los dos cantones los pobladores encuestados califican la conexión actual como medianamente lenta y la utilizan en su mayoría para fines académicos. Para finalizar cerca del 83% de la población de Riobamba, está interesada en contar con una conexión a Internet de bajo costo, comparado con el 69% de la población de Guano que requiere el mismo servicio. Como se puede discernir el grupo de comparación supera al grupo de tratamiento, por lo que se espera que con la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA, se pueda en este caso en particular, mejorar sustancialmente la conexión a Internet de los pobladores de las parroquias rurales del cantón Riobamba.

## **FASE 5: Producir y divulgar los resultados**

### **5.6.1. Informe final de la evaluación de impacto**

En este apartado se utilizarán los puntos definidos anteriormente para el informe final de la evaluación de impacto.

#### **1. Introducción**

Para este estudio de tesis doctoral se va a realizar una evaluación ex ante, para lo cual se seguirá una metodología para implementar una evaluación de impacto, que consta de cinco fases, mismas que son: (i) Preparar la evaluación, (ii) Hacer operativo el diseño de la evaluación, (iii) Elegir la muestra de una población dada, (iv) Recolectar datos, (v) Producir y divulgar resultados. Dichas metodología será la que permita establecer el efecto causal de la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA.

#### **2. Descripción de la intervención**

La evaluación de impacto aplicada en este estudio de investigación, tiene como propósito determinar si la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER

CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA, permitiría brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales donde sólo llega la señal de televisión; obteniendo una estimación cuantitativa de los beneficios de mediano y largo plazo que se obtendrían y evaluar si estos son o no atribuibles a la intervención del proyecto de investigación en mención. Para realizar dicha evaluación se ha considerado a los pobladores de las parroquias rurales de la provincia de Chimborazo, República del Ecuador.

## **2.1. Diseño**

Para el diseño de la evaluación ex ante para esta investigación, tal como se detallaba anteriormente, se seguirá una metodología, misma que es detallada a continuación.

### **Fase 1: Preparar la evaluación**

- Identificar el/los problemas de investigación a ser evaluados.
- Formular la pregunta de evaluación – Objetivo central y específicos de la investigación.
- Especificar la teoría del cambio – Identificación de las variables de la evaluación del impacto.
- Determinar la cadena de resultados.
- Formular la hipótesis.
- Definir indicadores de evaluación de impacto.

### **Fase 2: Hacer operativo el diseño de la evaluación**

- Definir reglas operativas.
- Elegir método de evaluación de impacto.
- Definir la relación entre las reglas operativas y los métodos de evaluación de impacto.
- Determinar la escala mínima de intervención.
- Confirmar que el diseño de la evaluación es ético.
- Formar un equipo de evaluación.
- Definir el cronograma de la evaluación.
- Definir el presupuesto para la evaluación.

### **Fase 3: Elegir la muestra de una población dada**

- Decidir el tamaño de la muestra

- Decidir la estrategia de muestreo

#### **Fase 4: Recolectar datos**

- Desarrollar y aplicar el cuestionario.
- Hacer una prueba piloto de la técnica de recolección empleada.
- Tabular e interpretar los resultados.

#### **Fase 5: Producir y divulgar los resultados**

- Plan de evaluación de impacto.
- Informe de línea base.
- Informe final de la evaluación de impacto.

## **2.2. Implementación**

Para la implementación se han desarrollado cada una de las fases anteriormente descritas, en donde entre otras cosas se ha identificado el problema de investigación, se han formulado los objetivos de la investigación, y la hipótesis de investigación. Por otro lado se ha elegido el método de evaluación de impacto a utilizar, así como la relación entre las reglas operativas y los métodos de evaluación de impacto, a más de definir el cronograma y presupuesto para la evaluación. Además se ha definido el tamaño de la muestra y la estrategia de muestreo, con el objetivo de aplicar la encuesta diseñada en base a los indicadores propuestos, para luego tabular e interpretar los resultados, mediante lo cual al final se realizó el informe final de la evaluación de impacto.

## **3. Objetivos de la evaluación**

### **Objetivo General.-**

- Evaluar un nuevo estándar de TDT para brindar acceso a Internet en zonas rurales de Latinoamérica en donde sólo llega la señal de televisión.

### **Objetivos Específicos.-**

- Reducir la brecha digital existente en zonas donde la conexión a Internet es deficiente.
- Permitir la utilización de aplicaciones TIC como aprendizaje, salud, gobierno en línea en zonas rurales, generando igualdad de oportunidades y fomentando la participación ciudadana.

- Reducir los costos de conexión a Internet en zonas rurales.

### **3.1. Desarrollo de hipótesis, teoría del cambio, cadena de resultados**

#### **Hipótesis.-**

El diseño de un nuevo estándar con canal de retorno de TDT DVB-RCT2 basado en las nuevas funcionalidades que presenta la tecnología de TDT de segunda generación DVB-T2, y basado en los principios de la tecnología con canal de retorno inalámbrico DVB-RCT, permitirá brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales donde sólo llega la señal de televisión.

#### **Teoría del cambio.-**

Debido a que el acceso a Internet en zonas rurales de América Latina es deficiente y que la TV es más popular y accesible que el mismo Internet, la telefonía móvil, e incluso que la radio. Se pretende utilizar las características de los servicios de difusión de TV, específicamente los de Televisión Digital Terrestre (TDT) a fin de proporcionar conectividad a Internet en lugares donde solo llega la señal de TV.

Bajo este contexto, una posible solución para lograr acceso universal a Internet en zonas rurales de Latinoamérica sería la utilización de un canal de retorno inalámbrico de TDT, para lo se reutilizaría la infraestructura de la TV analógica para ponerla al servicio de la TDT, aumentando de esta manera la penetración y disminuyendo los costos de implementación, puesto que llegaría a los hogares que tengan acceso al servicio de televisión.

Además, es importante mencionar que para utilizar la solución de TDT propuesta (DVB-RCT2), es necesario primero liberar el espectro radioeléctrico, mediante el proceso conocido como dividendos digitales, que corresponde en América (Región 1 de la UIT) a la banda de 700 MHz (canales 52 al 69 de TV).

#### **Cadena de resultados.-**

Especificada en la figura 5.5.

### **3.2. Preguntas de políticas públicas**

¿Cuál es el impacto de la posible implementación de la segunda generación del estándar de TDT con canal de retorno inalámbrico, DVB-RCT2, para proveer conectividad a Internet en zonas rurales en Latinoamérica ?.

### 3.3. Principales indicadores de resultado

INDICADORES DE RESULTADO	
Tipología	Indicador
Efecto	Porcentaje de espectro radioeléctrico (canales liberados) liberado en la República del Ecuador.
Efecto	Porcentaje de hogares con TV en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.
Efecto	Porcentaje de hogares con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.
Efecto	Porcentaje de personas que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.
Efecto	Porcentaje de centros educativos con acceso a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.
Efecto	Porcentaje de estudiantes que acceden a Internet en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.
Efecto	Porcentaje de personas que acceden a servicios en línea en zonas rurales de la provincia de Chimborazo.
Efecto	Porcentaje de disminución de costos de conexión a internet en zonas rurales.

**Tabla 5.20.** Indicadores de resultado

## 4. Diseño de la evaluación

### 4.1. En la teoría

Descrito en la fase 1 de la metodología propuesta.

### 4.2. En la práctica

Descrito en las fases 2, 3, 4, 5 de la metodología propuesta.

## 5. Muestreo y datos

Al tratarse de una evaluación ex ante, los datos existentes o datos de línea base deberían ser suficientes para realizar la evaluación de impacto, sin embargo dichos datos obtenidos del último censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) en el año 2010, son generales y no muestran de forma concreta los datos necesarios para realizar este estudio de tesis doctoral para las zonas rurales de la provincia de Chimborazo.

Por tal motivo, es necesario para este estudio de tesis recolectar datos adicionales a los ya provistos por el INEC, por lo que hará falta realizar los cálculos de potencia, con el fin de obtener el tamaño mínimo de la muestra que se necesita para llevar a cabo la evaluación de impacto del presente estudio doctoral.

### **5.1. Estrategia de muestreo**

Para definir la estrategia de muestreo, se determinó en primer lugar determinar la población de interés, la cual para este estudio de tesis doctoral se conoce con exactitud, puesto que dicha población será la perteneciente a las zonas rurales de las parroquias de Riobamba (grupo de tratamiento) y Guano (grupo de comparación) ubicadas en la provincia de Chimborazo.

En segundo lugar se definió como marco muestral a todos los habitantes de las zonas rurales de las parroquias antes mencionadas, de donde se obtuvo la muestra mediante la aplicación de un método de muestreo, que en este caso fue el muestreo aleatorio simple, debido a que cada unidad de la población tiene la misma posibilidad de ser extraída. Además para este estudio de tesis doctoral se consideró un nivel de confianza del 95%.

### **5.2. Cálculos de potencia**

Se encuentran definidos en el apartado 5.4.2.

### **5.3. Datos recolectados**

Son mostrados desde la figura 5.6, hasta la figura 5.33, presentes en este estudio.

## **6. Validación del diseño de la evaluación**

Para validar el diseño de la evaluación, por ejemplo en los objetivos se definieron unos componentes mínimos para su formulación y realizar una validación a partir de los criterios utilizados por la metodología de selección de objetivos EMARF, en inglés conocido como SMART (*Specific, Measurable, Attributable, Realistic, Targeted*).

En lo que respecta a la selección de indicadores que se utilizarán tanto para seguir la implementación del proyecto, como para evaluar los resultados. Se utilizó para realizar la validación técnica de los indicadores es la metodología CREMA desarrollada por el Banco Mundial.

## **7. Resultados**

Como se comentaba anteriormente, para este estudio de investigación, se determinó que los habitantes de las parroquias rurales del cantón Riobamba, serán el grupo de tratamiento, mientras que los habitantes de las parroquias rurales del cantón Guano, serán el grupo de comparación, con este antecedente se pudo comprobar que existe una cantidad similar de estudiantes de nivel secundario entre estos dos cantones, que fluctúa entre el 54 y el 58%, además en el cantón Guano el 100% de la población encuestada cuenta con el servicio de TV, mientras que en el cantón Riobamba, existe un 99% de la población con este servicio. Con lo que respecta a Internet, Riobamba tiene solamente un 45% de habitantes con este servicio, mismo que lo utilizan en promedio de 2 a 4 horas al día, utilizando computadoras de escritorio para el efecto; mientras que los habitantes de Guano, cuentan con un 61% de su población con este servicio, con un promedio de utilización de 4 a 6 horas, utilizando equipos portátiles. Cabe destacar que en los dos cantones los pobladores encuestados califican la conexión actual como medianamente lenta y la utilizan en su mayoría para fines académicos. Para finalizar cerca del 83% de la población de Riobamba, está interesada en contar con una conexión a Internet de bajo costo, comparado con el 69% de la población de Guano que requiere el mismo servicio. Como se puede discernir el grupo de comparación supera al grupo de tratamiento, por lo que se espera que con la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2, PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA, se pueda en este caso en particular, mejorar sustancialmente la conexión a Internet de los pobladores de las parroquias rurales del cantón Riobamba.

## **8. Pruebas de robustez**

Antes de la puesta en marcha de la encuesta, se realizó una prueba piloto para comprobar el formato del cuestionario, así como la claridad del contenido y de la formulación de las preguntas. Dicha prueba se la realizó en la parroquia San Luis del cantón Riobamba, tomando como submuestra el 10% de la muestra calculada para esta parroquia, es decir se efectuó la encuesta a 6 personas, con lo cual se pudo comprobar que el instrumento de recolección de información planteado cumplió el objetivo para el cual fue diseñado.

## **9. Conclusión y recomendaciones políticas**

Mediante la evaluación ex ante de la posible implementación de la SEGUNDA GENERACIÓN DEL ESTÁNDAR DE TDT CON CANAL DE RETORNO INALÁMBRICO, DVB-RCT2,

PARA PROVEER CONECTIVIDAD A INTERNET EN ZONAS RURALES EN LATINOAMÉRICA, se pudo evaluar un nuevo estándar de TDT para brindar servicios de conectividad a Internet en zonas rurales de Latinoamérica en donde sólo llega la señal de televisión.

