

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
EN TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
EN TELECOMUNICACIONES**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL
MULTISITIO CON CAPACIDADES DE RASTREO VEHICULAR
AUTOMÁTICO Y CONTROL DE FLOTAS**

AUTOR: DANIEL ANDRÉS GUEVARA HARO

SANGOLQUÍ – ECUADOR

MARZO DE 2013

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

DANIEL ANDRÉS GUEVARA HARO

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL MULTISITIO CON CAPACIDADES DE RASTREO VEHICULAR AUTOMÁTICO Y CONTROL DE FLOTAS”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 7 de Marzo de 2013

Daniel Andrés Guevara Haro

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Daniel Andrés Guevara Haro

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL MULTISITIO CON CAPACIDADES DE RASTREO VEHICULAR AUTOMÁTICO Y CONTROL DE FLOTAS”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 7 de Marzo de 2013

Daniel Andrés Guevara Haro

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

DR. GONZALO OLMEDO
ING. DARWIN AGUILAR

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL MULTISITIO CON CAPACIDADES DE RASTREO VEHICULAR AUTOMÁTICO Y CONTROL DE FLOTAS”, realizado por Daniel Andrés Guevara Haro, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

Sangolquí, 7 de Marzo de 2013

DR. GONZALO OLMEDO
DIRECTOR

ING. DARWIN AGUILAR
CODIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero y eterno agradecimiento a todos los que aportaron en mi formación personal y profesional en estos años, como son mis padres, hermanos, y mi familia.

También quiero agradecer a los profesores del departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE, quienes han sido más que educadores y orientadores, amigos con quienes he podido compartir experiencias que han contribuido con mi formación personal y profesional. Al Dr. Olmedo he Ing. Aguilar, por su paciencia y confianza en mí, y a quiénes estimo por su colaboración de esta tesis.

A todo el personal de Maxi Distribuciones Cía. Ltda. y RACOMDES S.A., con quienes hemos crecido y vemos un futuro prometedor por el cual hay que trabajar arduamente, motivo del presente proyecto de grado.

No pueden faltar mis amigos, con quienes estos largos años universitarios han sido llenos de aventuras, alegrías, experiencias, locuras, risas, y apoyo en todo momento bueno o malo. Con ustedes este largo camino fue lleno de momentos inolvidables que perdurarán en la memoria de todos.

DEDICATORIA

A mi madre Ximena, por su apoyo incondicional en todo momento, por sus consejos, sus valores y su sacrificio sin importar los medios o circunstancias, pero sobre todas las cosas, por su infinito amor. ¡Gracias por todo, esta obra va por ti!

A mi padre Marco, quién me guió y es el influyente sobre el cual escogí mi carrera, y a quién agradezco por la oportunidad de realizar el presente proyecto de grado. Gracias a la confianza que depositó en mí he crecido y marcado mi camino. Me enseñó el mundo y me brindó la oportunidad de recorrerlo para ganar una visión amplia y diferente. Su convicción, tenacidad y sus valores han sido, son y serán mi motivación y ejemplo a seguir.

A mis hermanas Carolina y Anabel, porque para ellas la culminación de ésta etapa universitaria significa también un nuevo reto en nuestras vidas personales. Sin ustedes, simplemente la vida no sería igual, y tú Anabel, la más pequeña, llegaste a iluminar mi vida con amor. ¡Te amo píoquita!

A mis familiares, como mis tíos Ángel y Germán, mi abuelitos Ángel y Nulbia, que siempre han estado pendientes de mí y me han apoyado en todo sentido a lo largo de este proceso.

PRÓLOGO

El presente proyecto de grado muestra el diseño e implementación de un sistema de radio troncalizado digital para las empresas RADIOCOMUNICACIONES DE LOS ANDES RACOMDES S.A. y MAXI DISTRIBUCIONES Cía. Ltda.

La importancia de la innovación en las telecomunicaciones y un mercado exigente de crecimiento constante llevaron a que las empresas auspiciantes busquen migrar a una nueva tecnología su sistema de comunicaciones de radio que permita brindar un producto novedoso y de última tecnología a sus abonados.

La investigación inicia con un análisis de mercado y la situación en la que se encuentra el sistema de comunicaciones que posee RACOMDES S.A. analizando la cobertura que brinda y los equipos que integran el sistema actual.

Posteriormente, introduce al lector a los sistemas de radiocomunicaciones y realiza un análisis para determinar qué tecnología digital debería implementar dadas las condiciones de mercado y de tecnología que más se adapten a las necesidades del Ecuador.

A continuación, muestra el diseño de la red de radiocomunicaciones troncalizada digital multisitio para la ruta Quito-Guayaquil comenzando por limitar las áreas de cobertura que tendrá cada sitio utilizando software de simulación. Luego muestra el diseño de la red de transporte requerida para enlazar los sitios por IP y calcula las ganancias y pérdidas en los equipos y el sistema dados los parámetros de los catálogos.

Finalmente, muestra la implementación y pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del sistema de comunicaciones y compara los resultados

obtenidos con la simulación para afirmar la correcta instalación del sistema en general. Se podrá observar que la migración a la tecnología digital permite a las empresas obtener como resultado la expansión de su portafolio de productos y servicios a sus abonados.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN.....	III
CERTIFICACIÓN	IV
AGRADECIMIENTO	V
DEDICATORIA	VI
PRÓLOGO	VII
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV

CAPÍTULO I

1	SITUACIÓN ACTUAL DE LA RED ANALÓGICA TRONCALIZADA EN EL ECUADOR.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.1	Antecedentes.....	1
1.1.2	Justificación e Importancia	2
1.1.3	Alcance del Proyecto	4
1.1.4	Metodología	5
1.1.5	Objetivos.....	6
1.1.5.1	General.....	6
1.1.5.2	Específicos	6
1.2	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS TRONCALIZADOS EN EL ECUADOR.....	6
1.2.1	Topología.....	7
1.2.2	Equipos que integran el Sistema	8
1.2.3	Análisis de cobertura del sistema analógico.....	10
1.3	ANÁLISIS DEL MERCADO ACTUAL DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADA EN EL ECUADOR	10

1.3.1	Análisis de mercado ecuatoriano.....	10
1.3.2	Análisis de Producto y Clientes a quienes se desea captar	18

CAPÍTULO II

2	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES.....	20
2.1	ESTÁNDARES DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES	20
2.1.1	Estándares de Sistemas Analógicos	20
2.1.2	Estándares de Sistemas Digitales	22
2.1.3	Análisis de Tecnología TDMA y FDMA para Radio Digital	26
2.2	DIGITALIZACIÓN DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES	33
2.2.1	Transición Tecnológica de las Radiocomunicaciones	33
2.2.2	Aplicaciones de la Tecnología Digital de Radio.....	35

CAPÍTULO III

3	DISEÑO DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES DIGITAL TRONCALIZADA	38
3.1	SIMULACIÓN DE COBERTURA	38
3.1.1	Estudio de Propagación Cerro Atacazo.....	39
3.1.2	Estudio de Propagación desde el Cerro Cochabamba	54
3.2	ANÁLISIS DE INFRAESTRUCTURA DE RADIOCOMUNICACIONES	59
3.3	PROGRAMACIÓN DE LOS REPETIDORES TRONCALIZADOS.....	60
3.4	DISEÑO DE LA RED VPN PARA LOS 4 SITIOS	64
3.5	TOPOLOGÍA DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES	66

CAPÍTULO IV

4	IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL.....	69
4.1	SHELTER DE TELECOMUNICACIONES	69
4.2	INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES	70
4.3	PRUEBAS DE CONECTIVIDAD DE LA RED VPN, PARÁMETROS DE EFICIENCIA.....	78

4.4	PRUEBAS DE CONFIGURACIÓN ROAMING DE LOS MÓVILES	81
4.5	PRUEBAS DE CAMPO	83
4.5.1	Mediciones de Calidad de Señal de Voz	84
4.5.2	Mediciones de Localización Vehicular, Análisis de Precisión- Exactitud	87
4.5.3	Envío de Mensajes de Texto	92
4.5.4	Pruebas de Funcionamiento del Software de Gestión del Sistema Troncalizado	95

CAPÍTULO V

5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	100
5.1	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL PUESTO EN MARCHA EN UN SOLO SITIO	100
5.2	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO Y LOCALIZACIÓN VEHICULAR EN EL ÁREA DE COBERTURA DEL SITIO	103
5.3	ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE COBERTURA-EFICIENCIA EN LA RED DE TRANSPORTE DE VOZ Y DATOS PARA LA VPN	104

CAPÍTULO VI

6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
6.1	CONCLUSIONES.....	106
6.2	RECOMENDACIONES	109

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
---	------------

GLOSARIO DE TÉRMINOS	113
-----------------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama de sistema de radiocomunicaciones troncalizado.....	18
Figura 1.2	Equipos de exteriores del sistema	19
Figura 1.3	Equipos de interiores del sistema	20
Figura 1.4	Porcentaje de participación del mercado-Troncalizados	23
Figura 1.5	Cuadro comparativo de abonados por año entre operadores	24
Figura 1.6	Probabilidad de migración de los sistemas troncalizados analógicos a tecnología digital	28
Figura 2.1	Modulación $\pi/4$ -DQPSK.....	38
Figura 2.2	Simulación de modulación $\pi/4$ DQPSK vs 4FSK.....	38
Figura 2.3	FDMA y TDMA	41
Figura 2.4	Solución de SEPURA para dar servicio a equipos portátiles dentro de zonas urbanas para la Policía Metropolitana de Londres	43
Figura 2.5	Conexión por IP de sitios troncalizados	47
Figura 2.6	Programación vía aire OTAP	47
Figura 2.7	Video vigilancia mediante RF	48
Figura 2.8	Conexión de sistemas troncalizados con la telefonía.....	48
Figura 3.1	Datos del estudio	50
Figura 3.2	Método de cálculo	51
Figura 3.3	Parámetros de cálculo.....	52
Figura 3.4	Parámetros del transmisor	52
Figura 3.5	Descripción del servicio NX-DN	53
Figura 3.6	Parámetros de la antena	54
Figura 3.7	Diagrama horizontal de antena TETRA OMNI de 12.1dBi	55
Figura 3.8	Diagrama vertical de antena TETRA OMNI de 12.1dBi	55
Figura 3.9	Receptor de cobertura.....	56
Figura 3.10	Editor de rangos de campo	56
Figura 3.11	Simulación de cobertura en sistema troncalizado 800MHz.....	57