Por las características que presenta esta nueva tecnología, sería posible llegar a reducir la brecha digital existente en zonas donde la conexión a Internet es deficiente, permitiendo la utilización de aplicaciones TIC como aprendizaje, salud, gobierno en línea en zonas rurales, generando igualdad de oportunidades y fomentando la participación ciudadana, a más de reducir los costos de conexión a Internet en zonas rurales.

Por lo antecedentes antes expuestos, se recomienda apoyar la puesta en marcha de esta tecnología de TDT a fin de proporcionar y/o mejorar de ser el caso los servicios de conexión a Internet en zonas rurales de Latinoamérica.

# Capítulo 6

## Análisis de 4G LTE como tecnología sustitutiva a la solución de TDT propuesta

### 6.1. Introducción

4G LTE (4th Generation Long Term Evolution) se refiere a la cuarta generación de tecnologías de telefonía móvil, el mismo hace referencia a un estándar de comunicación móvil sucesor de las tecnologías 2G (GSM/EDGE) y 3G (UMTS/HSPA/HSPA+), que fue desarrollado por la organización 3GPP (3er Generation Partnership Project), para permitir a los usuarios más calidad y mayor rapidez de servicio [41].

LTE está basado en el protocolo IP, soportando tanto IPv4 e IPv6, la principal diferencia con la tecnología 3G se aprecia en los siguientes aspectos (i) uso de la tecnología OFDM, (ii) uso de la técnica MIMO, (iii) definición de una Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE) [42].

4G LTE usa multiplexación multiportadora con el uso de tecnología OFDM; tecnología de múltiples antenas de entrada y salida MIMO (Multiple Input Multiple Output), con lo cual se logra alta eficiencia espectral; Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE), mediante la cual se mejora la capacidad de datos, reduciendo la latencia experimentada por el usuario; duplexación por división de tiempo y frecuencia TDD y FDD respectivamente, con lo cual se mejora el uso del espectro haciendo una gestión más eficiente del mismo [43], incluyendo servicios unicast y broadcast; codificación de canal, lo cual brinda seguridad y reduce la probabilidad de error en la transmisión.

Para el enlace descendente (DL), 4G LTE utiliza OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), mientras que en el enlace ascendente (UL) usa SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access), o también conocida como DFTS-OFDM. Por su parte el uso de más antenas provee diversidad de señal y transmisiones multicapa a través del uso de la técnica MIMO. Existe además una flexibilidad considerable en el uso del espectro por parte de LTE. Esta tecnología puede trabajar sobre bandas nuevas y existentes y sobre FDD y TDD, en términos de adaptación de enlace, LTE puede usar esquemas de modulación QPSK, 16QAM o

64 QAM, a más de ejecutar codificación de canal para proveer de robustez contra las condiciones adversas que pueden afectar dicho canal. También el uso de tonos de 15 KHz provee un tiempo de símbolo largo, lo que mejora la robustez contra la propagación multicamino y la dispersión de la señal en el tiempo. Así mismo LTE provee un ancho de banda adaptativo que inicia en 1.4 MHz, seguido por 3, 5, 10, 15 y 20 MHz, y una velocidades de pico que en bajada tienen 326,5 Mbits/s para MIMO 4x4 y 172,8 Mbits/s para MIMO 2x2, mientras que en subida alcanzan los 86,5 Mbits/s [43], considerando un esquema de modulación 64QAM tanto para DL como para UL.

Por otro lado la Evolución de la Arquitectura del Sistema (SAE) propuesta para LTE, mueve algunas de las funciones del núcleo de la red hacia la periferia de la misma, con el objetivo de reducir la latencia en la red. SAE en la estación base provee diferentes ventajas sobre las arquitecturas 3G, como: (i) capacidad de datos mejorada, (ii) arquitecturas basadas totalmente en IP, (iii) reducción de la latencia, y (iv) reducción de la operación y por ende de costos.

Con los principios descritos anteriormente, se ha desarrollado una nueva tecnología 4G llamada LTE Avanzada (Advanced), la cual provee mayor velocidad que LTE tanto en enlace descendente como ascendente, con una latencia menor. En la Tabla 6.1, se muestran características de las tecnologías 3G y 4G. Cabe destacar que la tecnología HSPA+ sirvió de punto medio para pasar de la tecnología 3G a la LTE.

	WCDMA (UMTS)	HSPA HSDPA/HSUPA	HSPA+	LTE	LTE Avanzada
<b>Máxima velocidad DL</b>	384 Kbps	14 Mbps	28 Mbps	100 Mbps	1 Gbps
<b>Máxima velocidad UL</b>	128 Kbps	5.7 Mbps	11 Mbps	50Mbps	500 Mbps
<b>Latencia (tiempo ida y vuelta)</b>	150 ms	100 ms	50 ms (máx)	~10 ms	Menor a 5 ms
<b>Versiones 3GPP</b>	99/4	5 / 6	7	8	10
<b>Metodología de acceso</b>	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA / SC-FDMA	OFDMA / SC-FDMA

**Tabla 6.1.** Comparativa entre tecnologías 3G y 4G. Adaptado de [42]

El despliegue 4G se puede realizar en diferentes bandas de acuerdo con la necesidad de cada país y según cómo se haya aprovechado el espectro radioeléctrico por parte de los gobiernos y las empresas de telecomunicaciones. Para el caso de Ecuador para las telefónicas Claro y Movistar se otorgó la banda 1.700 MHz, conocida también como servicios inalámbricos avanzados (AWS - *Advanced Wireless Service*), o banda 4 para el despliegue de la red 4G [44], mientras que en el caso de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT), el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) le otorgó a la telefónica estatal 30 MHz de espectro en la banda de 700 MHz, y 40 MHz de espectro en la banda AWS.

## **6.2. Modulación LTE y principios de OFDM**

Uno de los elementos principales de LTE es el uso de OFDM, como la señal portadora y los esquemas asociados como OFDMA y SC-FDMA. OFDM es usado en muchos otros sistemas de conectividad inalámbricos como WLAN (Wireless Local Area Network), WiMAX, e incluso en sistemas de difusión como DVB, esto debido a que OFDM presenta muchas ventajas que incluyen la robustez frente a la propagación multicamino y a las interferencias.

Uno de los principales parámetros asociados con el uso de OFDM dentro de LTE es la elección del ancho de banda. LTE define algunos anchos de banda de canal que varían entre 1,4 y 20 MHz, en donde cada subportadora está separada 15KHz, así para mantener la ortogonalidad la tasa de símbolo sería de 1/15 KHz (66,7 us). Así mismo OFDM mejora los retrasos en la transmisión producidos por los efectos de la propagación multicamino, sin embargo todavía es necesario adherir métodos para proporcionar mejorar el sistema de transmisión, con lo cual se mejoraría la ISI generada, es por esto que en zonas donde se espera exista ISI, se inserta un período de guarda al inicio de cada símbolo, que no es más que la copia de una parte del final del símbolo en el inicio del mismo. A esto se lo conoce como prefijo cíclico y funciona tal cual se lo hace en los sistemas de difusión de TV, para el caso específico de esta tesis doctoral, tal como DVB-RCT2.

La longitud del prefijo cíclico es importante, si este no es muy grande no podrá contrarrestar de manera efectiva la reflexión causada por la propagación multicamino, y si es muy largo se reducirá la capacidad de transmisión de datos. Para LTE el prefijo cíclico dura 4,69 us, lo que permite acomodar las variaciones de la ruta a partir de los 1,4 Km [45].

## **6.3. Enlace descendente (DL)**

La señal OFDM usada en LTE comprende un máximo de 2048 subportadoras diferentes, con un espacio de separación de 15kHz. A pesar de que es obligatorio que los equipos móviles soporten las 2048 subportadoras, no todas son transmitidas por la estación base, la cual necesita soportar solamente la transmisión de 72 subportadoras, razón por la cual cualquier equipo móvil podrá conectarse con cualquier estación base.

Dentro de la señal OFDM es posible elegir entre tres tipos de modulación para LTE, entre las cuales se tiene QPSK (4QAM), 16QAM, 64QAM, a diferencia de DVB-RCT2 que puede tener hasta 256QAM, pero con la utilización en DL de OFDM, más no de OFDMA como en el caso de LTE. Obviamente el uso de cada modulación depende de las condiciones del medio, así QPSK, no requiere de una gran SNR para transmitir, por lo que proveerá mayor robustez a la

transmisión, pero no permitirá el traspaso de datos a grandes velocidades.

Además, es importante destacar que en DL, las subportadoras son divididas en bloques de recursos, lo que permite la compartición de datos a través de las mismas. Los bloques de recursos comprenden 12 subportadoras dispersadas sobre todo el ancho de banda de la señal LTE. Aunque también puede cubrir un slot en la trama de tiempo, lo que significa que diferentes anchos de banda de la señal LTE pueden tener diferentes números de bloques de recursos, tal como se muestra en la Tabla 6.2.

Ancho de banda (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Número de bloques de recursos	6	15	25	50	75	100

**Tabla 6.2.** Bloques de recursos por anchos de banda en LTE [45].

#### **6.4. Enlace ascendente (UL)**

Para el acceso UL, se utiliza un concepto diferente en la técnica de acceso, a la cual se le conoce como SC-FDMA, aunque la misma está basada en OFDMA.

Este modo de transmisión mantiene constante el nivel de potencia de operación de los equipos móviles, con lo cual el rendimiento de la batería no se ve afectado, permitiendo que dichos equipos operen tan eficientemente como sea posible, básicamente SC-FDMA es un formato híbrido entre las modulaciones OFDMA y OFDM, que combina la baja tasa promedio de pico ofrecida por OFDMA, con la resistencia a la interferencia producida por la multitrayectoria y la asignación flexible de subportadoras que provee OFDM.

#### **6.5. Múltiples entradas, múltiples salidas en LTE (MIMO LTE)**

MIMO, es otra de las innovaciones tecnológicas de LTE usada para proveer rendimiento al sistema, esta tecnología provee a LTE para mejorar aún más la transmisión de datos y la eficiencia espectral, incluso por encima de la obtenida con el uso de OFDM.

Aunque MIMO adhiere complejidad al sistema en términos de procesamiento y del número de antenas requeridas, permite la transferencia de tasas de datos altas, con lo cual se consigue eficiencia espectral.

El concepto básico de MIMO utiliza la propagación de la señal utilizando múltiples caminos, para lo cual el transmisor y el receptor tienen más de una antena y usa la potencia de procesamiento disponible en cada enlace, para definir diversos caminos entre los equipos cliente y servidor respectivamente.

El uso de la tecnología MIMO ha sido introducida sucesivamente en las diferentes versiones

del estándar LTE, razón por la cual se han definido algunos modos MIMO, que se detallan a continuación:

- **Antena simple.-** en esta forma de transmisión inalámbrica, se utiliza un enlace básico, en donde un flujo de datos es transmitido por una antena y recibido por una o más antenas, a lo cual respectivamente se lo denomina como SISO (Single Input Single Output), y SIMO (Single Input Multiple Output).
- **Diversidad de transmisión.-** esta opción de MIMO usada dentro de LTE, permite enviar el mismo flujo de información desde múltiples antenas, específicamente LTE soporta dos o cuatro antenas para este fin, la información es codificada utilizando diferentes códigos de bloque de frecuencia espacial. Este modo mejora la calidad de la señal en recepción, pero no mejora la velocidad de datos, razón por la cual se utiliza esta tecnología en canales comunes así como en los canales de control y difusión.
- **Multiplexación espacial de lazo abierto.-** esta opción de MIMO permite enviar dos flujos de información que puede ser transmitidos sobre dos o más antenas. Sin embargo no existe retroalimentación, debido a lo cual en la estación base se utiliza un indicador de rango de transmisión (Transmit Rank Indicator - TRI) para determinar el número de capas espaciales.
- **Multiplexación espacial de lazo cerrado.-** esta opción de MIMO es similar a la opción de lazo abierto, pero a diferencia del anterior, este método tiene incorporada una retroalimentación que cierra el lazo, razón por la cual en la estación base se utiliza un indicador de matriz precodificado (Pre-coding Matrix Indicator - PMI), mediante el cual el transmisor precodifica el datos para optimizar la transmisión y habilita el receptor para que reconozca con facilidad los diferentes flujos de datos.
- **Lazo cerrado con precodificación.-** esta otra forma de MIMO, en donde una palabra de código simple es transmitida sobre una capa espacial simple. Esto puede ser visto como un modo de retroceso de bucle cerrado para la multiplexación espacial y también puede estar asociado con la formación de haz.
- **Multiusuario MIMO MU-MIMO.-** esta forma habilita el sistema con el objetivo de asignar diferentes flujos espaciales a diferentes usuarios.
- **Formación de haz.-** es el más complejo de los modos MIMO, que utiliza matrices lineales para permitir a la antena centrarse en un área particular, con lo cual se reduciría la interferencia y se incrementaría la capacidad de transmisión cuando se ha formado un haz en una determinada dirección. Aquí al igual que en el modo de lazo cerrado con precodificación una palabra de código simple es transmitida sobre una capa espacial simple.