Figura 3.12	Resumen de parámetros de cálculo.....	58
Figura 3.13	Cobertura en la ciudad de Quito	59
Figura 3.14	Ubicación de antena en el cerro Atacazo.....	60
Figura 3.15	Cobertura del sur de Quito y Conocoto	61
Figura 3.16	Carretera Aloag-Santo Domingo	61
Figura 3.17	Cobertura en la zona Machachi	62
Figura 3.18	Carretera Aloag-Santo Domingo centro	63
Figura 3.19	Cobertura Santo Domingo de los Tsáchilas y alrededores	64
Figura 3.20	Cobertura sur de Santo Domingo de los Tsáchilas	65
Figura 3.21	Simulación de cobertura desde cerro Cochabamba	66
Figura 3.22	Cobertura sur de cerro Cochabamba	67
Figura 3.23	Cobertura norte de cerro Cochabamba.....	68
Figura 3.24	Cobertura de Santo Domingo desde cerro Cochabamba.....	68
Figura 3.25	Cobertura general desde cerros Cochabamba y Atacazo.....	69
Figura 3.26	Vista panorámica de cobertura general.....	70
Figura 3.27	Programación de repetidores troncalizados	72
Figura 3.28	Editor de canal	73
Figura 3.29	Alojamiento de memoria de red	73
Figura 3.30	Características opcionales	74
Figura 3.31	Cableado de repetidores	74
Figura 3.32	Diagrama de red VPN	75
Figura 3.33	Topología de la red de radiocomunicaciones.....	77
Figura 3.36	Cálculo de pérdidas y ganancias en el sistema troncalizado	79
Figura 4.1	Shelter de Telecomunicaciones	80
Figura 4.2	Protección de pararrayos y control de energía.....	81
Figura 4.3	Combinador Sinclair instalado en rack.....	82
Figura 4.4	Banco de Baterías.....	83
Figura 4.5	Cableado de Repetidoras.....	83
Figura 4.6	Multi-acoplador.....	86
Figura 4.7	Amplificadores de potencia	86
Figura 4.8	Repetidores digitales.....	87
Figura 4.9	Antenas de recepción y transmisión.....	87
Figura 4.10	Tower Top.....	88
Figura 4.11	Portadora de canal de control	88

Figura 4.12	Pruebas de campo en Quito.....	95
Figura 4.13	Pruebas de campo en sector El Trébol	96
Figura 4.15	Pruebas de campo Valle de los Chillos	97
Figura 4.16	Mediciones sector Centro-Norte de Quito	98
Figura 4.17	Prueba de Ubicación del punto con GPS	100
Figura 4.18	Trayectoria recorrida por un móvil.....	101
Figura 4.19	Límites de velocidad.....	102
Figura 4.20	Geocercas.....	102
Figura 4.21	Mensajes de Texto en NEXEDGE	103
Figura 4.22	Envío de datos GPS en sistema troncalizado	104
Figura 4.23	Gráfica de carga de canal	107
Figura 4.24	Resumen de estado de sitio.....	108
Figura 4.25	Estado de canal en tiempo real.....	108
Figura 4.26	Reporte de comunicaciones.....	109
Figura 4.27	Reporte de mensajes de hardware	110
Figura 5.1	Carga de canal.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Cobertura de Operadores de Sistemas troncalizados en el Ecuador	22
Tabla 1.2 Número de Abonados por año	23
Tabla 2.1 Comparación NEXEDGE vs P25 vs. TETRA	40
Tabla 3.1 Tabla de distribución de frecuencias para sistema digital	72
Tabla 3.2 Cálculo del ancho de banda	76
Tabla 3.3 Proyección de Crecimiento de Ancho de Banda	77
Tabla 4.1 Cálculo de longitud de cable para múltiplos de longitud de onda	85
Tabla 4.2 Escala M.O.S.	89
Tabla 4.3 Cálculo del MOS para llamadas telefónicas	90
Tabla 4.4 Políticas de Búsqueda.....	92
Tabla 4.4 Capacidad de reporte de unidades con datos GPS	105

CAPÍTULO I

1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA RED ANALÓGICA TRONCALIZADA EN EL ECUADOR

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación presenta un diseño e implementación de un sistema de radiocomunicaciones troncalizado digital en el Ecuador. Los sistemas de radiocomunicaciones son sistemas importantes en el sector de seguridad por la robustez, alta confiabilidad que presentan y su sencillez de despliegue. Son ampliamente utilizados por las empresas de seguridad, instituciones públicas y empresas privadas donde la demanda exige comunicaciones de despacho sencilla y robusta.

1.1.1 Antecedentes

El presente proyecto nace de la iniciativa de las empresas auspiciantes, buscando ampliar su gama de servicios y productos para un mercado de telecomunicaciones en constante crecimiento. Los sistemas de radio troncalizado actuales en el Ecuador funcionan independientemente en cada una de las ciudades grandes del país (Quito-Guayaquil-Cuenca), y son pocos los operadores de radio troncalizado que permiten comunicarse entre ciudades para las comunicaciones. Además, todos los sistemas actuales trabajan en modo analógico, que significa tener sistemas simples de comunicación que fácilmente se pueden interceptar y no brinda valor agregado a los usuarios.

Las empresas auspiciantes de este proyecto de grado desean implementar un nuevo sistema digital de radio troncalizado que permita a los usuarios tener un

servicio más acorde a los avances tecnológicos con un valor agregado que lo distinga de los demás operadores y permita obtener mayor competitividad en el mercado de las radiocomunicaciones. Este sistema espera ser implementado a lo largo de la ruta Quito-Guayaquil con el objetivo de brindar un sistema de comunicaciones que permita comunicar al transporte pesado y liviano con mayor nitidez, robustez y confiabilidad tecnológica digital, además de brindar servicios de valor agregado como Rastreo Vehicular Automático (RVA), control de flotas mediante mensajes de texto y control de velocidad.

La tecnología a implementar es NEXEDGE NXDN [1]. El sistema utiliza el protocolo FleetSync y NX-DN [1] para realizar la señalización de comunicación digital, permitiendo migrar paulatinamente a la tecnología digital a los sistemas de radiocomunicaciones, facilitando la comunicación haciendo que esta sea más atractiva para los usuarios.

1.1.2 Justificación e Importancia

La necesidad de utilizar un sistema de gestión y control de radio nace de antecedentes históricos importantes que marcaron al mundo entero en emergencias catastróficas causadas por la naturaleza o por conmoción social. La radiocomunicación es la tecnología recomendada y adoptada para utilizar en casos de comunicación en el que se debe priorizar y garantizar a toda costa la confiabilidad y disponibilidad del sistema de comunicación. La tecnología celular ha demostrado un crecimiento exponencial a nivel mundial y es utilizado para la comunicación personal, sin embargo es la menos confiable cuando se trata de emergencias debido a la saturación del sistema en un alto número de tráfico por celda. Para nombrar algunos hechos históricos se pone a consideración lo siguientes sucesos más destacados recientemente:

- Sublevación policial el 30 de septiembre en el Ecuador 2010
- Terremoto de Japón 26 de Febrero 2010
- Terremoto de Nueva Zelanda 22 de Febrero 2011
- Terremoto de Chile 27 de Febrero 2010
- Terremoto de Haití 12 de Enero 2010

En la sublevación policial del 30-S en el Ecuador se destaca una falencia en las comunicaciones de la Policía Nacional y Ejército Ecuatoriano. Las grabaciones de voz de la Policía Nacional eran confusas y no se podía determinar la identidad de las personas que conversaban en el sistema de aquel día. Un sistema de grabación de voz que guarde la información completa con identificación e información oportuna podría haber solucionado los casos posteriormente investigados en contra del personal policial. Además, todo el Distrito Metropolitano de Quito perdió comunicación celular debido a la saturación del sistema dada la situación de conmoción nacional. La necesidad de comunicación de las personas supero el límite que permite la tecnología celular abarcar en su sistema, haciendo que este colapse en su totalidad.

Los terremotos de Japón, Nueva Zelanda y Chile son sucesos de conmoción nacional que también hicieron que las celdas celulares colapsen debido a la necesidad de comunicación por la catástrofe suscitada. En los 3 casos mencionados, el único sistema de comunicaciones inalámbrico que no era afectado era el de Radio. El sistema de radio es un sistema de comunicación privada e independiente que se ajusta a las necesidades de comunicación de un grupo de personas que requieren alta fidelidad, confiabilidad y disponibilidad para asegurar sus comunicaciones a toda hora, los 365 días al año. Los canales de comunicación son privados y de uso exclusivo para las personas que contratan el sistema. En caso de existir alto tráfico de comunicaciones, éste no afecta al desempeño del mismo por su característica de comunicación.

Con la llegada de la tecnología digital comienza una revolución en las radiocomunicaciones, puesto que el usuario ya no necesita un solo canal de voz para su gestión, sino que empieza a incorporar sistemas de rastreo satelital basados en celular para ubicar a su personal y vehículos en tiempo real. Este valor agregado es adicional al radio, por ende los gastos son elevados. Un único sistema robusto que permita realizar toda la gestión se puede realizar haciendo la migración a radios convergentes con la tecnología digital.

Los radios digitales de nueva generación permiten realizar un control de flotas, envío de mensajes de texto, control de velocidad, rastreo satelital y demás

funciones todo a nivel analógico y digital, siendo el sistema digital el más seguro y confiable actualmente.

Se presenta la problemática actual de los sistemas de radio analógicos:

- Las comunicaciones analógicas son interceptables fácilmente.
- Los sistemas de rastreo satelital de vehículos utilizan la tecnología celular para envío de coordenadas.

Solución planteada:

- Implementar un sistema de radio troncalizado digital en la ruta Quito-Guayaquil que brinde todos los servicios de valor agregado de control de flotas, rastreo vehicular, botones de pánico y mensajería en un solo paquete para clientes como cabezales de transporte pesado, transporte de valores y seguridad privada.
- Diseñar y evaluar que efectivamente la solución funcione previa implementación total del resto del sistema.

1.1.3 Alcance del Proyecto

El proyecto está compuesto por cuatro fases. La primera fase es la implementación del sistema en el cerro Atacazo, la segunda es la implementación del sistema en el cerro Cochabamba, tercero la implementación del sistema en el cerro Pichincha y cuarto la implementación del sistema en el cerro Azul de Guayaquil. El presente proyecto de grado se encargará únicamente de implementar la primera fase, descrita y limitada por las siguientes funciones:

- Realizar un estudio de cobertura del sistema troncalizado digital mediante herramientas de software.

- Programación de las repetidoras.
- Instalación de repetidoras troncalizadas en el cerro Atacazo.
- Medición de calidad de voz con métodos subjetivos MOS (*Mean Opinion Score*) sobre el área de cobertura del sitio.
- Implementación de aplicativos de rastreo vehicular, mensajería y control de flotas sobre el sistema.
- Implementación de un enlace de datos a través de una VPN.
- Medición de parámetros de eficiencia de red de transporte de voz y datos de la VPN.

Con esto se espera obtener la suficiente información necesaria del desempeño de la red para que luego de la implementación, motivo del presente proyecto de grado, se avance con la implementación de los siguientes sitios.

1.1.4 Metodología

La metodología a utilizar a lo largo del proyecto que incluye una serie de estrategias para conseguir resultados medibles que se detallan a continuación:

- Investigación bibliográfica.
- Simulación de propagación de área de cobertura con software.
- Mediciones de campo.
- Reuniones de trabajo semanales con el colaborador del proyecto para constatar avances de implementación.