## 6.6. FDD Y TDD en LTE

LTE se ha definido para acomodar tanto el espectro emparejado para FDD, como el espectro no emparejado para la operación de TDD. Básicamente FDD en LTE se utiliza para ayudar en el proceso de migración desde los servicios 3G, los cuales utilizan esta técnica. Por su parte TDD en LTE brinda la actualización para la utilización de la técnica TD-SCDMA. En vista de la importancia de esta última técnica, está previsto que los equipos de usuario sean diseñados para acomodar tanto el modo FDD como el TDD. En la Tabla 6.3 se muestra una comparativa entre FDD y TDD en LTE.

Parámetro	TDD LTE	FDD LTE
<b>Espectro emparejado</b>	No requiere espectro emparejado, ya que se transmite y recibe en el mismo canal.	Requiere espectro emparejado con suficiente separación en frecuencia para permitir transmisión y recepción simultánea.
<b>Costo de hardware</b>	Bajo costo, el duplexor no es necesario para aislar el transmisor y el receptor. En contraparte el costo de los equipos de usuario es importante, debido a que la mayoría de productos trabajan en base a esta técnica.	Duplexor es necesario, y su costo es elevado.
<b>Reciprocidad del canal</b>	Propagación del canal es la misma en ambas direcciones, con lo cual la transmisión y recepción usa un conjunto de parámetros.	Diferentes características del canal en ambas direcciones como resultado del uso de diferentes frecuencias.
<b>Asimetría UL / DL</b>	Es posible cambiar de forma dinámica la relación de capacidad de UL y DL para que coincida con la demanda.	Capacidad de UL / DL determinada por la asignación de frecuencias establecido por las autoridades reguladoras. Por ello no es posible realizar cambios dinámicos para que coincida con la capacidad. Normalmente se requieren cambios regulatorios y la capacidad se asigna de manera que es la misma en cualquier dirección.
<b>Intervalo de guarda (GI)</b>	Se requiere un GI para asegurar que las transmisiones tanto en UL y DL no se solapen. Un GI grande limitará la capacidad, sin embargo se utiliza si las distancias se incrementan, con lo cual se acomodan los	GI es necesario para proporcionar suficiente aislamiento entre UL y DL. Aquí el GI no afecta la capacidad.

	tiempos de propagación más grandes.	
<b>Transmisión discontinua</b>	Es requerida para permitir transmisiones tanto UL como DL. Sin embargo esto puede degradar el rendimiento de la potencia del amplificador de RF en el transmisor.	Se requiere transmisión continua.
<b>Interferencia de cruce de ranuras</b>	La estación base necesita ser sincronizada con respecto a los tiempos de transmisión UL y DL. Si las estaciones base vecinas usan diferentes asignaciones de tiempo para UL y DL, pero comparten el mismo canal, puede existir interferencia entre celdas.	N/A

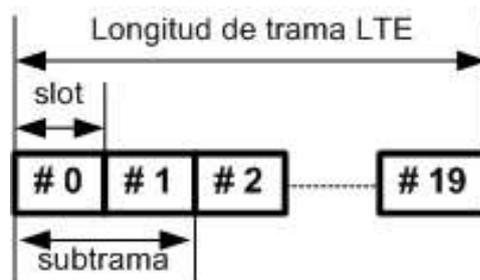
**Tabla 6.3.** Comparativa entre modos TDD y FDD utilizadas en LTE [45]

## 6.7. Estructura de trama y subtrama en LTE

Para que el sistema 4G LTE pueda mantener la sincronización y el manejo de diferentes tipos de información que necesita ser transportada entre la estación base y el equipo de usuario, se ha definido en LTE una estructura de trama y subtrama, misma que difiere de las estructuras de trama utilizadas tanto en FDD como en TDD, contando de esta manera con dos tipos de estructura de trama para LTE (tipo 1 y tipo 2), mismas que son detalladas a continuación:

### 6.7.1 Estructura de trama LTE tipo 1

Es usada por el modo FDD, tiene una longitud de 10ms, que es dividida en un total de 20 ranuras, donde cada dos ranuras forman una subtrama, es decir se tienen 10 subtramas dentro de una trama. En la Figura 6.1, se ilustra el concepto.



**Figura 6.1.** Estructura de trama LTE tipo 1.

### 6.7.2 Estructura de trama LTE tipo 2

Este tipo de estructura de trama es usado en el modo TDD, aquí la longitud total de 10 ms se dividen en dos tramas de 5 ms, y posteriormente cada trama de 5 ms, se subdivide en 5 subtramas de 1 ms de longitud.

Las subtramas pueden ser divididas en subtramas estándar o en subtramas especiales, en donde estas últimas, consisten en tres campos: Ranura de tiempo del piloto de bajada (*DwPTS - Downlink Pilot Time Slot*), período o intervalo de guarda (*GP - Guard Period*), y Ranura de tiempo del piloto de subida (*UpPTS - Uplink Pilot Time Slot*). Cabe destacar que estos tres campos deben tener como longitud máxima 1 ms, y son usados dentro de la técnica TD-SCMA. En la Figura 6.2, se detalla en concepto.

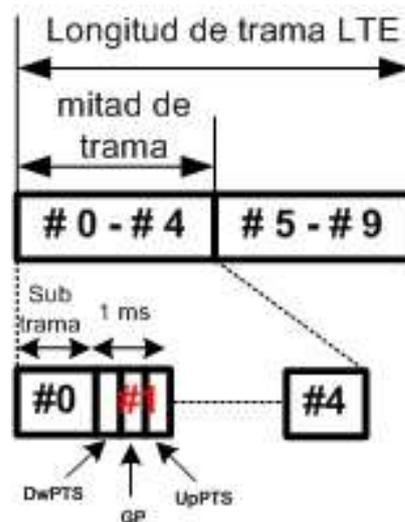


Figura 6.2. Estructura de trama LTE tipo 2

### 6.7.3 Asignaciones de subtrama

Una de las ventajas de usar TDD en LTE, radica en la posibilidad de cambiar dinámicamente el balance entre subida y bajada y las características para lograr cargar las condiciones deseadas para una determinada transmisión, razón por la cual un número de siete configuraciones estándar han sido creadas dentro del estándar LTE. Dichas configuraciones usan periodos de longitud de 5 o 10 ms, refiriéndose a los tipos de estructuras antes mencionados, es así que en el caso de la longitud de 5 ms una subtrama especial puede existir en cualquiera de las dos mitades definidas, mientras que en el caso de los 10 ms la subtrama especial existe en la primera mitad solamente. En la Tabla 6.4, se puede observar este particular.

Configuración UL/DL	Cambio de periodicidad DL a UL	Número de subtrama									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Tabla 6.4. Configuraciones de subtrama UL/DL para TDD LTE [45]

Donde: **D** subtrama transmisión DL; **S** subtrama especial; **U** subtrama transmisión UL.

## 6.8. Canales físicos, lógicos y de transporte en LTE

Para que los datos puedan ser transportados a través de la interfaz de radio LTE varios canales son usados. Estos diferentes canales proveen interfaces a las capas superiores dentro de la estructura de protocolo de LTE, además de permitir el ordenamiento y la segregación de los datos. Los tipos de canales que se encuentran en LTE son los siguientes:

- **Canales físicos.-** son los canales de transmisión que llevan los datos de usuario y los mensajes de control.
- **Canales de transporte.-** Los canales de transporte de la capa física ofrecen transferencia de información hacia la capa MAC y las capas superiores.
- **Canales lógicos.-** provee el servicio a la capa MAC dentro de la estructura de protocolos de LTE.

### 6.8.1. Canales físicos

Los canales físicos de LTE varían entre el UL y DL en cuanto a requisitos y operación. Es por esto que los mismos se subdividen en canales físicos para UL y canales físicos para DL.

#### A. Canales físicos en DL

- **Canal de difusión físico (Physical Broadcast Channel - PBCH),-** lleva la información del sistema a los equipos de usuario que requieren acceso a la red, específicamente la contenida en el bloque de información maestro (Master Information Block - MIB). El esquema de modulación utilizado es QPSK, la información de los bits es codificada y la tasa de bits

emparejada, además los bits son mezclados usando una secuencia de mezcla específica para cada celda, previniendo de esta manera la confusión con datos de otras celdas.

El mensaje MIB sobre el PBCH es asignado a las 72 subportadoras centrales o a los seis bloques de recursos centrales, independientemente del ancho de banda total del sistema. Un mensaje PBCH es repetido cada 40 ms, y sus transmisiones tienen 14 bits de información, 10 bits de reserva, y 16 bits de CRC.

- **Canal de indicador de formato de control físico (Physical Control Format Indicator Channel - PCFICH).**- informa al equipo de usuario sobre el formato de la señal que está siendo recibida. Indica el número de símbolos OFDM (1, 2, o 3) usados por los PDCCHs. La información dentro del PCFICH es esencial porque el equipo de usuario no dispone de información previa sobre el tamaño de la zona de control.

Un PCFICH es transmitido sobre el primer símbolo de cada subtrama y lleva un campo de indicador de formato de control (*CFI - Control Format Indicator*). El CFI contiene una palabra de código de 32 bits que representa 1, 2, o 3 símbolos OFDM. La representación del cuarto símbolo mediante el CFI es reservado para un posible uso posterior.

El PCFICH usa 32 bits, 2 bloques de codificación que se traduce en una tasa de codificación de 1/16, además siempre utiliza modulación QPSK para asegurar una recepción robusta.

- **Canal de control descendente físico (PDCCH - Physical Downlink Control Channel).**- el principal propósito de este canal es llevar la información de programación de diferentes tipos, tales como; programación de recursos descendente; instrucciones de control de potencia ascendente; acceso a recurso ascendente; sistema de información o indicador de paginación.

El PDCCH contiene un mensaje conocido como información de control descendente (*DCI - Downlink Control Information*), el cual lleva la información de control de un particular equipo de usuario o de un grupo de equipos de usuario. El formato DCI tiene diferentes tipos, los cuales están definidos con diferentes tamaños. Los diferentes tipos de formatos incluyen: Tipo 0, 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 2, 2A, 2B, 2C, 3, 3A y 4.

- **Canal indicador híbrido ARQ físico (PHICH - Physical Hybrid ARQ Indicator Channel).**- Este canal es usado para reportar el estado híbrido ARQ, aquí se lleva la señal ACK/NACK indicando si un bloque de transporte se ha recibido correctamente.

El PHICH se transmite dentro de la región de control de la subtrama y generalmente sólo se transmite dentro del primer símbolo. Si el enlace de radio es pobre, entonces el PHICH se extiende a un número de símbolos para robustez.

## **B. Canales físicos en UL**

- **Canal de control ascendente físico (PUCCH - Physical Uplink Control Channel).**- proporciona los diversos requisitos de control de señalización. Existe un número de formatos PUCCH definidos para que el canal lleve la información requerida de la forma más eficiente para un determinado escenario, y estos pueden ser 1, 1A, 1B, 2, 2A, 2B, 3.
- **Canal compartido ascendente físico (PUSCH - Physical Uplink Shared Channel).**- Este canal físico que se encuentra en el enlace ascendente LTE es la contraparte de enlace ascendente de PDSCH.
- **Canal de acceso aleatorio físico (PRACH - Physical Random Access Channel).**- se utiliza para funciones de acceso aleatorio. Esta es la única transmisión no sincronizada que el equipo de usuario puede hacer dentro de LTE. Los retardos de propagación en UL y DL son desconocidos cuando se usa PRACH y por lo tanto no se puede realizar la sincronización.