1.1.5 Objetivos

1.1.5.1 General

- Implementar un sistema de radiocomunicaciones troncalizado multisitio de tecnología digital con aplicativos de control de flotas y rastreo vehicular para la empresa RACOMDES S.A.

1.1.5.2 Específicos

- Analizar la situación actual de la red analógica troncalizada.
- Estudiar los sistemas de radiocomunicaciones analógicos y digitales.
- Diseñar la red de radiocomunicaciones digital troncalizada.
- Implementar la red de radiocomunicaciones digital y realizar pruebas de campo para verificar el funcionamiento.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas de campo en el sitio de cobertura.
- Realizar conclusiones y recomendaciones para investigación futura.

1.2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS TRONCALIZADOS EN EL ECUADOR

Los sistemas troncalizados son sistemas de comunicaciones que aprovechan de mejor manera los canales de tráfico de convencionales, integrados en un sistema que permite distribuir uniformemente los canales disponibles a los usuarios mediante la asignación de canales libres de acuerdo a la demanda de los abonados basándose en teoría de colas. Los sistemas troncalizados ahorran espectro de frecuencias y permite a los usuarios disponer de sistemas de rápido acceso y despacho.

1.2.1 Topología

Un ejemplo típico de un sistema de radiocomunicaciones troncalizado puede ser descrito como el que muestra la Figura 1.1.

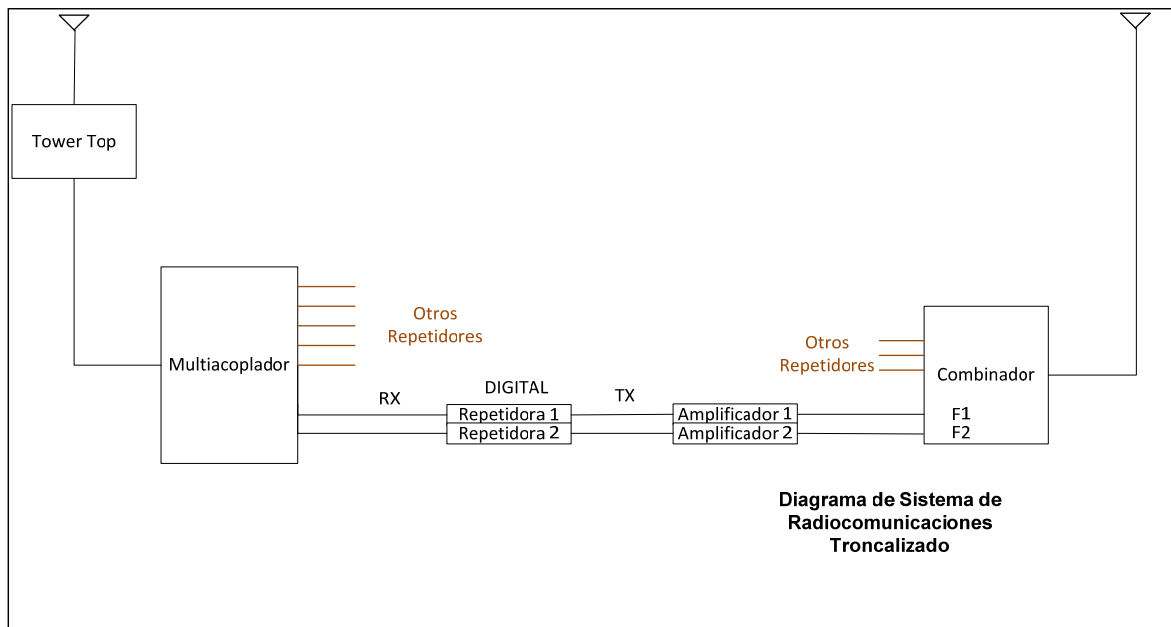


Figura 1.1: Diagrama de sistema de radiocomunicaciones troncalizado [A]

1. La antena de recepción está conectada a un sistema de amplificación llamada *Tower Top*, cuya función es de amplificar la señal para mejorar la sensibilidad de recepción.
2. El multiacoplador se encarga de distribuir la señal a los repetidores.
3. Los repetidores escuchan las señales recibidas y realizan una re-transmisión de baja potencia hacia los equipos especializados de amplificación. Esta etapa puede variar, puesto que otros fabricantes incluyen la amplificación interna en la repetidora. Adicional, las repetidoras contienen la información necesaria para el control y distribución de los canales disponibles.

4. Los amplificadores pasan la señal amplificada a los equipos combinadores, que se encargan de mezclar las señales de los distintos repetidores para poder transmitir las sobre una misma antena.

1.2.2 Equipos que integran el Sistema

Los equipos exteriores se presentan en la Figura 1.2 y están compuestos por:

- Antenas Omnidireccionales
- Pararrayos
- *Tower Top*
- Cable Heliax

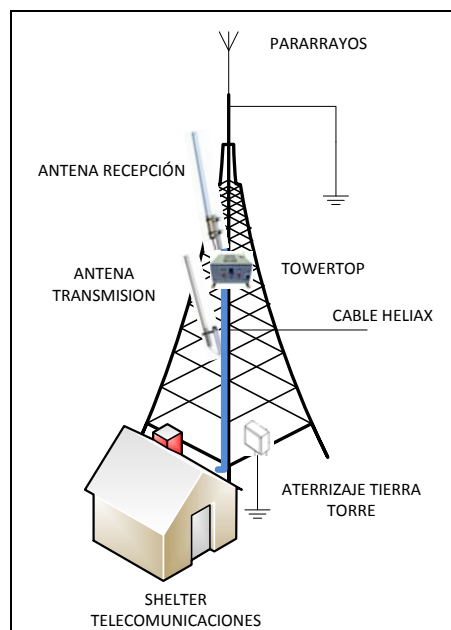


Figura 1.2: Equipos de exteriores del sistema [A]

El pararrayos ayuda a la descarga de rayos a través del sistema de tierra, protegiendo a los equipos. Las antenas omnidireccionales de recepción y transmisión se colocan estratégicamente en la torre, para garantizar las mínimas pérdidas posibles sobre el sistema. El cable utilizado para la conexión es heliax de 7/8" para proporcionar la mínima pérdida posible debido a la longitud necesaria y además evitar interferencia. En el *shelter de telecomunicaciones*, es necesario

instalar los equipos sobre un rack y distribuirlos estratégicamente. La Figura 1.3 presenta un diagrama de distribución de equipos típico en un rack.

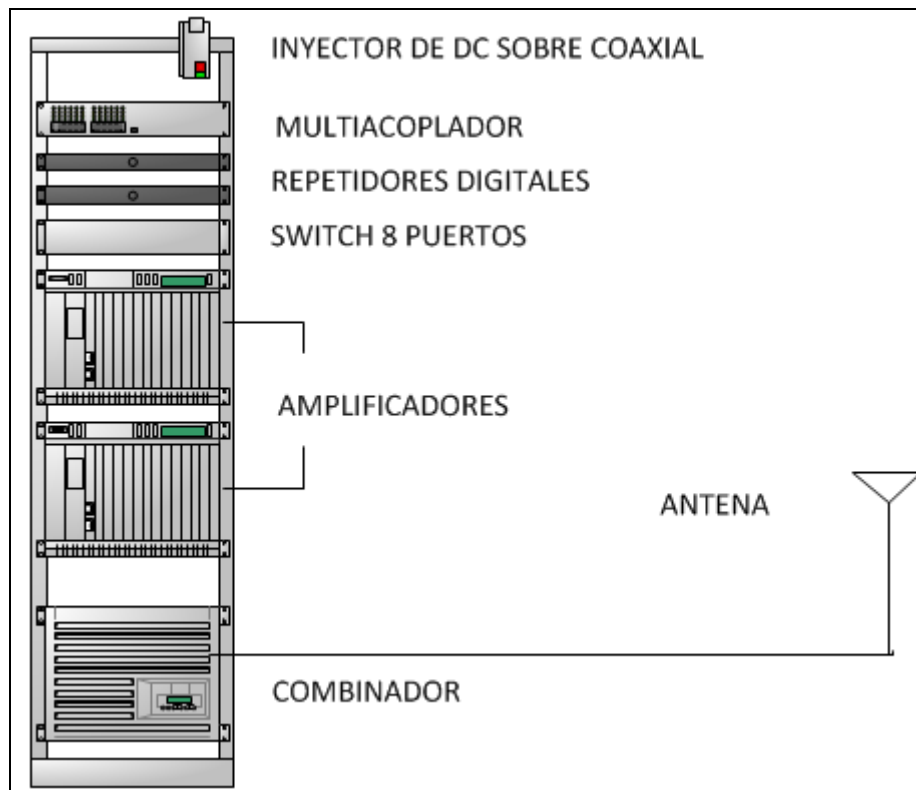


Figura 1.3: Equipos de interiores del sistema [A]

Al interior del *shelter*, todos los equipos se agrupan en un *rack* y se conectan lo más cerca posible entre sí para evitar atenuación de longitud de cable. Se requiere un amplificador por cada repetidor. La salida de los amplificadores se conecta a un solo combinador que mezcla las señales en una sola salida para su posterior envío a la antena de transmisión. Un típico sistema de radio troncalizado tiene pérdidas en el combinador de 3dB. Por esta razón, los amplificadores de potencia realizan la tarea de elevar por ejemplo de 0.250mW a 60W la señal, para que la salida del combinador se pueda obtener una señal de 30W y ésta se pueda llevar a las antenas transmisoras para conseguir un área de cobertura efectiva de hasta 120km en línea de vista.

La recepción es mejorada gracias a los equipos *tower top*¹, ya que estos amplifican la señal ingresada cerca de la antena con el objetivo de minimizar las pérdidas en el cable. Se energiza el equipo con un inyector de DC sobre cable coaxial. La señal pasa luego al multiacoplador para su distribución a los repetidores.

1.2.3 Análisis de cobertura del sistema analógico

Un sistema troncalizado analógico permite cubrir áreas extensas dentro de una ciudad, llegando con línea de vista hasta los 120km en condiciones óptimas. En la ciudad de Quito, la cobertura de un sistema típico instalado en el cerro Pichincha garantiza el servicio con límites al norte la ciudad de Cayambe, al sur la estación de control El Boliche de Cotopaxi y al este los valles de Tumbaco y Los Chillos. Dentro de esta zona hay ciertas áreas que no tienen cobertura debido a que se encuentran fuera de línea de vista.

1.3 ANÁLISIS DEL MERCADO ACTUAL DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADA EN EL ECUADOR

Previa a la implementación de un sistema de telecomunicaciones, se debe hacer un estudio de mercado para poder analizar correctamente el entorno. Con esto, se puede sacar conclusiones que permitan proyectar al inversionista que tipo de tecnología emplear, entender a los posibles competidores y sacar provecho a las fortalezas y debilidades que pueda tener un sistema de telecomunicaciones. En las siguientes páginas se realizará un breve análisis que permita tener un panorama del entorno del mercado de radiocomunicaciones en el Ecuador.

1.3.1 Análisis de mercado ecuatoriano

El mercado de las telecomunicaciones en el Ecuador es un sector en constante crecimiento y demanda de innovación tecnológica a las empresas para

¹ Tower Top: Amplificador/filtro colocado en la parte superior de una torre de comunicaciones cerca de la antena de recepción.

que puedan diferenciarse de los competidores para captar clientes de mejor manera. El sector de radiocomunicaciones, se diferencia del resto de sistemas telecomunicaciones por ser sistemas sencillos y fáciles de operar. Normalmente tardan más tiempo que otros sistemas para cambiar de tecnología y en algunos casos, se puede llegar a utilizar la misma tecnología por décadas. Demandan seguridad, robustez y sencillez de operación. Existen seis operadores de radio troncalizado autorizados para brindar servicio en el Ecuador, de los cuales la gran mayoría concentra sus operaciones en Quito y Guayaquil. La Tabla 1.1 permite ver la cobertura de los sistemas troncalizados a nivel nacional.

Debido a que los sistemas troncalizados tienen un enfoque de mercado a sistemas confiables de rápido acceso y misión crítica, el mercado es reducido y de menor crecimiento en comparación con los demás sistemas de telecomunicaciones. La participación del mercado que tiene cada una de las operadoras se puede visualizar en la Figura 1.4. La Tabla 1.2 muestra el número de abonados que han tenido los operadores en cada año.

Operadora	Cobertura
Brunacci Cia. Ltda.	Quito, Santo Domingo de los Tsáchilas, Guayaquil, Machala, Quevedo, Manta, Ambato, Tulcán
Comovec S.A.	Quito, Guayaquil, Cuenca, Quevedo, Manta
Marconi	Guayaquil, Quevedo, Portoviejo, Santo Domingo de los Tsáchilas, Ambato, Quito, Cuenca, Machala, Imbabura
Montcashire S.A.	Quito, Guayaquil
Multicom	Quito, Guayaquil, Babahoyo, Machala, Manta, Portoviejo, Ambato, Riobamba, Cuenca, Santo Domingo de los Tsáchilas, Cotacachi
Racomdes	Quito, Guayaquil

Tabla 1.1: Cobertura de Operadores de Sistemas troncalizados en el Ecuador [1]

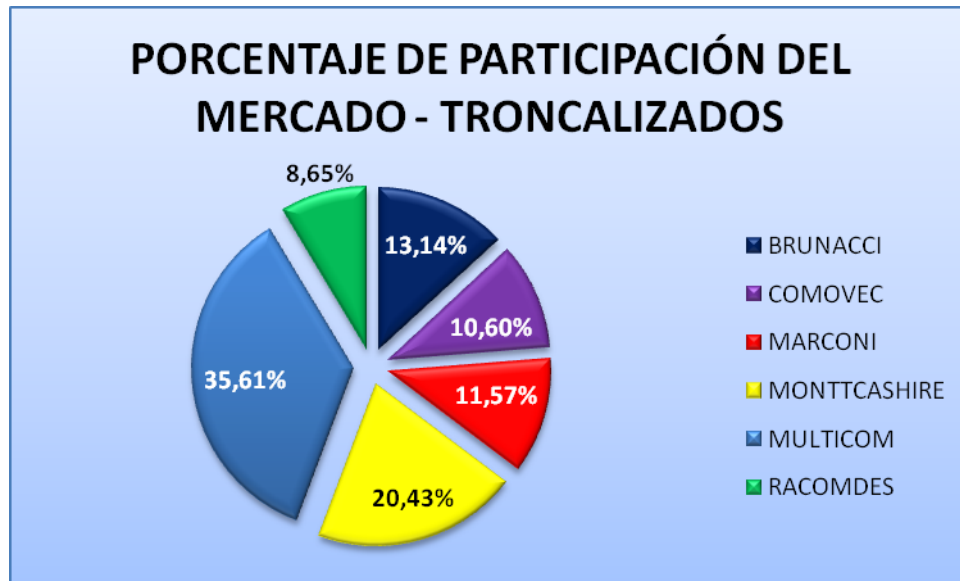


Figura 1.4: Porcentaje de participación del mercado-Troncalizados [2]

	Año					
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
BRUNACCI	3957	3429	4623	4356	3966	3186
COMOVEC	1716	1601	2990	3034	2831	2569
MARCONI	6666	8566	10210	3383	3258	2804
MONTCASHIRE	446	428	4354	6238	5533	4953
RACOMDES	1636	1538	198	1334	1544	2097
MULTICOM	8255	8419	8631	7456	8273	8634
Total	22676	23981	31006	25801	25405	24243

Tabla 1.2: Número de Abonados por año [2]

De la Tabla 1.2, se procede a extraer la información y realizar tabulaciones para visualizar la comparación de abonados anual en la Figura 1.5.

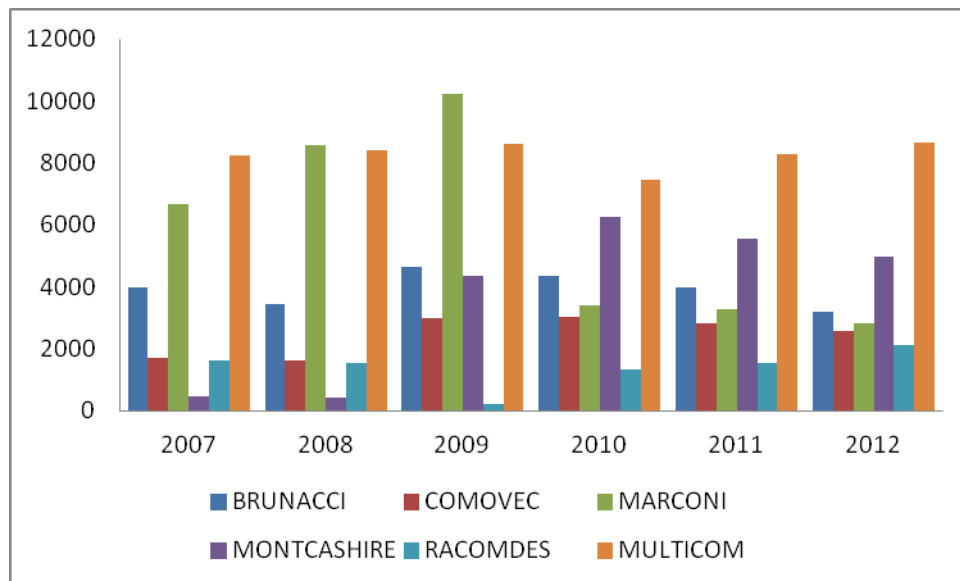


Figura 1.5: Cuadro comparativo de abonados por año entre operadores [2]

Se puede apreciar que de la Tabla 1.2 y Figura 1.5, se tuvo un número de abonados de 24243 al mes de Mayo del 2012 en total para todos los operadores. Se nota un nivel creciente de abonados hasta el año 2009, y luego una baja notoria hasta el año 2012 como nos muestra la Figura 1.5. Esto se debe a la introducción de los sistemas PTT de la operadora celular MOVISTAR (única operadora celular en ofrecer este servicio), que realizó un enfoque de mercado a clientes de empresas pequeñas para brindar este servicio. Se pudo notar que la gran mayoría de abonados de los sistemas troncalizados que mantenían grupos de conversación menores a 10 usuarios (empresas pequeñas), salieron del sistema troncalizado para formar parte del sistema celular con *Push To Talk* (PTT). Este indicativo alarmó a los operadores de radio inicialmente, ya que se preveía un futuro fin a los sistemas de radio y una inminente llegada de los sistemas celulares al mercado troncalizado. Sin embargo, contrario a esto, esta introducción de PTT sobre celular despertó el interés de las empresas para comunicarse más ágilmente y las debilidades que tiene un sistema basado en celular hizo que algunos abonados regresaran a los sistemas troncalizados, viéndose el alza de abonados entre los operadores pequeños que ofrecían precios competitivos. Además, la tecnología celular es vulnerable al depender de un sistema público. Las características propias de un sistema celular no garantizan un rápido acceso al canal para una comunicación con baja latencia, y solamente permite grupos de trabajo de hasta 10 usuarios (*Talk Group*). Esto

implica que las empresas que requieren grupos de conversación mayor a 10 abonados no puedan acceder a este servicio, y en caso de hacerlo, tienen latencias altas en la conversación. Además, un sistema celular requiere que el volumen de tráfico de voz genere ingresos por uso del sistema, y un número alto de abonados con conversaciones simultáneas con un costo fijo hace que esto sea poco atractivo para las operadoras cuando se realiza a gran escala las comunicaciones por lo que el nicho de mercado de PTT sobre celular definitivamente queda enfocado a las empresas pequeñas.

Todos los operadores y abonados del sistema troncalizado en su gran mayoría utilizan equipos de marca MOTOROLA, debido a la monopolización del mercado en su introducción en el mercado ecuatoriano en sus años preliminares. Actores importantes como la Policía Nacional, Policía Municipal y empresas de seguridad privada optaron por el sistema troncalizado que ofrecía Motorola, realizando inversiones altas de infraestructura y licencias de operación. Los equipos vendidos en su gran mayoría son fácilmente activados entre los operadores principales, permitiendo una competencia justa y equitativa con precios bajos. De esta distribución, los operadores como Multicom y Monttashire mantienen la mayor participación del mercado, siendo los que mayor número de abonados tienen en sus sistemas en el año 2012. Marconi es una empresa que se diferenció en el mercado implementando un sistema troncalizado basado en la marca Kenwood, para utilizar Logic Trunked Radio (LTR) en sus sistemas interconectando la ruta Quito-Guayaquil para brindar servicio de radio al transporte pesado. La empresa RACOMDES S.A. mantiene el menor número de abonados y participación en el mercado, con un sistema troncalizado basado en *Motorola Privacy Plus* y *LTR*.

RACOMDES S.A., empieza a escalar desde el 2009 gracias a la implementación del sistema LTR con un número de abonados modesto llegando a las estadísticas actuales que muestra la Figura 1.5, siendo las más altas en la historia de la empresa en el año 2012. Sin embargo se nota que el mercado de radio analógico troncalizado ha caído notablemente de manera global con respecto a los anteriores años. Al ser un mercado siempre movido, la pelea por

captar clientes se vuelve más un tema de estrategia de ventas, calidad de servicio y costo.

Como se mencionó anteriormente, los sistemas PTT sobre celular no son escalables y no presenta competencia para los sistemas de radio, dados los nichos de mercado que cada uno apunta. Los sistemas de radio convencionales brindan la solución para grupos grandes desde 30 a 100 usuarios típicamente, pero a partir de este número, se vuelve difícil acceder al canal por el volumen que representa. Es por esto que los radios troncalizados ofrecen la mejor solución para todo tipo de operaciones, desde 2 abonados hasta un grupo de 40000 usuarios (dependiendo la tecnología), gracias a su escalabilidad y flexibilidad en la infraestructura, que se explicará en los capítulos posteriores.