La instancia PRACH se hace a partir de dos secuencias: un prefijo cíclico y un periodo de guarda. La secuencia de preámbulo puede ser repetida para que la estación base pueda decodificar el preámbulo cuando las condiciones del enlace son pobres.

### **6.8.2. Canales de transporte LTE**

Al igual que en el caso anterior, Los canales de transporte de LTE varían entre el UL y DL en cuanto a requisitos y operación, y se subdividen en:

#### **A. Canales de transporte en DL**

- **Canal de difusión (BCCH - Braodcast Channel).**- El canal de transporte LTE se asigna al BCCH.
- **Canal compartido descendente (DL-SCH - Downlink Shared Channel).**- es el principal canal de transmisión de datos en DL. Es utilizado por muchos canales lógicos.
- **Canal de paginación (PCH - Paging Channel).**- para transmitir el PCCH.
- **Canal de multidifusión (MCH - Multicast Channel).**- es usado para transmitir MCCH a fin de establecer transmisiones multidifusión.

## **B. Canales de transporte en UL**

- **Canal compartido ascendente (UL-SCH - Uplink Shared Channel).**- es el canal principal para transferir datos en forma ascendente.
- **Canal de acceso aleatorio (RACH - Random Access Channel).**- es utilizado para requerimientos de acceso aleatorio.

### **6.8.3. Canales lógicos LTE**

Los canales lógicos cubren los datos transportados sobre la interfaz de radio. El punto de acceso de servicio (*SAP - Service Access Point*) entre la subcapa MAC y la subcapa RLC proporciona el canal lógico.

**A. Canales de control.**- estos canales llevan la información del plano de control.

- **Canal de control de difusión (BCCH - Broadcast Control Channel).**- su canal de control proporciona información del sistema a todos los terminales móviles conectados a la estación base.
- **Canal de control de paginación (PCCH - Paging Control Channel).**- se utiliza para paginar la información cuando se busca una unidad en una red.
- **Canal de control común (CCCH - Common Control Channel).**- se utiliza para información de acceso aleatorio, por ejemplo, para las acciones que incluyen el establecimiento de una conexión.
- **Canal de control multidifusión (MCCH - Multicast Control Channel).**- provee información necesaria para la recepción de multidifusión.
- **Canal de control dedicado (DCCH - Dedicated Control Channel).**- es utilizado para llevar información de control específica del usuario, por ejemplo, para las acciones de control, incluido el control de potencia, traspaso, entre otros.

**B. Canales de tráfico.**- llevan los datos de tráfico del usuario.

- **Canal de tráfico dedicado (DTCH - Dedicated Traffic Channel).**- transmite los datos de usuario.
- **Canal de tráfico multidifusión (MTCH - Multicast Traffic Channel).**- transmite los datos de multidifusión.

## 6.9. Bandas de frecuencia LTE y asignación de espectro

Hay un número creciente de bandas de frecuencia de LTE que se están siendo designadas como posibilidades para su uso con LTE. Muchas de las bandas de frecuencias LTE ya están en uso para otros sistemas celulares, mientras que otras bandas LTE son nuevas y están siendo introducidas mediante la reasignación del espectro.

### 6.9.1. Bandas de frecuencia LTE FDD Y TDD

El espectro FDD requiere bandas pares, una de UL y otra de DL, y TDD requiere una banda simple tanto para UL como para DL que funcionan en la misma frecuencia pero están separadas en tiempo. Como resultado existen diferentes asignaciones de bandas LTE para TDD y FDD. En algunos casos esas bandas pueden superponerse y es por lo tanto posible, aunque poco probable que tanto transmisiones TDD y FDD puedan estar presentes en una banda de frecuencias LTE en particular. En este caso el equipo de usuario deberá detectar que tipo de transmisión (FDD o TDD) se está realizando en determinada banda.

### 6.9.2. Asignación de bandas de frecuencias LTE FDD

Existe un gran número de asignaciones de espectro de radio que han sido reservadas para transmitir en modo FDD. Las bandas de frecuencia FDD LTE están emparejadas para permitir la transmisión simultánea en dos frecuencias. Las bandas también tienen una separación suficiente para permitir que las señales transmitidas no perjudiquen el funcionamiento del receptor. Puesto que si las señales están demasiado cerca, el receptor puede ser bloqueado y la sensibilidad del mismo alterada. En la Tabla 6.5, se muestran las bandas y frecuencias utilizadas en LTE para el modo FDD.

Número de banda LTE	UL (MHz)	DL (MHz)	Ancho de banda (MHz)	Espacio Dúplex (MHz)	Banda de guarda (MHz)
1	1920 - 1980	2110 - 2170	60	190	130
2	1850 - 1910	1930 - 1990	60	80	20
3	1710 - 1785	1805 - 1880	75	95	20
4	1710 - 1755	2110 - 2155	45	400	355
5	824 - 849	869 - 894	25	45	20
6	830 - 840	875 - 885	10	35	25
7	2500 - 2570	2620 - 2690	70	120	50
8	880 - 915	925 - 960	35	45	10
9	1749.9 -	1844.9 -	35	95	60

	1784.9	1879.9			
10	1710 - 1770	2110 - 2170	60	400	340
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	20	48	28
12	698 - 716	728 - 746	18	30	12
13	777 - 787	746 - 756	10	-31	41
14	788 - 798	758 - 768	10	-30	40
15	1900 - 1920	2600 - 2620	20	700	680
16	2010 - 2025	2585 - 2600	15	575	560
17	704 - 716	734 - 746	12	30	18
18	815 - 830	860 - 875	15	45	30
19	830 - 845	875 - 890	15	45	30
20	832 - 862	791 - 821	30	-41	71
21	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	15	48	33
22	3410 - 3500	3510 - 3600	90	100	10
23	2000 - 2020	2180 - 2200	20	180	160
24	1625.5 - 1660.5	1525 - 1559	34	-101.5	135.5
25	1850 - 1915	1930 - 1995	65	80	15
26	814 - 849	859 - 894	30 / 40		10
27	807 - 824	852 - 869	17	45	28
28	703 - 748	758 - 803	45	55	10
29	n/a	717 - 728	11		
30	2305 - 2315	2350 - 2360	10	45	35
31	452.5 - 457.5	462.5 - 467.5	5	10	5

**Tabla 6.5.** Bandas y frecuencias LTE en FDD [45]

### 6.9.3. Asignación de bandas de frecuencias LTE TDD

Las bandas de frecuencia TDD LTE no están emparejadas, debido a que tanto el enlace UL como el DL comparten la misma frecuencia, pero están multiplexados en tiempo. En la Tabla 6.6, se muestran las bandas y frecuencias utilizadas en LTE para el modo TDD.

Número de banda LTE	Asignación (MHz)	Ancho de banda (MHz)
33	1900 - 1920	20
34	2010 - 2025	15
35	1850 - 1910	60
36	1930 - 1990	60
37	1910 - 1930	20
38	2570 - 2620	50
39	1880 - 1920	40
40	2300 - 2400	100
41	2496 - 2690	194
42	3400 - 3600	200

43	3600 - 3800	200
44	703 - 803	100

**Tabla 6.6.** Bandas y frecuencias LTE en TDD [45]

## 6.10. Evolución de la Arquitectura del Sistema (*SAE - System Architecture Evolution*)

SAE es definida como la evolución del núcleo de la red permitida por la tecnología LTE, en referencia a otras tecnologías de comunicación móvil. Así uno de los objetivos primordiales de SAE es la compatibilidad con la tecnología LTE Avanzada, de tal modo que cuando esta sea introducida, la red será capaz de manejar los aumentos en la transmisión de datos, con pocos cambios en la infraestructura.

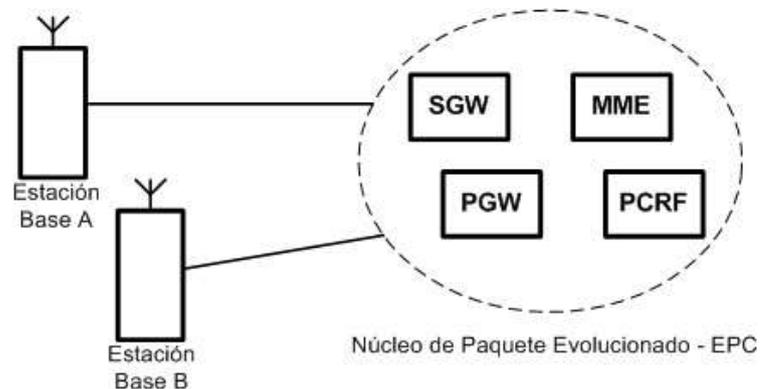
SAE ofrece muchas ventajas sobre topologías y sistemas previos usados en núcleos de redes celulares, entre las cuales se tiene:

- **Mejora la capacidad de datos.-** LTE ofrece una velocidad de descarga de 100 Mbps, pero se espera que maneje muchos mayores niveles de datos, para lo cual SAE permite mejorar sustancialmente la transferencia de datos.
- **Arquitectura basada en IP.-** la arquitectura propuesta para redes 3G y anteriores, permitía el transporte de voz mediante una conmutación basada en circuitos, pero la nueva tendencia es la utilización de datos IP, razón por la cual SAE permite la transmisión de la información mediante la conmutación basada en paquetes.
- **Reducción de la latencia.-** con el incremento de los niveles de interacción y de respuesta requeridos, SAE asegura que los niveles de latencia son reducidos alrededor de 10 ms [45], lo cual permite mejorar los tiempos de respuesta en las comunicaciones con LTE.
- **Reducción de gasto operacional (*OPEX - Operational Expenditure*) y gasto en capital (*CAPEX - Capital Expenditure*).**- un elemento primordial para cualquier operador es la reducción de costos. Es importante por lo cual que cualquier diseño reduzca el CAPEX y el OPEX, y esto es justamente lo que SAE logra debido a su alto nivel de configuración automática.

### A. Principios básicos de SAE y arquitectura LTE

SAE propone la utilización de un nodo común como puerta de enlace (Gateway), sistemas basados totalmente en protocolos IP, el uso de una entidad de manejo de movilidad (*MME – Mobility Management Entity*), y un divisor funcional para el acceso a la red de radio (*RAN –*

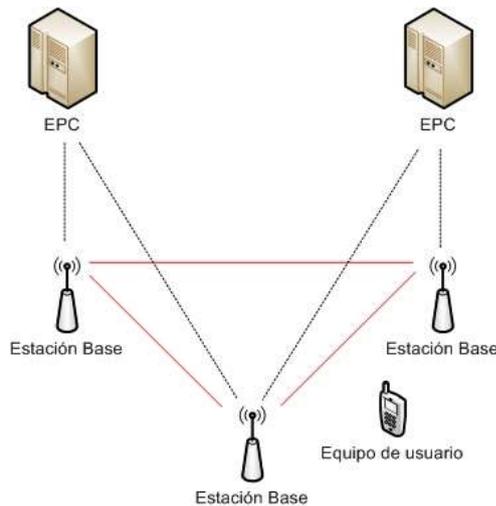
*Radio Access Network*) y a la red de núcleo (Core Network). El principal elemento del LTE SAE es el núcleo de paquete evolucionado (*EPC – Evolved Packet Core*), el mismo que contiene a muchas estaciones base. El concepto se ilustra en la Figura 6.3.