El sistema de radiocomunicaciones es un sistema que siempre será utilizado por empresas de seguridad, debido a su característica propia de robustez y confiabilidad. Es ahí en donde la migración a la tecnología digital empieza a tomar forma y el valor agregado de las comunicaciones adicional al servicio de voz toma mayor fuerza. La tecnología digital permite una mayor cobertura, valor agregado como mensajes de texto, y servicio de rastreo satelital automático de flotas, además de poder ampliar el área de cobertura en forma de celdas, (al igual que el celular), a través de enlaces IP.

Por esta razón empezaron a desplegarse varios sistemas convencionales digitales a lo largo del país. Uno de los más grandes ejemplos se encuentra en la Amazonia, donde las cooperativas de taxi tienen un sistema de radio digital con cobertura amplia y sistemas de rastreo vehicular con gestión de flotas. Poco a poco, las ventas de los sistemas digitales en el Ecuador han alertado a los operadores para iniciar una carrera tecnológica y brindar servicios de nueva generación. Las empresas auspiciantes de este proyecto de grado decidieron invertir en el sistema de radio digital troncalizado con el afán de captar el nuevo nicho de mercado que aún no está siendo explotado en el país, convirtiéndose en el primer grupo empresarial en desplegar una red digital en el Ecuador de manera comercial.

Bajo los mismos análisis de datos tabulados en las anteriores tablas, el 8.65% de abonados de RACOMDES representan 2096 usuarios, que ya son un nicho potencial para realizar una migración paulatina a la nueva tecnología digital. El único competidor potencial es Marconi, empresa que mantiene la ruta Quito-Guayaquil con radios troncalizados analógicos, y que debería migrar toda su infraestructura a la digital para brindar este servicio. Existe una tendencia por parte de los sectores públicos de utilizar un estándar de comunicaciones abierto como P25 o TETRA. Si optan por un sistema P25 (que es la tendencia internacional occidental) estarían migrando a una tecnología extremadamente costosa para el mercado ecuatoriano debido al alto valor por radio que habría que invertir. El estándar alternativo TETRA² es un sistema que requiere mayor despliegue de celdas, similar a un sistema celular. Esto hace que su implementación de las estaciones base sea costosa, a cambio de radios más económicos. En el siguiente capítulo se profundizará más sobre los estándares de radio digitales.

Adicionalmente, según una encuesta realizada por una tesis de grado de la Escuela Politécnica Nacional “*Análisis de la problemática de interconexión en Ecuador entre los sistemas troncalizados y las redes telefónicas fijas y celulares*” en el año 2009, el 83% de los operadores de radio encuestados respondieron que no les interesaría realizar una migración a la nueva tecnología digital. La figura 1.6 ilustra la encuesta realizada.

Si bien esta pregunta fue realizada en el 2009, la tendencia del mercado se ha mantenido igual y no existe tentativa por parte de algún operador en realizar la migración a una nueva tecnología. De todas las variables que pueden influir para que no se realice una migración, la que más influyó fue el costo de implementación y alto riesgo de inversión.

² TETRA: *Terrestrial Trunked Radio*- Estándar de radio digital definido por el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicación ETSI.

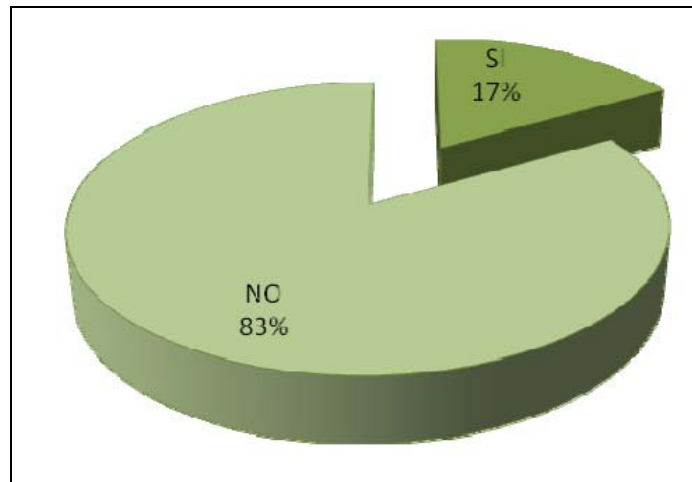


Figura 1.6: Probabilidad de migración de sistemas troncalizados analógicos a tecnología digital [1]

La empresa RACOMDES S.A. tiene infraestructura propia en Quito y Guayaquil con un número de abonados bajo respecto a los demás operadores repartidos entre las dos ciudades de mayor densidad usuarios. Una migración a la tecnología digital se puede realizar a bajo costo ya que el sistema se encuentra al 50% de capacidad, y se puede reutilizar equipos del sistema analógico, realizando una inversión mediana en la nueva tecnología digital, contrario a lo que los demás operadores tendrían que realizar. Para esto, del total de 40 pares de frecuencias concesionados, se procede a reubicar 5 pares de frecuencias en Quito y 5 pares de frecuencias en Guayaquil con su infraestructura en nuevos sitios estratégicos (Cerro Atacazo y Cerro Cochabamba) para brindar cobertura a toda la carretera que conecta estas dos ciudades. De esta manera, se llega a tener 3 sistemas independientes funcionando actualmente en la infraestructura de la empresa:

- Sistema Analógico troncalizado Privacy Plus MOTOROLA
- Sistema Analógico troncalizado LTR KENWOOD
- Sistema Digital troncalizado NEXEDGE KENWOOD

Al tener tres sistemas troncalizados con un mismo operador, se puede brindar al usuario la opción de migrar paulatinamente a los sistemas digitales de acuerdo a las necesidades específicas del cliente, además de ofrecer productos variados que se ajusten al presupuesto y exigencias de cada cliente.

1.3.2 Análisis de Producto y Clientes a quienes se desea captar

Al migrar a un sistema digital, el abanico de mercado se amplía enormemente, entrando a competir fuertemente con los sistemas celulares para el servicio de rastreo de vehículos.

Un sistema digital troncalizado como el propuesto en el presente estudio, significa ampliar el valor agregado a los servicios de voz. El mercado ecuatoriano está acostumbrado a utilizar al radio como un servicio de despacho, en el que solo utiliza *Push to Talk* para su gestión de flotas. Al introducir un novedoso sistema digital se tiene los siguientes servicios agregados:

- Audio mejorado
- Encriptación en las llamadas
- Área de cobertura mejorada en un 100%
- Mensajería
- Gestión de Flotas
- Rastreo satelital con GPS

Estos servicios de valor agregado vienen en un solo sistema, compitiendo con los servicios AVL (*Automatic Vehicle Location*) ofrecidos por sistemas celulares. La tecnología celular aprovecha su infraestructura para el envío de coordenadas de posición de los vehículos. Un ejemplo típico es el de los cabezales de una empresa de transporte pesado, donde se contrata el servicio de radiocomunicaciones para su comunicación de despacho, y un sistema de rastreo vehicular por celular, es decir, emplean dos sistemas:

- Radiocomunicaciones
- Gestión de Flotas y GPS por celular

Una excelente estrategia de mercado es unificar en un solo sistema confiable la comunicación de voz y datos (gestión de flotas) con un solo costo que signifique un ahorro sustancial para los usuarios, y que una inversión para la

migración a la tecnología digital significa un ahorro de largo plazo. Para aquellos clientes que aún no poseen un sistema de radiocomunicaciones, es mucho más fácil hacer que ingresen al sistema si se plantea un buen plan de mercado.

Los clientes potenciales podemos delimitar de la siguiente manera:

- Transporte Pesado
- Taxis
- Policías Metropolitanas
- Bomberos
- Empresas de Seguridad
- Transporte de Valores
- Hospitales
- Transporte Público

CAPÍTULO II

2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES

2.1 ESTÁNDARES DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES

Los estándares de sistemas de radiocomunicaciones son variados y se han adaptado a los estándares impuestos por los fabricantes. Gran parte de los estándares fueron primero propietarios de cada marca, pero con el vencimiento de patentes se han ido liberando para el uso por parte de otros fabricantes, a tal punto que hoy en los estándares analógicos ya se puede hablar de interoperabilidad de radios. En el caso de la digitalización de las radiocomunicaciones, los estándares nuevamente han sido impuestos por fabricantes, pero gracias a las propuestas de comisiones internacionales se ha podido crear estándares digitales que permiten la inclusión de distintas marcas.

2.1.1 Estándares de Sistemas Analógicos

Los sistemas de radiocomunicaciones son los más simples en su funcionamiento. Solamente requieren del uso de un par de frecuencias disponibles y ya se puede entablar una conversación. El principio de funcionamiento del radio es que este emite una señal de audio modulada en FM, y en los equipos receptores, si se recibe la señal con cierta intensidad superior a la programada, se abre el *sqelch*³ del radio y se escucha la señal recibida. Este principio se aplica a todos los sistemas de radiocomunicaciones, y para las comunicaciones de dos vías, este principio es fundamental en la programación y funcionamiento de un sistema.

³ Squelch: Es una función de circuito que permite suprimir audio (o video) a la salida del receptor en la ausencia de una señal de entrada requerida deseada.

Con el tiempo, se requerían funciones más avanzadas para los equipos, como llamadas selectivas, identificación de llamadas, etc. Esto llevó a que los radios incorporen señalización.

Los sistemas de radiocomunicaciones de dos vías tienen una desventaja puntual frente a otros sistemas, y consiste en que no tienen estándares de comunicación definidos entre todos los fabricantes. Esto llevó a que en la práctica, ciertos fabricantes impongan estándares de comunicación propios, ocasionando cierta incompatibilidad entre marcas en los años preliminares de los sistemas de dos vías. Con el tiempo las patentes fueron caducando y hoy en día los fabricantes incorporan las señalizaciones más comunes en todos sus equipos. Sin embargo, aun se tiene señalizaciones que son únicas para cada marca.

Entre los más destacados se mencionan los siguientes estándares de señalización:

CTCSS: *Continuous Tone-Coded Squelch System (Continuous Tone-Coded Squelch System)* CTCSS usa tonos de audio individuales de muy baja frecuencia, por ende, los tonos pueden enviarse junto con la voz sin causar interferencias. Un receptor que tenga habilitado el sistema CTCSS permanecerá en silencio hasta que reciba una transmisión que incluya el tono apropiado.

DCS: *Digital Coded Squelch (Squelch de Codificación Digital)*. Este método popular de enviar señales utiliza una ráfaga de tonos de datos modulados en FSK. Tal y como pasa con CTCSS, un receptor equipado con DCS permanecerá callado hasta que "escuche" una ráfaga de tonos cuyo reconocimiento le haya sido programado.