**Figura 6.3.** Elementos de EPC [42]

Dentro de EPC, existen 4 elementos. MME maneja los trasposos intra-LTE, la activación y desactivación de la portadora, e interactúa con el servidor de suscriptor de casa (*HSS – Home Subscriber Server*) para autenticar al usuario. Así mismo, MME provee funciones de control. El servidor de puerta de enlace (*SGW – Serving Gateway*) elemento que maneja la movilidad de los nodos y actúa como puerta de enlace entre la RAN y la red de núcleo. Cuando la estación móvil se mueve a través de las áreas servidas por los diferentes nodos de la estación base (Nodo A, Nodo B), el SGW sirve como punto de anclaje, asegurando la continuidad del traspaso de datos. El tercer elemento es la puerta de enlace PDN (*PGW - PDN Gateway*), la cual provee conectividad de la estación móvil a la red externa o conocida como red de paquetes de datos (*PDN – Packet Data Network*). Por último las políticas y función de reglas de carga (*PCRF – Policy - & Charging Rules Function*), detecta el flujo de servicios y asegura la política de carga. Para elementos que requieren políticas dinámicas o control de carga, un elemento de red llamado función de aplicaciones (*AF- Applications Function*) es provisto.

En cuanto a la arquitectura de LTE, la misma es muy compleja, en un diagrama completo se considerarían toda la Internet y otros aspectos de la conectividad de la red de apoyo, sin embargo en la Figura 6.4, se muestra la parte que interactúa más estrechamente con el equipo de usuario, en concreto se muestran las estaciones base y la interfaces entre estas y el EPC.



**Figura 6.4.** Arquitectura LTE.

### 6.11. LTE-M, sistema máquina a máquina (Machine to Machine - M2M) en LTE

Debido a que el Internet de las cosas y la redes máquina a máquina (*M2M - Machine to Machine*), está creciendo rápidamente, el sistema LTE está diseñado para transportar información a grandes velocidades en este tipo de redes y equipos.

Sin embargo existen varios requisitos que se deben cumplir si se desea que las redes celulares LTE, puedan ser utilizadas en las redes M2M, tales como:

- **Amplio espectro de dispositivos.-** cualquier red M2M en LTE, debe ser capaz de soportar una gran variedad de dispositivos, lo que conlleva que existan diferentes requerimientos en la red, por lo que el sistema M2M de LTE debe ser flexible.
- **Bajo costo de dispositivos.-** La mayoría de los dispositivos M2M deben ser pequeños y encajar en el equipo que es muy sensible a los costos. Con muchos sistemas M2M de bajo coste ya disponibles, LTE-M necesita proporcionar los beneficios de un sistema celular, pero a bajo costo.
- **Larga vida de la batería.-** muchos dispositivos M2M operarán en regiones en donde no existe fuentes de alimentación, como es el caso de zonas rurales, por lo que el sistema LTE-M, debe ser capaz de optimizar el uso de las baterías de dichos dispositivos.
- **Cobertura mejorada.-** las aplicaciones LTE-M, deberán funcionar en una variedad de ubicaciones, en donde posiblemente no exista una buena recepción, razón por la cual LTE-M debe ser capaz de operar en forma óptima en condiciones donde la señal no pueda recibirse adecuadamente.
- **Grandes volúmenes y bajas tasas de datos.-** es de esperarse que los volúmenes de datos

de los dispositivos remotos será enorme, razón por la cual LTE-M debe ser estructurado, tal que la red soporte gran cantidad de dispositivos conectados que pueden requerir solamente transmitir pequeñas cantidades de datos.

Considerando los requisitos anteriormente mencionados, algunas actualizaciones fueron introducidas en el sistema LTE-M, como se puede observar en la versión número 12 liberada por el 3GPP. Dichas actualizaciones significan que un módem M2M, puede estar costando entre un 40 o un 50% menos que el costo de un dispositivo LTE normal. A raíz de esto se ha creado una nueva categoría para definir estos nuevos equipos de usuario, conocida como la categoría 0, sin embargo es importante destacar que aún los módems M2M tienen capacidades limitadas en lo referente a:

- **Antenas.-** posee solamente una antena de recepción, a diferencia de las dos o más antenas que poseen otros dispositivos.
- **Tamaño de bloque de transporte.-** existe una restricción en cuanto al tamaño de bloque de transporte, debido a que los equipos M2M, pueden enviar o recibir hasta 1000 bits de datos de forma unicast por subtrama, lo que reduce la velocidad máxima a 1 Mbps tanto en UL como en DL.
- **Dúplex.-** los dispositivos full dúplex son soportados como una característica opcional, por lo que los tiempos de conmutación para transmisión y recepción aumentan.

## 6.12. LTE Avanzado

La nueva tecnología desarrollada bajo el auspicio de 3GPP, permite mayor velocidad entre DL y UL, entre las principales características que se prevé obtener con esta tecnología se encuentran (i) velocidades pico de datos, en DL 1Gbps, y en UL 500 Mbps, (ii) eficiencia del espectro: 3 veces mayor que LTE, (iii) eficiencia pico del espectro, en DL 30 bps/Hz, y en UL 15 bps/Hz, (iv) uso eficiente del espectro, debido al uso ancho de banda escalable, y a la agregación de espectro (utilización de espectro no contiguo sin utilizar), (v) baja latencia, con un tiempo de 5 ms para la transmisión de paquetes, (vi) compatibilidad, debido a que podrá interactuar con sistemas LTE y estándares 3GPP anteriores.

Para lograr las características anteriormente mencionadas, LTE Avanzado utiliza una serie de tecnologías que le permitirán alcanzar altas tasas de transferencia de datos, como OFDM y MIMO, dentro de esta última al igual que en 4G LTE existen algunas técnicas tales como:

- **Agregación de portadora (CA - Carrier Agregation).-** Como muchos operadores no

tienen suficiente espectro contiguo para proporcionar los anchos de banda requeridos para las velocidades de datos muy altas, un esquema conocido como agregación de portadoras se ha desarrollado. Utilizando esta tecnología los operadores son capaces de utilizar múltiples canales ya sea en las mismas bandas o diferentes áreas del espectro para proporcionar el ancho de banda requerido.

- **Multipunto coordinado (LTE CoMP).**- La interferencia de las células adyacentes junto con la baja calidad de la señal, produce reducción en las tasas de datos, por esto en LTE Avanzado se ha introducido un esquema conocido como multipunto coordinada.
- **Retransmisión LTE.**- LTE presenta un esquema de retransmisión, que permite que las señales sean retransmitidas por las estaciones remotas desde una estación base principal.
- **Dispositivo a Dispositivo (D2D - Device to Device LTE).**- Permite rápido acceso rápido a través de la comunicación directa de los equipos de usuario.

#### 6.12.1. Agregación de portadora (LTE CA)

Para lograr altas velocidades de datos es necesario aumentar los anchos de banda, que soportan una única portadora o canal, para lo cual se utiliza el método conocido como agregación de portadora, con el cual es posible utilizar más de una portadora, con lo cual se incrementa el ancho de banda y por lo tanto la transmisión. Dichos canales o portadoras pueden ser contiguos o estar en diferentes bandas. Es importante destacar además que CA es soportado tanto por FDD y TDD.

El objetivo de LTE Avanzado es permitir enlaces de 1Gbps en DL, pero para proporcionar tasas de datos altas se debe aumentar el ancho de banda utilizado, para lo cual existen dos formas en las que LTE Avanzado realiza la agregación de portadoras, Intra banda e Inter banda, mismas que son detalladas a continuación.

- **Intra banda.**- esta forma de agregación utiliza una única banda (portadora), y existen dos formas de realizarla, contigua y no contigua.
  - **Contigua.**- es la forma más fácil de realizar la agregación de bandas, debido a que las portadoras se encuentran adyacentes, con lo cual el ancho de banda total es formado por la unión de dichas portadoras.



**Figura 6.5.** Agregación de portadora Intra banda contigua.

- **No contigua.**- Aquí la señal multiportadora ya no puede ser tratada como una sola

señal y por lo tanto se requieren dos transceptores. Esto añade complejidad significativa, sobre todo a la UE donde el espacio, la energía y el costo son consideraciones principales.



**Figura 6.6.** Agregación de portadora Intra banda no contigua.

- **Inter banda no contigua.-** aquí se utilizan diferentes bandas, esta forma de agregación será de uso particular, debido a la fragmentación de las bandas, algunas de las cuales están a sólo 10 MHz de ancho. Por su parte el equipo de usuario requiere el uso de múltiples transceptores dentro del equipo, lo que repercute en el precio, el rendimiento y la potencia del mismo.



**Figura 6.7.** Agregación de portadora Inter banda no contigua.

Las normas actuales permiten la agregación de hasta cinco portadoras a 20 MHz, aunque en la práctica el límite práctico es de dos o tres portadoras. Dicha portadoras agregadas pueden ser transmitidas en paralelo a o desde el mismo terminal, lo que permite un rendimiento mucho más alto a obtener.

Existen 6 diferentes anchos de banda definidos por el número de portadoras agregadas. Aunque es importante mencionar que solamente las clases A, B y C se están usando, mientras que las clases D, E y F, se encuentran todavía en estudio. En la Tabla 7 se muestran las clases de ancho de banda A, B y C.

Clase de ancho de banda LTE	Ancho de banda (MHz)	Número de portadoras
A	≤100	1
B	≤100	2
C	100 - 200	2

**Tabla 6.7.** Clases de ancho de banda con agregación de portadora LTE [45]

Cuando las portadoras son agregadas, cada portadora es referenciada como un componente de portadora, existiendo para lo cual dos tipos.

- **Componente de portadora primario.-** es la portadora principal en cualquier grupo, existiendo una portadora primaria tanto para DL como para UL.
- **Componente de portadora secundario.-** pueden existir uno o más de estos componentes, y acompañan al componente primario para establecer el ancho de banda.

Cabe destacar que no existe una definición para escoger cuál será el componente de portadora

primario, tal es así que diferentes equipos de usuario pueden utilizar diferentes portadoras, por lo que dicha configuración la escoge el terminal de usuario y se determinará de acuerdo con la carga en las distintas portadoras, así como otros parámetros relevantes.

En resumen la asociación entre la portadora primaria en DL, junto con la portadora primaria en UL, forma una celda, como en el caso anterior no se ha definido la organización de dichas celdas. La información se señala al equipo de usuario como parte de la señalización general entre dicho terminal y la estación base.

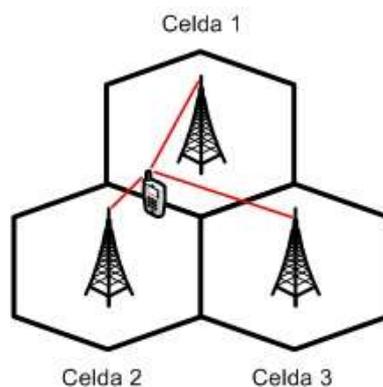
### 6.12.2. Multipunto Coordinado (LTE CoMP)

LTE CoMP, es una facilidad que está siendo desarrollada para LTE Avanzado, es esencialmente un conjunto de técnicas que habilitan la coordinación dinámica tanto en transmisión como en recepción de diferentes estaciones base. El objetivo es mejorar la calidad global para el usuario, así como mejorar la utilización de la red, cancelando la interferencia entre células, e ICI dentro de la señal útil, sobre todo en los bordes de las celdas donde el rendimiento puede degradarse.

Aunque como se mencionaba antes, LTE CoMP es un complejo conjunto de técnicas, dichas técnicas presentan algunas ventajas entre las cuales se tienen:

- **Mejor utilización de la red.-** permitiendo conexiones a muchas estaciones base a la vez, además de poder transmitir los datos a través de las estaciones de base menos cargadas, para una mejor utilización de los recursos.
- **Rendimiento mejorado en recepción.-** el uso de varias celdas por conexión hace que la recepción general mejore, y a su vez se reduzca el número de llamadas caídas.
- **Recepción múltiple en equipo de usuario.-** la recepción conjunta de múltiples estaciones base utilizando LTE CoMP, permite que la potencia total recibida en el equipo de usuario aumente.
- **Reducción de interferencia.-** mediante el uso de técnicas combinadas, es posible utilizar la interferencia constructiva, en vez de la destructiva, reduciendo así los niveles de interferencia.

LTE CoMP, requiere una estrecha coordinación entre varias estaciones base que están separadas geográficamente, de tal forma de coordinar sus transmisiones y permitir que el equipo de usuario que se encuentre por ejemplo en el borde de una celda, pueda ser atendido en su momento por dos o más estaciones base al mismo tiempo, con el objetivo de mejorar la recepción de las señales emitidas. En la Figura 6.8, se ilustra el concepto.