DTMF: *Dual-Tone MultiFrequency (Multi-Frecuencia de Tono Dual)* En el sistema DTMF se combinan dos tonos de audio cada vez que uno pulsa el botón de un teléfono normal y corriente o bien de un teclado radiofónico. Ambos tonos deben ser decodificados en el extremo receptor para que la señal sea "válida". Esto aporta cierto nivel de fiabilidad.

SelCall: (*Selective Calling*) Transmite una ráfaga de cinco tonos al inicio de cada transmisión. Al igual que un tono CTCSS sería utilizado para un grupo de radios, una secuencia específica de cinco tonos será utilizado para un grupo de radios.

Fleetsync: FleetSync es una señalización digital abierta para equipo de dos vías desarrollada por KENWOOD. Esta señalización digital trabaja a 1200 ó 2400bps. Existen 3 versiones: Fleetsync ANI, FleetSync básico y FleetSync Avanzado. Con esta señalización, se puede realizar identificación de llamadas, enviar y recibir mensajes de texto y llamadas de emergencia.

MDC1200: (*Motorola Data Communications 1200*) Es un sistema de señalización de baja velocidad para radios de dos vías Motorola que emplea AFSK (Audio Frequency Shift Keying). MDC 600 utiliza una tasa de 600 baudios y MDC 1200 utiliza una tasa de transmisión de 1200 baudios. La información se envía a manera de ráfagas sobre el canal de voz del sistema. Permite identificar llamadas, botones de estado, botones de emergencia y llamadas selectivas. Motorola cobró costosas licencias por el uso de esta señalización cuando aún estaba vigente la patente, por lo que los demás fabricantes no incluían esta señalización en sus radios. Esto llevó a que implementaciones de estos sistemas impidan el uso de radios de otras marcas, por ende los clientes mantenían únicamente la línea Motorola, monopolizando el mercado. Una vez que la patente venció, los demás fabricantes incluyeron MDC1200 en la mayoría de sus equipos, como es el caso de ICOM, KENWOOD y VERTEX STANDARD.

A lo largo de los años, los fabricantes han incorporado los estándares de señalización de las diferentes marcas, y en términos de modulación FM se puede decir que la mayoría de implementaciones ya se puede utilizar cualquier radio si se conoce la señalización.

2.1.2 Estándares de Sistemas Digitales

En las radiocomunicaciones digitales existe un escenario conflictivo de diferentes estándares de comunicación y tecnologías que distinguen a cada

marca, impidiendo un crecimiento uniforme y abierto. Esto se debe a que los sistemas de comunicación digital emplean diferentes tecnologías propietarias, y esta avanza a ritmos acelerados que demandan estándares acorde a las necesidades puntuales de los clientes. En estándares de la IEEE como es el caso de IEEE 802.11, en el que se define un estándar universal para comunicación inalámbrica de datos entre fabricantes, su proceso de estandarización fue una colaboración entre fabricantes, organizaciones y usuarios para poder competir en el mercado con productos que puedan comunicarse entre sí. En radiocomunicaciones de dos vías existe la misma intención, pero conseguir que todos los fabricantes estén de acuerdo en un solo sistema se volvió una tarea ardua y difícil de conseguir. Los estándares abiertos reconocidos como P25 y TETRA demoraron en conseguir un consenso, por esta razón, varios fabricantes se adelantaron a los procesos de estandarización y empezaron a sacar sus propias tecnologías de acuerdo a su experiencia y demandas de mercado.

En términos de tecnología, existen dos competidores importantes: TDMA y FDMA.

FDMA

Dentro de los estándares reconocidos y no reconocidos que utilizan FDMA podemos destacar los siguientes:

Project 25: P25 es un estándar para la fabricación de productos interoperables de comunicación inalámbrica digital de dos vías. Algunas veces es conocido como Proyecto 25 ó APCO P25. Fue elaborado por la *Association of Public-Safety Communications Officials-International* (APCO), *National Association of State Telecommunications Directors* (NASTD), y el Gobierno Federal de los Estados Unidos. Emplea encriptación AES y DES para el cifrado. Existen 3 fases de P25. La fase I emplea FDMA con espaciamiento de 12.5kHz en modo analógico y digital o mixto a una tasa de transmisión de 9600 baudios y dos bits por símbolo. Del total, 4400 bits provienen del IMBE códec, 2800 de FEC (*forward error correction*) y 2400 de la señalización y otras funciones de control.

Emplea modulación en frecuencia continua de 4 niveles C4FM, una modulación especial de 4FSK.

NX-DN: Es un protocolo de interfaz común de aire (CAI) para comunicaciones móviles. Fue desarrollado por *Icom Incorporated* y *Kenwood Corporation*. Es empleado por ICOM en su sistema IDAS, y por Kenwood en su sistema NEXEDGE. Es soportado por el FORUM NX-DN, con más de 13 fabricantes y fue liberado en Abril de 2012. Su aplicación es para equipos comerciales de PLMR⁴ (Private Land Mobile Radio) y sistemas de comunicación de agencias de seguridad publicas de bajo nivel. Un canal básico NX-DN digital tiene un ancho de banda de 12.5kHz o 6.25kHz, cumpliendo con la recomendación de la FCC de fabricar equipos a 6.25kHz. Se puede colocar 2 canales de 6.25kHz dentro de un canal de 12.5kHz para aumentar la eficiencia espectral. Utiliza el vocoder AMBE+2 y una tasa de transmisión de 9600 baudios a 12.5kHz y 4800 baudios a 6.25kHz, y emplea una modulación 4FSK. Con esta combinación, se mejora sustancialmente la recepción de voz con señal débil en comparación con FM. Puede trabajar en VHF, UHF y 800MHz. Con un transmisor equivalente de FM, NX-DN aumenta la cobertura y mejora los problemas de multi-trayectos en ambientes típicos de trabajo, especialmente a 12 dB SINAD (*Signal to Noise and Distorsion Ratio*). Los sistemas trabajan en modo FM, digital, o mixto.

TDMA

Dentro de los estándares reconocidos y no reconocidos que emplean TDMA podemos destacar los siguientes:

Project 25 fase II: Fase II emplea TDMA con 2 canales, un vocoder AMBE+2 y una tasa de transmisión de 6000 bps. Para control de acceso, utiliza un NAC (*Network Access Code*) en vez del tradicional CTCSS y DCS.

⁴ **dPMR** o *digital private mobile radio*, es una interfaz común de aire (Common Air Interface,CAI) para comunicaciones móviles digitales. dPMR es un estándar abierto desarrollado por la ETSI y publicado bajo referencia ETSI TS 102 658.

TETRA: (*TErrestrial Trunked Radio*) es un estándar definido por el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicación (ETSI en inglés). Este estándar define un sistema móvil digital de radio y nace por decisión de la Unión Europea con el objeto de unificar diversas alternativas de interfaces de radio digitales para la comunicación entre los profesionales de los distintos sectores. TETRA modula $\pi/4$ -QDPSK en 4 slots TDMA con separación de 25kHz entre portadoras.

Tetrapol: Tetrapol no se puede considerar como un estándar, debido a que su origen estuvo en el desarrollo realizado por la firma francesa '*Matra Communications*' (actualmente integrada en EADS) para crear una red de radiocomunicaciones digitales seguras para la Gendarmería francesa a principios de los años 90. Pudo haber sido el estándar ETSI pero en 1994 la mayoría de los fabricantes participantes en el desarrollo del estándar decidió apostar por TETRA, quedando el fabricante MATRA y EADS como únicos fabricantes de Tetrapol. Tetrapol modula en GMSK en TDMA con separación de 12.5 kHz entre portadoras.

iDEN: iDEN Red Mejorada Digital Integrada (*Integrated Digital Enhanced Network*) es una tecnología inalámbrica desarrollada por Motorola en 1994, proporciona a los usuarios múltiples servicios en un único e integrado sistema de comunicaciones móviles, similar a un sistema celular. Emplea TDMA y puede proveer servicios de voz y datos para establecer una llamada individual o de conferencia con apretar un botón. Algunas características incluye también el uso de GPS. Por tratarse de una tecnología propietaria de Motorola, son pocos los fabricantes que han diseñado equipos móviles compatibles con el sistema como el caso de BlackBerry, Eagle, Nextel, Phoenix. En el Ecuador, la empresa Monttashire (Radio Trunking del Ecuador) ofrece el servicio iDEN dentro de la ciudad de Quito.

MotoTrbo: Es un tecnología propietaria de MOTOROLA que permite comunicaciones móviles digitales basadas en TDMA PMR.⁵ Realiza

⁵ PMR: *Private Mobile Radio* son sistemas de comunicaciones que utilizan equipos portátiles, móviles, estaciones base y radios de despacho. Emplean comunicación punto-multipunto, *Push to Talk* (presione para hablar), en frecuencias VHF y UHF.

multiplexación de 2 canales de audio sobre un canal de frecuencia. Se puede integrar servicios de voz, mensajería y GPS en un mismo sistema trabajando en modo convencional o troncalizado en VHF o UHF.

2.1.3 Análisis de Tecnología TDMA y FDMA para Radio Digital

En un sistema digital de radio, la utilización de TDMA o FDMA incide sobre el beneficio que recibirá el cliente. Se describieron varias tecnologías que han optado por emplear TDMA, como el caso de TETRA y P25 fase II, que ofrecen eficiencia espectral al compartir canales multiplexados en el tiempo. En TETRA, el despliegue ha sido amplio en toda Europa donde un ejemplo de utilización es la ciudad de Londres, con despliegue de bases a través de toda la ciudad y todos sus departamentos de seguridad, defensa y rescate emplean este sistema.

Se ha demostrado ciertas debilidades que tiene un sistema TDMA frente a un sistema FDMA, y para este análisis se realizara una comparación entre un sistema FDMA NX-DN y un sistema TDMA-TETRA. TETRA presenta los siguientes puntos débiles frente a un sistema NX-DN:

- Sincronización de Tramas debido a interferencias y distancia de la estación base.
- Desviación de Frecuencia portadora es más crítica.
- Modulación $\pi/4$ -DQPSK

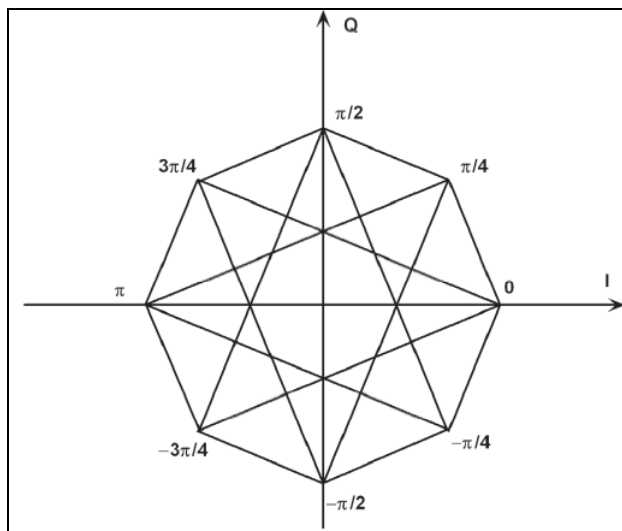


Figura 2.1: Modulación $\pi/4$ -DQPSK [7]

La Figura 2.1 muestra la modulación $\pi/4$ -DQPSK que poseen los sistemas TETRA. Esta modulación es robusta y recomendada su uso dentro de sistemas de bajas tasas de transmisión.