**Figura 6.8.** Concepto de LTE CoMP.

Esencialmente LTE CoMP, se divide en dos categorías principales que son: Procesamiento conjunto, y Programación coordinada o formación de haz.

- **Procesamiento conjunto.-** ocurre cuando existe coordinación entre varias estaciones base, que están simultáneamente transmitiendo o recibiendo desde los equipos de usuario.
- **Programación coordinada.-** también conocida como formación de haz es una forma de coordinación en donde el equipo de usuario está transmitiendo con un solo punto de transmisión – recepción (estación base) Sin embargo, la comunicación se realiza con un intercambio de control entre varias entidades coordinadas.

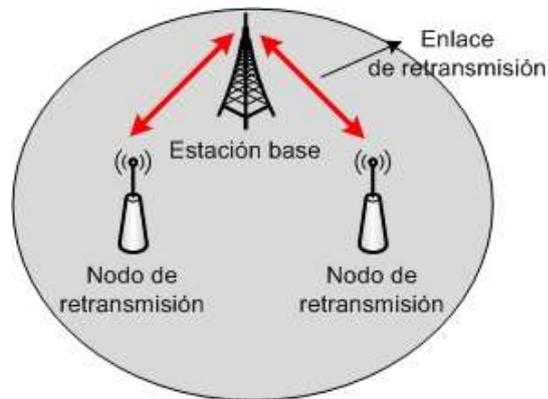
Para conseguir cualquiera de estos modos, se requiere retroalimentación muy detallada sobre las propiedades del canal de una manera rápida para que los cambios se pueden hacer. El otro requisito es para una coordinación muy estrecha entre las estaciones base, a fin de facilitar la combinación de los datos o la conmutación rápida de las células. Cabe destacar que los modos anteriormente descritos son utilizados tanto para el UL como para el DL.

### 6.12.3. Retransmisión LTE

El objetivo de la retransmisión LTE es mejorar la cobertura y la capacidad. La retransmisión LTE es diferente al uso de un repetidor que retransmite la señal. En la retransmisión LTE el equipo de usuario se comunica con el nodo retransmisor, que a su vez se comunica con la estación base. Dicho nodo retransmisor puede soportar funcionalidades de capas superiores como decodificar los datos de usuario desde la estación base, y recodificar los datos antes de transmitirlos al equipo de usuario.

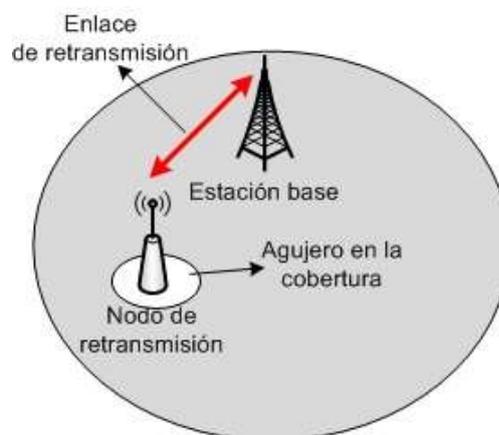
Cabe destacar que la retransmisión LTE es una infraestructura de retransmisión fija sin una conexión cableada de respaldo, que retransmite mensajes entre la estación base y los equipos de usuario a través de una comunicación multisalto. Existen algunos escenarios donde la retransmisión LTE es ventajosa, como por ejemplo:

- **Incrementar la densidad de red.-** los nodos de retransmisión LTE pueden ser utilizados en situaciones donde el objetivo es incrementar la capacidad de la red en situaciones donde el objetivo es aumentar la capacidad de la red mediante el aumento del número de estaciones base, con lo cual se asegura que los usuarios reciban niveles óptimos de señal. Dichos nodos de retransmisión son fáciles de instalar, puesto que no requieren respaldo separado y son pequeños, lo que les permite ser instalados en muchas áreas como paredes, focos de alumbrado público, etc. En la Figura 6.9, se ilustra el concepto.



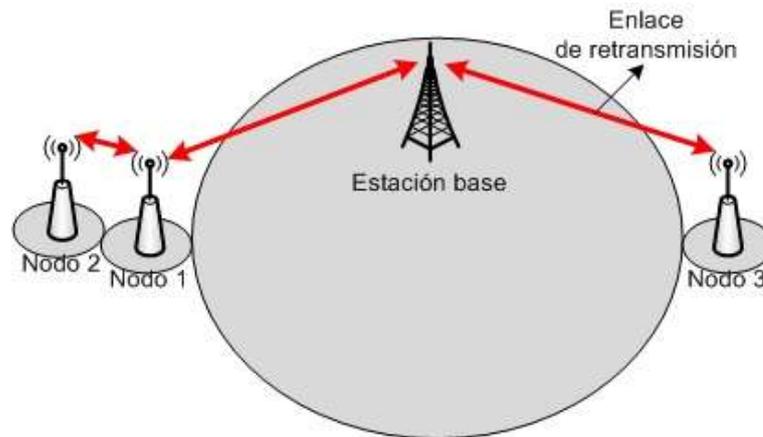
**Figura 6.9.** Retransmisión LTE usada para incrementar la densidad de red.

- **Extensión de la cobertura de red.-** La retransmisión LTE puede ser usada como un método conveniente para llenar pequeños agujeros en la cobertura. Sin necesidad de instalar una estación base completa, el retransmisor se puede instalar de forma rápida para cubrir dichos agujeros. En la Figura 6.10, se ilustra el concepto.



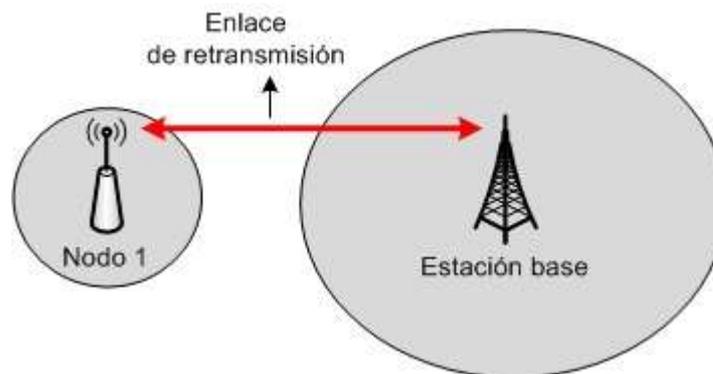
**Figura 6.10.** Retransmisión LTE usada para rellenar agujeros en la cobertura de red.

Nodos de retransmisión adicionales se pueden instalar para incrementar la cobertura del área principal, tal concepto se ilustra en la Figura 6.11.



**Figura 6.11.** Retransmisión LTE usada para extender la cobertura de red.

- **Implantación rápida de la red.-** sin la necesidad de instalar respaldos o mástiles, la retransmisión LTE permite proveer de un método fácil para extender la cobertura durante la implantación inicial de una red. Luego se podrán adherir más estaciones base a medida que los volúmenes de tráfico aumenten. La Figura 6.12, ilustra el concepto.



**Figura 6.12.** Retransmisión LTE usada para implantar de forma rápida la red.

#### A. Retransmisión LTE full y half-duplex

Los nodos de retransmisión LTE pueden operar en dos escenarios, half dúplex y full dúplex.

- **Half dúplex.-** este sistema brinda comunicación en ambos sentidos, pero no simultáneamente por lo que la transmisión debe ser multiplexada en tiempo. Para el retransmisor LTE se requiere una adecuada planificación, debido a que se tiene que coordinar la asignación de recursos a los equipos de usuario en UL, y la estación base asignada en el DL. Esto se puede lograr utilizando soluciones pre asignadas, o en su defecto soluciones más dinámicas que requieren de cierto grado de inteligencia para permitir una comunicación más flexible y óptima.
- **Full dúplex.-** en este sistema se puede transmitir y recibir al mismo tiempo, en los retransmisores LTE a menudo en la misma frecuencia. Los nodos de retransmisión reciben la señal, la procesan y luego la transmiten en la misma frecuencia con un pequeño retraso.

## B. Tipos de retransmisión LTE

Existen algunos tipos de retransmisión LTE que pueden ser usadas, sin embargo es conveniente primero describir los diferentes modos de operación existentes, mismos que dependen de la frecuencia portadora en la que operan, así se tienen el modo dentro de banda (Inband), y el modo fuera de banda (Outband).

- **Modo dentro de banda (Inband).**- se dice que un retransmisor LTE está en modo dentro de banda, si el enlace entre la estación base y el nodo de retransmisión están en la misma frecuencia portadora que el enlace entre el nodo de retransmisión y el equipo de usuario.
- **Modo fuera de banda (Outband).**- si el enlace entre la estación base y el nodo de retransmisión no están en la misma frecuencia portadora que el enlace entre el nodo de retransmisión y el equipo de usuario.

En lo referente a los tipos de retransmisión, existen dos de estos, aunque con subdivisiones que son detalladas a continuación.

- **Nodo de retransmisión LTE Tipo 1.**- controlan las celdas con su propia identidad, incluyendo la transmisión de sus propios canales de sincronización y símbolos de referencia. Este tipo de retransmisión permite transmisión half dúplex con transmisiones Inband. Dentro de esta categoría se pueden observar dos subtipos.
  - **Tipo 1.a.**- los nodos de retransmisión de este tipo operan en modo Outband, con un modo de transmisión full dúplex.
  - **Tipo 1.b.**- aquí los nodos de retransmisión operan en modo Inband, y su funcionamiento es similar al de las femtoceldas.
- **Nodo de retransmisión LTE Tipo 2.**- no tienen su propia identidad de celda, por lo que se ven como la celda principal, aquí los equipos de usuario no son capaces de identificar a un nodo de retransmisión presente dentro de la celda principal. La información de control puede ser transmitida desde la estación base, mientras que los datos de usuario son transmitidos desde el nodo de retransmisión.

### 6.12.4. Dispositivo a Dispositivo (LTE Device to Device - D2D)

Uno de los esquemas que está siendo investigado y considerado para 4G LTE Avanzado es el concepto de LTE D2D, puesto que es una forma de comunicación directa entre equipos de usuario que puede ser útil en casos de emergencia en donde no exista la infraestructura de red adecuada. Dentro de los beneficios de las comunicaciones LTE D2D se pueden destacar reducción de la interferencia, el uso de espectro no licenciado, rapidez en la transferencia de

datos, ahorro de energía, entre otras, con lo cual se podría transferir datos sin necesidad de utilizar la red celular, evitando así los problemas de sobrecarga de la red. Sin embargo, si se cuenta con infraestructura celular, esta podría utilizarse para el descubrimiento de pares, la sincronización, la prestación de la identidad y la información de seguridad. Básicamente LTE D2D es un concepto similar al de Bluetooth, pero con un alcance de cobertura mayor.

### 6.13 4G LTE como tecnología sustitutiva a la solución de TDT propuesta

Uno de los inconvenientes que presentan las bandas para la transmisión de TV UHF/VHF, es la congestión de las mismas en muchos países latinoamericanos, lo que se convierte en un problema para la introducción de nuevos servicios. Es por esto que al igual que ya se ha hecho en casi toda Europa, se llevará a cabo en América Latina el proceso de transición desde la televisión analógica a la digital (apagón analógico), el mismo que iniciará en 2015 y se prevé termine en 2020.

Este apagón analógico permitirá entre otras cosas liberar frecuencias, utilizar una potencia de transmisión menor, tener un mayor control sobre la calidad de funcionamiento de los canales, además de comprimir datos utilizando técnicas de compresión mejoradas, ocupando eficientemente el espectro y permitiendo que cinco canales digitales sean provistos en la misma cantidad de espectro que un canal analógico [6]. También los sistemas digitales permitirán la adición de servicios de datos auxiliares como corrección de errores, redes de frecuencia única (SFN), procesos de sintonización automática o semiautomática, entre otros.

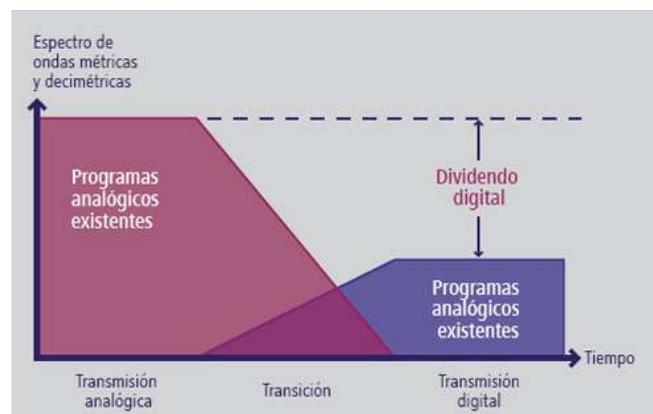
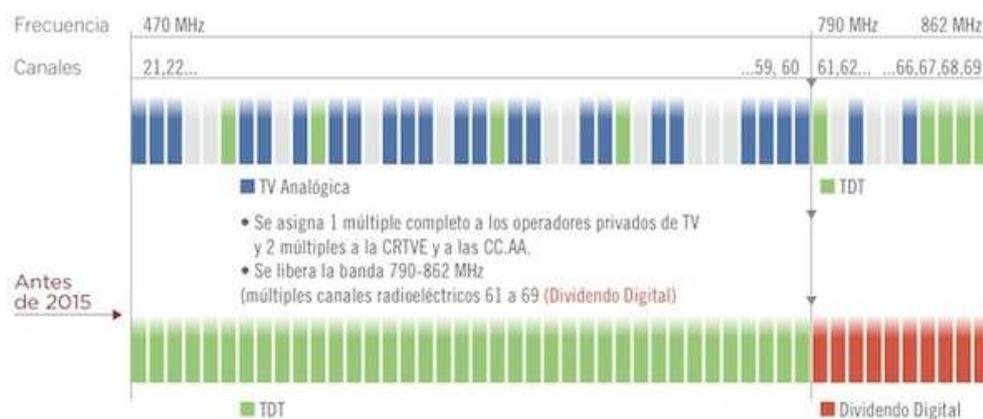


Figura 6.13. Espectro del dividendo digital [6]

La cantidad de espectro liberada en el apagón analógico (parte alta de la banda UHF) será asignada mediante el uso del dividendo digital para brindar servicios de banda ancha móvil (4G), debido a que esta porción de espectro tiene mejores propiedades de propagación y penetración que las bandas más altas utilizadas en la actualidad para las comunicaciones móviles inalámbricas, además que presentan un gran potencial para el suministro de un amplio

rango de servicios en movilidad. En este sentido la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es el ente que controla la ordenación de las bandas de radio a nivel mundial, mediante la división del globo terráqueo en 3 regiones: Región 1 que comprende Europa, África y el Norte de Asia; Región 2 América del Norte, América del Sur y Groenlandia; y Región 3 Pacífico y sur de Asia.

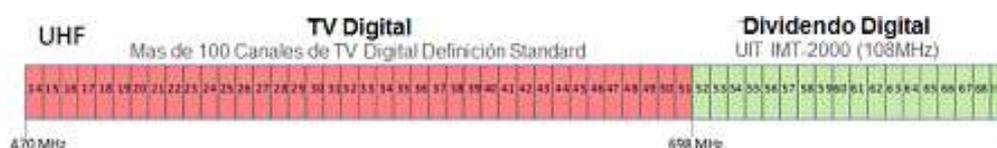
Inicialmente en la Región 1 según el Plan de Ginebra de 2006, se acordó el uso de toda la banda UHF 470-862 MHz (canales 21 al 69) para brindar servicios primarios de TV analógica, pero posteriormente en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007 (CMR-07) se decidió que en la subbanda de 790-862 MHz (canales 61 al 69; espectro de 800 MHz) se compartan las emisiones de TDT junto con los servicios móviles para telefonía.



**Figura 6.14.** Bandas UHF para la Región 1 de la UIT del dividendo digital [46]

Sin embargo los países de la Unión Europea decidieron reordenar el uso de esas frecuencias, dejando la subbanda de 790-862 MHz íntegramente para brindar servicios 4G y desplazaron las emisiones de TDT a la parte inferior de la banda UHF. A esto se le conoce como el primer dividendo digital. Pese a esto en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2012 (CMR-12) se aprobó un segundo dividendo digital en la subbanda de frecuencias de 698-790 MHz (canales 50 al 60; espectro de 700 MHz), por lo que las emisiones de TDT quedaron comprendidas entre las frecuencias 470-698 MHz (canales 21 al 60).

Por su parte para la Región 2 se definió la banda UHF 470-698 MHz (canales 14 al 51) para servicios de TDT, y al igual que en Europa la CMR-07 decidió dejar la subbanda de 698-862 MHz (canales 52 al 69; espectro de 700 MHz) para servicios 4G.



**Figura 6.15.** Bandas UHF para la Región 2 de la UIT [47]

Al igual que la solución de TDT propuesta, la tecnología 4G LTE se utilizará para mejorar la cobertura en las zonas rurales, sin embargo la propuesta de TDT ofrece un gran porcentaje de penetración y costos de despliegue más baratos que 4G LTE debido a que puede reutilizar la infraestructura existente de la TV analógica y/o digital, aumentando la eficiencia de transmisión y maximizando la cobertura en condiciones adversas. En lo referente a características técnicas, a continuación se presenta en la Tabla 6.8 una comparativa entre las dos tecnologías estudiadas.

Parámetros	DVB-RCT2	4G LTE
Ancho de banda	6, 7, 8 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
Esquemas de Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM, <b>256QAM</b>	QPSK, 16QAM, 64QAM
Máxima velocidad DL	37,88 Mbps (256 QAM)	Valores teóricos 326,5 Mbps, con MIMO 4x4 (64 QAM) 172,8 Mbps con MIMO 2x2 (64 QAM)
Velocidad utilizada en DL	25,52 Mbps (64 QAM <sup>3</sup> / <sub>4</sub> )	20 Mbps (en el caso de Ecuador, utilizando 64 QAM)
Máxima velocidad UL	28,43 Mbps (64 QAM <sup>5</sup> / <sub>6</sub> )	86,5 Mbps (64 QAM)
Velocidad utilizada en UL	5,64 Mbps (QPSK <sup>1</sup> / <sub>2</sub> )	4 Mbps (en el caso de Ecuador, utilizando QPSK)
GI	1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128	El tamaño del prefijo cíclico (CP) se escoge adecuadamente para que sirva como GI. Para LTE el CP dura 4,69 us.
Metodología de acceso DL	OFDM	OFDMA
Metodología de acceso UL	OFDMA	SC-FDMA
Portadoras	BS1 con 1, BS2 con 4 y BS3 con 29 portadoras, con 1708, 427 y 59 subcanales respectivamente	2048 portadoras
Distancia entre portadoras	CS1, CS2 y CS3 con 1, 2 y 4 kHz de separación respectivamente	15kHz
Transmisión de Contenidos IP	IP → GSE	Soporte de IPv4 e IPv6
FEC	LDPC + BCH 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6	Códigos concatenados

**Tabla 6.8.** Tabla comparativa DVB-RCT2 y 4G LTE

Como se puede observar en la tabla anterior, DVB-RCT2 utiliza un esquema de modulación de mayor jerarquía (256-QAM) comparado con el máximo utilizado en 4G LTE (64-QAM), lo que teóricamente representa que las velocidades de transmisión de 4G LTE sean superiores a las de la tecnología de TDT propuesta. Sin embargo, las velocidades de transmisión utilizadas en la realidad, demuestran que DVB-RCT2 es más rápido que el estándar 4G LTE tanto en DL como

en UL, presentando un aumento de 5,52 Mbps y de 1,64 Mbps respectivamente, con respecto a la tecnología celular. Por otro lado, para proveer inmunidad contra ISI, tanto DVB-RCT2 como 4G LTE utilizan GI, en donde para la primera tecnología se tienen algunos valores que depende del modo de operación elegido en TDT, mientras que para redes 4G el valor es fijo, lo que tiene relación además con el número de portadoras y la separación entre estas que se utiliza en cada tecnología. Con respecto a la metodología de acceso tanto para DL como para UL, cabe destacar que tanto para DVB-RCT2 como para 4G LTE, se utilizan técnicas basadas en OFDM, en donde para la tecnología 4G el uso del modo de transmisión SC-FDMA, mantiene constante el nivel de potencia de operación de los equipos móviles, con lo cual el rendimiento de la batería no se ve afectado, permitiendo que dichos equipos operen tan eficientemente como sea posible. Sin embargo para DVB-RCT2 esto no es una limitante debido a que el equipo de usuario en este caso es un decodificador (set-top-box), que permanecerá estático en el hogar del usuario, por lo que el mismo no presenta problemas con respecto a la batería, con lo cual el uso de OFDMA es adecuado. Es importante recalcar además que ambas tecnologías soportan transmisión de contenidos IP. Aunque en lo que respecta a esquemas de corrección de errores (FEC) DVB-RCT2 utiliza esquemas más robustos como LDPC y BCH que proveen de una importante mejora comparado con la codificación convolucional utilizada en la tecnología 4G.

Por lo anteriormente expuesto, se escogerá la solución de TDT propuesta para la provisión de Internet a zonas rurales de Latinoamérica, considerando en primer lugar que el estándar DVB-RCT2 propuesto es más rápido que la tecnología 4G LTE, y en segundo lugar que el equipamiento que el usuario necesita en el caso de la tecnología celular de cuarta generación, es más costoso, mientras que en el caso de la tecnología DVB-RCT2, bastaría con tener una televisión que tenga incorporado el decodificador de TDT con canal de retorno, o en su defecto que a un televisor convencional se le conecte a dicho decodificador, con lo cual el manejo del equipo no supondría problema alguno para los usuarios, además que en una televisión se minimizan o eliminan problemas en cuanto al desgaste de componentes, como por ejemplo la batería en un teléfono móvil. Por otro lado, el objetivo de esta tesis doctoral es proponer una tecnología de TDT de mejores prestaciones que tecnologías precedentes de su misma clase, misma que permita implementar una solución de conectividad a Internet en zonas rurales minimizando los costes de conexión por usuario, a más de reducir la implementación de infraestructura de telecomunicaciones para tal efecto, debido a como se comentó anteriormente la reutilización de la infraestructura existente de la TV analógica y/o digital.

# Capítulo 7

## Conclusiones

### 7.1. Conclusiones

- ✓ Los sistemas de TDT ofrecen gran porcentaje de penetración y costos de despliegue más baratos, debido a la reutilización de infraestructura existente de la TV analógica y/o digital. Siendo además una interesante alternativa para brindar acceso a Internet, puesto que una vez que se tenga desplegada la infraestructura de TDT para recepción fija, se podrá reutilizar esta para proporcionar servicios de conectividad a Internet a zonas rurales.
  
- ✓ DVB-RCT2 ofrecerá un canal de retorno inalámbrico para la TDT, estará basado en DVB-T2 y adoptará características de DVB-RCT que harán de este un sistema flexible y robusto. De DVB-T2 utilizará el esquema de modulación 256-QAM lo que mejorará la capacidad de transmisión; usará los tamaños extendidos de FFT 16K y 32K con lo que se podrá ampliar la separación de los transmisores y por ende la cobertura; propondrá el manejo del mecanismo PAPR de Tonos Reservados que es compatible con la técnica de constelaciones rotadas con lo cual se aumentará la robustez de la señal, aunque en enlace ascendente no presenta el mismo rendimiento que en el enlace descendente puesto que no se utilizan todas las portadoras. Se usarán también las tramas FEF para brindar servicios adicionales, y se tendrá la capacidad de ofrecer hasta 4 canales de televisión en alta definición (HD) en un mismo multiplex. Con respecto a DVB-RCT adoptará su arquitectura, pero a diferencia de este, una nueva funcionalidad de DVB-RCT2 es que podría funcionar en el mismo canal que en el enlace descendente, pero perdiendo algo de capacidad. Por lo que mencionado anteriormente con DVB-T2 se pueden conseguir prestaciones muy superiores al estándar DVB-RCT.
  
- ✓ Para el envío de las peticiones de usuario hacia la estación base (enlace ascendente - UL), DVB-RCT2 utilizará un canal de retorno, adaptando la arquitectura de DVB-RCT a RCT2, mientras que para el caso contrario (enlace descendente - DL) se usará un canal de difusión basado en la arquitectura T2, lo que permitirá que DVB-RCT2 tenga áreas de cobertura

similares a las obtenidas mediante DVB-T2, asumiendo recepción con antena fija ubicada en el tejado del usuario y teniendo servicios de interacción bajos.