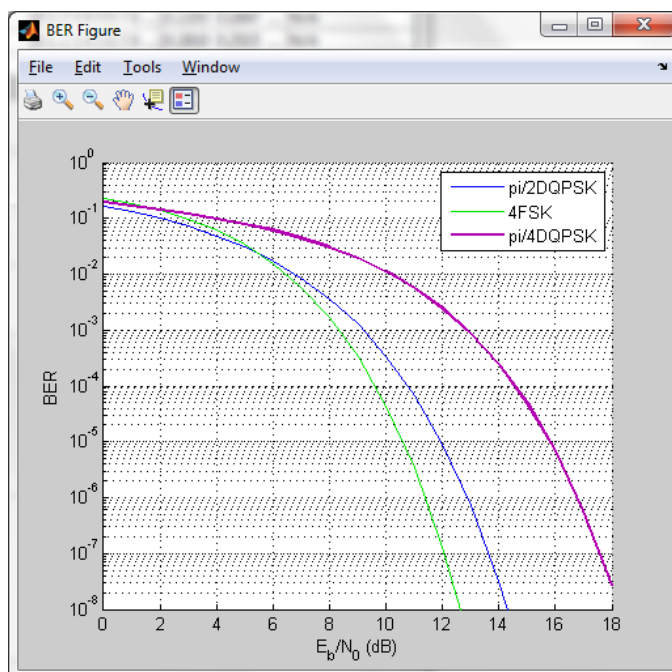


Figura 2.2: Simulación de modulación $\pi/4$ DQPSK vs 4FSK [A]

La Figura 2.2 es una simulación del BER (*bit error rate*) para determinar la robustez de modulación de un sistema con 4FSK vs DQPSK. La línea morada es la que tiene un sistema TETRA, la línea verde es la de un sistema NEXEDGE.

Existe una muy notoria diferencia en la modulación empleada, y claramente 4FSK tiene amplia ventaja en robustez [6].

Realizando una comparación de la modulación que utiliza TETRA vs NX-DN, podemos resaltar lo siguiente:

1. TETRA emplea 8 símbolos desplazados por fase, agregando mayor tasa de transmisión permitiendo transmitir mayor número de datos que NX-DN. Sin embargo, esta modulación es más susceptible a interferencia que 4FSK, como se puede apreciar en la Figura 2.2. Esta simulación se realizó sin la utilización de *Forward Error Correction (FEC)*, que tienen ambos sistemas.
2. NEXEDGE emplea 4 símbolos desfasados en frecuencia. La modulación 4FSK es la más robusta y sencilla para trabajar en un canal de 12.5kHz y 6.25kHz. Mantiene una tasa de transmisión de datos fijo pero garantiza que la información llegue con menor interferencia.
3. La tasa de transmisión de TETRA es 36kbps por cada slot de 25MHz, es decir 9kbps por radio. Esto es inferior a los 9600 bps por radio de NEXEDGE a 12.5kHz y 4800bps de 6.25kHz. La tecnología viene a ser muy similar en esta comparación, pero debido a la sincronización con repetidor que requiere TDMA, la tasa real se ve disminuida frente a FDMA.

En la tabla 2.1 se compara un sistema NEXEDGE, P25 y TETRA.

Descripción	NEXEDGE	Digital en Estados Unidos	Digital en Europa
Interfaz Común de Aire	NX-DN	P25 fase I	TETRA
Categoría	PMR Convencional / Trunking	PMR Convencional / Trunking	PMR Trunking
Tipo de Modulación	4 FSK		$\pi/4$ -QPSK
Ancho de Banda de Canal	6.25kHz / 12.6 kHz	12.5kHz	25kHz
Acceso a Canal	FDMA		TDMA
Tasa de Transmisión	4800/9600bps	9600 bps	36 kbit (4ch)

Tabla 2.1: Comparación NEXEDGE vs P25 vs TETRA [13]

Los sistemas NX-DN pueden compararse con los estándares reconocidos como P25 y TETRA, en los que se cumple las recomendaciones de la FCC de reducir los canales a 6.25kHz con tasas de transmisión de 4800bps. Además ofrece funcionalidades similares a las de sus competidores a costos inferiores.

Entre todos los problemas que se presentan en la práctica para un sistema TETRA, el principal es el siguiente:

- Debido a la sincronización de tramas con repetidor que requiere un portátil TETRA, este pierde cobertura cuando se encuentra nLOS (*near Line of Sight*) por ende existe la necesidad de utilizar Gateways móviles que funcionen como repetidor para incrementar área de cobertura dentro de los sitios de difícil acceso como son edificios, subterráneos, túneles.

Para ilustrar de mejor manera este problema la Figura 2.3 ilustra FDMA y TDMA y los compara para que se entienda el problema de sincronía de tramas.

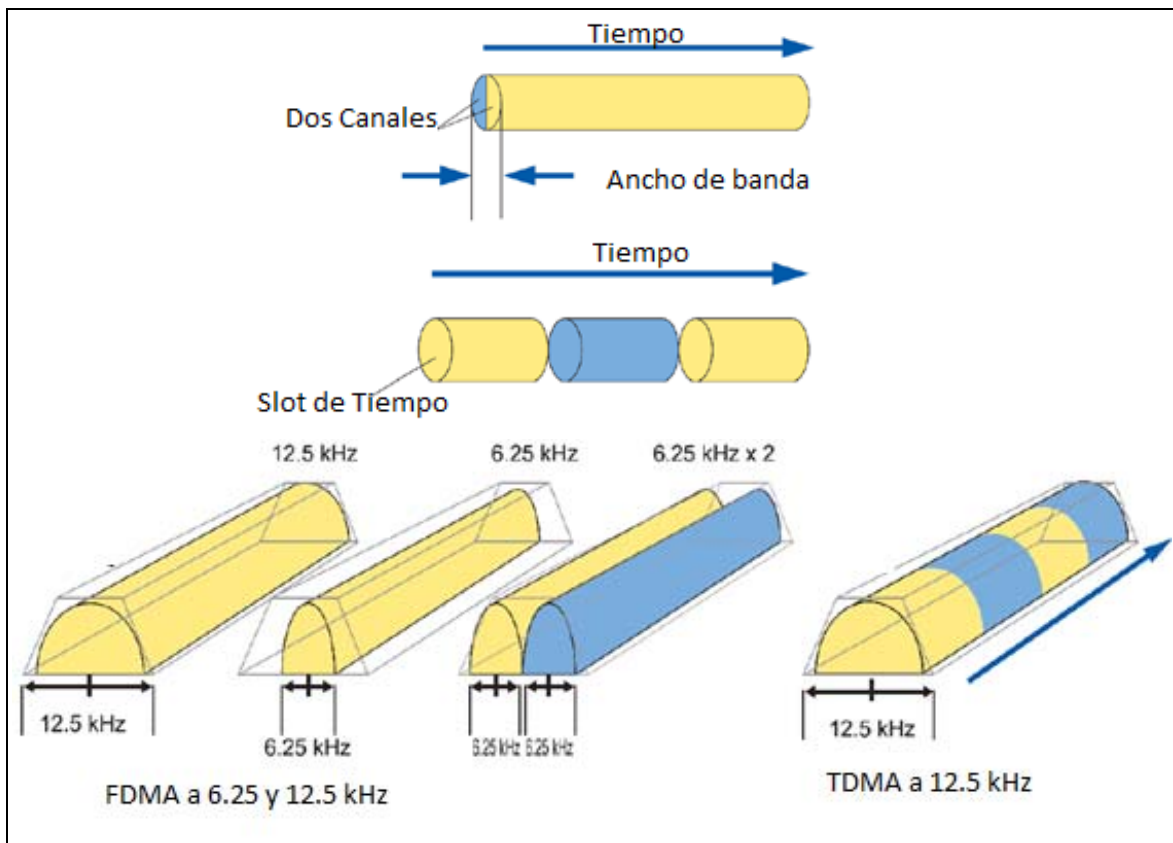


Figura 2.3: FDMA y TDMA [13]

De la Figura 2.3, podemos ver una comparación entre los sistemas basados en FDMA y TDMA. Vemos que el sistema TDMA requiere compartir canales en el tiempo, por ende esto hace que se requiera de tramas de sincronización.

Prueba de lo mencionado, es el empleo de equipos repetidores en los automóviles en todas las implementaciones TETRA para cubrir a equipos portátiles de las ciudades de Europa.

TETRA tiene buena recepción para los equipos instalados en los vehículos. Sin embargo, en misiones críticas con personal en interiores de edificios o sitios de nLOS se hace dificultoso. La recepción de los equipos portátiles es dificultosa y hasta a veces imposible. Por esta razón 2 fabricantes de TETRA ampliaron su línea de productos para crear GATEWAYS de comunicación, en el que el radio instalado en vehículo va conectado a un equipo que tiene la función de servir como una estación repetidora para los radios cercanos. Con esto, se podía penetrar edificios en lugares cercanos al vehículo para los radios portátiles.

Tomando como ejemplo la ciudad de Londres, existe desplegada una red TETRA con varias estaciones base a lo largo de la ciudad. Los equipos móviles no tienen cobertura dentro de zonas de difícil penetración. Todo esto se debe a la característica propia de TDMA por la sincronización de tramas.

Se mencionan casos puntuales en los que se TETRA utiliza gateways repetidores:

- Policía Metropolitana de Londres trabajando a 412Mhz con la marca Sepura.
- Ambulancias Inglesas – Soluciones de comunicación para ambulancias en Inglaterra. Las ambulancias inglesas tienen un móvil que repite la señal hacia los portátiles, permitiendo que estos reciban la señal cuando se alejan del vehículo en las emergencias médicas [5].
- *St. Petersburg Ambulance and Fire Service – Russia.* Con más de 4 millones de habitantes para un espacio de 606km² en la ciudad de St. Petersburg, la ciudad requería de un sistema de comunicaciones digital moderno que incorpore las bondades de un sistema que permita localización con GPS de sus unidades y un remplazo a sus sistemas de radios analógicos. Se desplegó la red TETRA y efectivamente se pudo constatar que el sistema presentó el mismo problema mencionado para la ciudad de Londres: Los radios portátiles no tienen cobertura dentro de edificios y sitios de difícil acceso. Como solución a esto, se vuelve a utilizar SEPURA SRG3500 dentro de los radios de vehículos en modo GATEWAY para que a través de él pueda extenderse el área de cobertura a los sitios requeridos, transmitiendo a una potencia de 10W [6]. Adicionalmente, los portátiles (por estándar) transmiten a 1W, mientras que las soluciones NX-DN a 3W. Esta clara diferencia ya da al lector la idea de que el despliegue de redes TETRA sufre de menor cobertura, con la intención de masificar celdas para una densidad alta de usuarios, de manera similar al funcionamiento de las celdas celulares.