- ✓ Las características anteriormente mencionadas permiten que DVB-RCT2 presente mejoras con respecto a DVB-RCT en lo referente a capacidad, mismas que se midieron mediante la comparación de la cantidad de Mbps que pueden ser transmitidos por cada tecnología, es así que al estar DVB-RCT2 basado en DVB-T2, se tienen capacidades de transmisión superiores a los otros estándares de TDT llegando a tener hasta 37,88 Mbps comparado con los 19,21 Mbps obtenidos por DVB-RCT.
- ✓ En lo referente a las mejoras en cuanto a relación portadora a ruido (CNR), se buscó siempre el menor valor para un mismo MODCOD, pudiendo observar que T2/RCT2 presentan la CNR más baja de todas las tecnologías estudiadas en esta tesina de máster, por ejemplo para un MODCOD robusto como QPSK  $\frac{1}{2}$ , DVB-RCT2 presenta una CNR de sólo 2,67 mientras que RCT tiene un valor de 4,6.
- ✓ Las mejoras en cuanto a cobertura, se obtuvieron mediante el análisis de las huellas generadas por cada tecnología, es así que se puede notar claramente en la gráficas conseguidas para esta tesis de doctorado que la cobertura de las tecnologías T2/RCT2, es superior a las de las tecnologías ISDB-Tb y DVB-RCT, esto en parte debido a que un valor de CNR reducido permite aumentar la cobertura.
- ✓ Para los ejercicios de cobertura e interferencia se ha considerado como escenario rural, el ubicado en la provincia de Chimborazo en donde se utilizaron como estaciones base de radiodifusión de TV las torres ubicadas en los cerros de dicha provincia en donde actualmente se encuentran transmisores de TV analógica. Para obtener propiamente las zonas de cobertura e interferencia se tomaron en cuenta los umbrales de CNR así como los valores de intensidad de campo previamente calculados, mismos que fueron cargados en el software ICS Telecom, con el cual se obtuvieron las coberturas del estándar de TV analógica y de la tecnología de TDT utilizada en Ecuador (ISDB-Tb), además de la cobertura e interferencias en enlace descendente de DVB-T y DVB-T2 en SFN, y la cobertura e interferencias en enlace ascendente de DVB-RCT y DVB-RCT2, en donde se estudió de una forma específica el comportamiento del estándar DVB-RCT2 tanto en canal de difusión como en canal de retorno, obteniendo resultados prometedores como se mencionó anteriormente en lo concerniente a mejoras en capacidad, CNR y cobertura.

- ✓ Mediante la evaluación ex ante de la posible implementación de la solución de TDT propuesta, se llegó a concluir que con esta nueva tecnología, se podría llegar a reducir la brecha digital existente en zonas donde la conexión a Internet es deficiente, permitiendo la utilización de aplicaciones TIC como aprendizaje, salud, gobierno en línea en zonas rurales, generando igualdad de oportunidades y fomentando la participación ciudadana, a más de reducir los costos de conexión a Internet en zonas rurales.
- ✓ Al realizar el análisis comparativo entre la tecnología de TDT propuesta y la posible tecnología sustitutiva a esta (4G LTE), se determinó que la provisión de Internet a zonas rurales de Latinoamérica, sería más efectiva, económica, fácil de implementar, y más amigable para el usuario, considerando en primer lugar que el estándar DVB-RCT2 propuesto es más rápido que la tecnología 4G LTE, y en segundo lugar que el equipamiento que el usuario necesita, en el caso de la tecnología celular de cuarta generación, es más costoso, mientras que en el caso de la tecnología DVB-RCT2, bastaría con tener una televisión que tenga incorporado el decodificador de TDT con canal de retorno, o en su defecto que a un televisor convencional se le conecte a dicho decodificador, con lo cual el manejo del equipo no supondría problema alguno para los usuarios, además que en una televisión se minimizan o eliminan problemas en cuanto al desgaste de componentes, como por ejemplo la batería en un teléfono móvil.

## Referencias

- [1] Royal Pingdom, “Internet 2012 in numbers,” 2013. [En línea]. Disponible: <http://royal.pingdom.com/2013/01/16/internet-2012-in-numbers/>
- [2] Miniwatts Marketing Group, “Internet Worlds Stats Usage and Population Statistics,” 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.internetworldstats.com/stats.htm>.
- [3] UNESCO, Conferencia General 36ª reunión, 36C/54, “Reflexión y Análisis sobre Internet”, Suiza, 2011.
- [4] UIT, “Informe sobre el Desarrollo Mundial de las Telecomunicaciones/TIC de 2010,” Verificación de los objetivos de la CMSI, Examen Intermedio, Resumen Ejecutivo, pp. 11, Suiza, 2010.
- [5] P. Rojas, “La Televisión Digital Terrestre y su incidencia en las estaciones televisivas ecuatorianas”. Advicom Cia. Ltda, Ecuador, 2012.
- [6] A. Kholod y J. Lewis, “El dividendo digital: oportunidades y retos,” *Actualidades de la UIT*, no. 1, pp. 1, 2010.
- [7] CONATEL, “Resolución RTV-38-02-CONATEL-2012”, Ecuador, 2012.
- [8] CONARTEL “Norma Técnica para el Servicio de Televisión Analógica y Plan de Distribución de Canales” (Resolución No.1779-CONARTEL-01), Ecuador, 2001.
- [9] D. Cruz, G. Olmedo, y R. León, “Análisis de disponibilidad de espectro radioeléctrico para la transición de Televisión Analógica a Televisión Digital Terrestre en el Ecuador”. Escuela Superior Politécnica del Ejército, 2011.
- [10] Area 25 IT, “Conexión a Internet Vía Satélite,” 2013. [En línea]. Disponible: <http://www.conexioninternetviasatelite.com/>
- [11] J. Peñarredonda. “Las 13 cosas que usted tiene que saber sobre 4G,” 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.enter.co/colombiadigital/las-13-cosas-que-usted-tiene-que-saber-sobre-4g/>

- [12] About.com, “Diferencias entre 3G y 4G, tipos que hay y cuál conviene,” 2013. [En línea]. Disponible: <http://windowsespanol.about.com/od/RedesYDispositivos/a/Internet-Movil.htm>
- [13] J. Ruiz, “802.16 vs WIMAX,” *Tendencias*, no. 156, pp. 64, Abril-Mayo 2006.
- [14] DVB, “DVB Fact Sheet Digital Terrestrial Television DVB-T”, DVB Project Office, Agosto 2012.
- [15] A. C. Guedes de Carvalho Reis y P. R. de Lira Gondim, “Performance Evaluation of the DVB-RCT Standard for Interactive Services,” *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 57, no. 4, pp. 3,7,8,9, Diciembre 2011.
- [16] D. Gómez-Barquero, J. López-Sánchez, N. Cardona, Eladio Gutiérrez M., “Funcionalidades avanzadas de DVB-T2 para el diseño de redes de televisión digital terrestre en Latinoamérica”. *Hologramática*, vol.19, nº. 4, pp.6-19, Noviembre 2013.
- [17] DVB, “DVB Fact Sheet 2<sup>nd</sup> Generation Terrestrial DVB-T2”, DVB Project Office, Enero 2013.
- [18] DVB Project Office. DVB-T.Digital Terrestrial Television, Agosto 2012.
- [19] TR 101 190 v1.1.1, “Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation Guidelines for DVB Terrestrial Services; Transmission Aspects”, Diciembre 1997.
- [20] M. Fuentes, “Evaluación de prestaciones (rendimiento e interferencias) del estándar de Televisión Digital Terrestre ISDB-Tb, mediante simulaciones y mediciones,” Universidad Politécnica de Valencia, España, Marzo 2013.
- [21] ETSI, EN 301 958 v1.1.1, “Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction Channel for Digital Terrestrial Television (RCT) incorporating Multiple Access OFDM,” Marzo 2002.
- [22] F. Fraile Gil y D. Gómez-Barquero, “On the Capability of DVB-RCT to provide Interactive Services,” Universidad de Gävle, Suecia, Marzo 2004.
- [23] European Broadcasting Union, “Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2,” EBU-TECH 3348, Mayo. 2012.
- [24] L. Eizmendi, et al., “DVB-T2: The Second Generation of Terrestrial Digital Video Broadcasting System,” *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 60, no. 2, pp6-13, Junio 2014.
- [25] ETSI, TS 102 831 v1.2.1, “Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2),” Agosto. 2012.

- [26] L. Konrad, D. Gómez-Barquero, C. Knuttson, y M. Petrov, “Overhead Reduction Methods in DVB-NGH,” Next Generation Mobile Broadcasting, ch. 17, pp, 498-499, 2013.
- [27] SUPERTEL, “Informe para la definición e implementación de la Televisión Digital Terrestre en Ecuador”, Ecuador, 2010.
- [28] ABNT, “Televisión Digital Terrestre – Guía de operación Parte1: Sistema de transmisión – Guía para implementación de ABNT NBR 15601:2007”, Agosto 2008.
- [29] iTEAM, “CALCULO\_CAMPO ELÉCTRICO\_ANE-DVB-T2.xls,” Universidad Politécnica de Valencia, 2013
- [30] TeamCast, “Universal DVB-T2 Calculator”, DVB-T2 Capacity Evaluator, Diciembre 2012.
- [31] SENATEL, “Metodología de asignación de frecuencias temporales para la operación de estaciones de Televisión Digital Terrestre,” Informe CITDT-GATR-2012-005, Ecuador, 2012.
- [32] CONATEL, “Plan Maestro de transición a la Televisión Digital Terrestre” Resolución RTV-681-24 - CONATEL-2012, Ecuador, 2012.
- [33] CONATEL-SENATEL, “Plan Nacional de Frecuencias Ecuador 2012,” Ecuador, Diciembre 2012.
- [34] I. Vásquez, “Propuesta de reordenamiento de canales de televisión abierta a nivel nacional, conforme la nueva norma técnica de televisión analógica”. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, Septiembre 2007.
- [35] INEC “Población por sexo, total de hogares según provincia, parroquia y cantón de empadronamiento, Promedio de personas por hogar, según provincia,” Unidad de Procesamiento-Dirección de estudios analíticos estadísticos, Ecuador, 2011.
- [36] E. Abdala, “Manual para la elaboración de impacto en programas para jóvenes, Organización Internacional del Trabajo, CINTERFOR, 2004.
- [37] R. Bello, “Curso Taller evaluación de impacto”, CEPAL, Chile, 2009.
- [38] C. Aedo, “Evaluación del impacto,” Cristián Aedo, CEPAL, Chile, 2005.
- [39] P. Gertler et al, “La Evaluación de impacto en la práctica”. Banco Mundial, Estados Unidos de América, 2011.

- [40] F. Viteri, “Análisis del impacto de la implementación de la red internet en el sistema educativo fiscal primario del cantón Pelileo para el periodo 2005 – 2010,” Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2012.
- [41] Área tecnología, LTE y LTE Advanced. [En línea]. Disponible: <http://www.areatecnologia.com/tecnologia/lte.html>
- [42] CK Toh, “4G LTE Technologies: System Concepts”. ALICO Systems Inc, Estados Unidos de América, 2011.
- [43] E. Garro, “Estudios de convivencia de servicios de TDT con servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz,” Universidad Politécnica de Valencia, España, Marzo 2014.
- [44] CONATEL, “Resolución TEL-804-29-CONATEL-2012”, Ecuador, 2012.
- [45] Radio-electronics “LTE tutorial,” 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.radio-electronics.com/info/cellularcomms/lte-long-term-evolution/lte-ofdm-ofdma-scdma.php>
- [46] Banda Ancha EU, “Cómo la TDT podría impulsar el despliegue del 4G,” 2013. [En línea]. Disponible: <http://bandaancha.eu/articulos/como-tdt-podria-impulsar-despliegue-4g-8701>
- [47] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España, “Televisión Digital,” 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.televisiondigital.gob.es/DividendoDigital/Paginas/que-es-dividendo-digital.aspx>