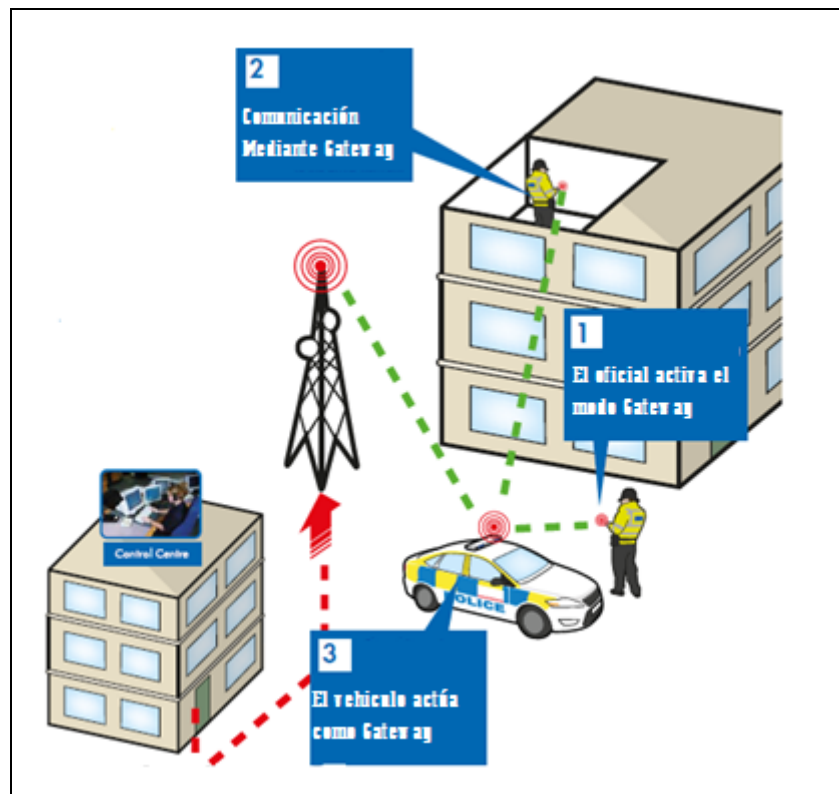


Figura 2.4: Solución de SEPURA para dar servicio a equipos portátiles dentro de zonas urbanas para la Policía Metropolitana de Londres [5].

- Todos los casos de utilización de TETRA se hacen en la banda de 450MHz a 470MHz, para el caso europeo. En el caso del Ecuador, los sistemas troncalizados trabajan por regulación a 800MHz, una frecuencia más alta, por lo tanto se reduce aún más el área efectiva de cobertura. Esta es la clara diferencia de un sistema TDMA vs FDMA.

Partiendo de estos análisis, podemos notar que la tendencia global es de masificar los sistemas de comunicaciones para alta densidad de usuarios con sistemas de menor cobertura. Nuestra geografía ecuatoriana no permite que este principio se aplique y más bien las montañas dificultan el crecimiento uniforme, por lo tanto un sistema que tenga mayor cobertura y menor densidad de usuarios queda más acorde a nuestra realidad.

2.2 DIGITALIZACIÓN DE SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES

La digitalización de los sistemas de radiocomunicaciones es un hecho que permite mejorar los servicios que se pueden brindar a los usuarios. Esta afirmación se la hace de manera general en las telecomunicaciones. Una digitalización permite que se introduzcan nuevas y mejores maneras de comunicación además de brindar servicios que antes estaban separados.

2.2.1 Transición Tecnológica de las Radiocomunicaciones

Los estándares analizados anteriormente, responden a los intereses del mercado de seguridad pública. Desde los inicios de las radiocomunicaciones hasta el presente, el sector ha experimentado pocos cambios en el uso de sus funciones y modo de operación. Un servicio full dúplex (como el celular) no es considerado eficiente para este sector. Por esta y otras razones, la llegada de la tecnología digital ofrece beneficios novedosos para el usuario, que deben mantener y garantizar la misma funcionalidad.

La digitalización permite codificar la señal de voz para que no sea interceptada, a diferencia del radio FM. Los codificadores comprimen la señal a tasas de transmisión bajas, con una calidad de voz aceptable.

Para permitir que se realice una correcta transición tecnológica, se debe poder trabajar simultáneamente en los sistemas FM y digitales para facilitar la migración. Esto se consigue con equipos que trabajan en modo mixto, es decir, la habilidad de comunicarse con un grupo de equipos en modo FM, y con otro grupo en modo digital. La mayoría de sistemas permiten esta migración, incluso pudiendo dar valor agregado como GPS y mensajería en los radios tradicionales FM. La diferencia radica en que en un sistema digital, los datos son procesados mucho más rápido y de manera imperceptible para el usuario, ya que los datos digitales en modo analógico se escuchan como tonos. Además, se puede procesar imágenes, telemetría y agregar funcionalidades de extensión de sitios mediante enlaces IP.

La FCC ha realizado la primera sugerencia de que los equipos deben cumplir en un futuro la reducción de ancho de banda a 6.25kHz. Las comunicaciones de dos vías en sus inicios ocupaban un ancho de banda de 25kHz. Con el tiempo, para ahorrar el espectro radioeléctrico, se impuso la utilización de canales de 12.5kHz. En el Ecuador la operación de frecuencias para el uso de radios de dos vías es con canales de 12.5kHz. Con la nueva disposición de la FCC, se espera que el Ecuador adopte esta recomendación y que los canales se reduzcan a 6.25kHz en un futuro. La única tecnología en el mundo que actualmente soporta y trabaja operaciones a 6.25kHz es NX-DN. Para cumplir con este requerimiento, los fabricantes de tecnología TDMA optaron por usar canales de 12.5kHz compartiendo 2 canales en el tiempo, dando un uso de eficiencia espectral similar a 6.25kHz en FDMA.

Tendencias Futuras: El mundo requiere cada vez mayor ancho de banda y el sector de las radiocomunicaciones ha tomado un giro con miras al futuro. Se está trabajando en el desarrollo de un estándar de seguridad pública basándose en LTE [3]. Los requerimientos de las agencias de seguridad buscan sistemas integrados en el que los datos de banda ancha sean embebidos dentro de su sistema de comunicaciones críticos. APCO y TETRA formaron una alianza para trabajar ambos en un nuevo estándar de banda ancha globalizado que permita obtener los mismos requerimientos de alta disponibilidad y redundancia de un sistema de comunicaciones convencional. Se espera que para el año 2020, se dispongan de sistemas LTE desplegados en la banda de 700MHz otorgados a las agencias de seguridad y sistemas comerciales celulares. Una ventaja de los sistemas LTE es poder masificar el envío de información con cobertura mucho más amplia que un sistema convencional tradicional con infinidad de aplicaciones. Esto sin embargo trae consecuencias como indisponibilidad para emergencias dada las características de funcionamiento de las redes públicas, por ende se piensa aislar el espectro para uso exclusivo de las agencias de seguridad y realizar una modificación al estándar para adaptarlo a la necesidad de misión crítica [4]. Este despliegue ya indica entonces que se lo realizará sobre zonas de alta densidad de usuarios en las ciudades más grandes del mundo y con justa razón para proveer comunicaciones críticas que requieren voz, datos y video de banda ancha. En el Ecuador, después de la liberación del espectro de Televisión

Digital, quedaría libre un rango de frecuencias para otorgar a este tipo de comunicaciones, quedando en manos de las operadoras celulares por su alto costo de despliegue. Ecuador no posee alta densidad de usuarios en seguridad pública como otros países, así que una inversión por parte del sector privado quedaría pendiente por verse en un futuro. Un operador del estado podría realizar dicha inversión y un futuro estudio podría revelar las tendencias del mercado ecuatoriano.

2.2.2 Aplicaciones de la Tecnología Digital de Radio

Entre las aplicaciones que se puede realizar en un sistema digital de radio, se puede destacar las siguientes:

- Rastreo satelital GPS
 - Control de velocidad, localización, geocercas.
- Envío de mensajes de texto
- Botones de Pánico
- Envío de imágenes
- Over the air programing OTAP (programación vía aire)
- Extensión de sitios mediante enlaces IP
- Roaming
- Radio Kill (inhibición de radio)

La Figura 2.5 muestra un diagrama de conexión de sitios troncalizados extendidos por IP.

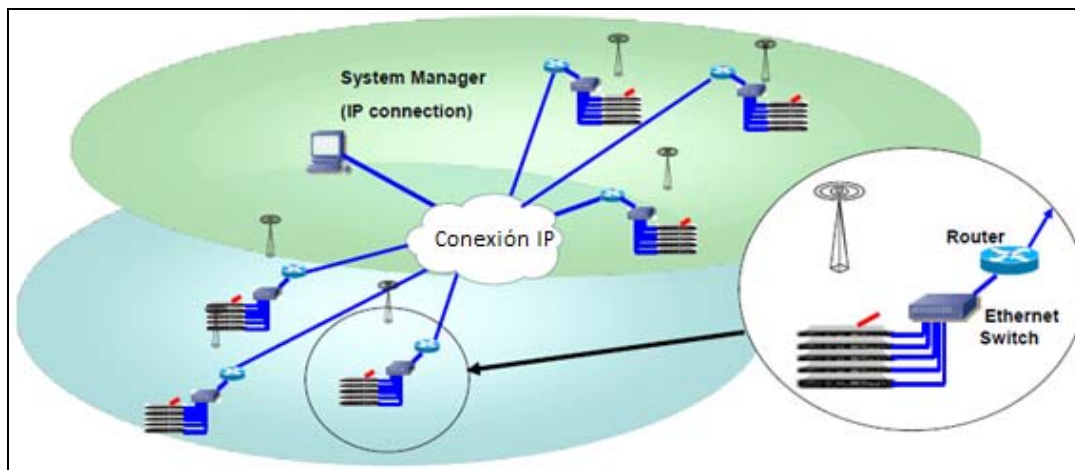


Figura 2.5: Conexión por IP de sitios troncalizados [13]

Se puede ver que los enlaces al ser IP, pueden virtualmente extenderse a donde requiera el usuario a través de la nube de internet o enlaces privados, haciendo que se vean como un solo sitio. Esto permite a los operadores extender servicio de acuerdo al crecimiento y demanda.

La Figura 2.6 muestra un ejemplo de OTAP (*Over the Air Programming*, Programación sobre el aire). Esta funcionalidad permite reprogramar una flota/grupo de radios sin la necesidad de conectarlos físicamente con una computadora, y los reprograma directamente en el campo.

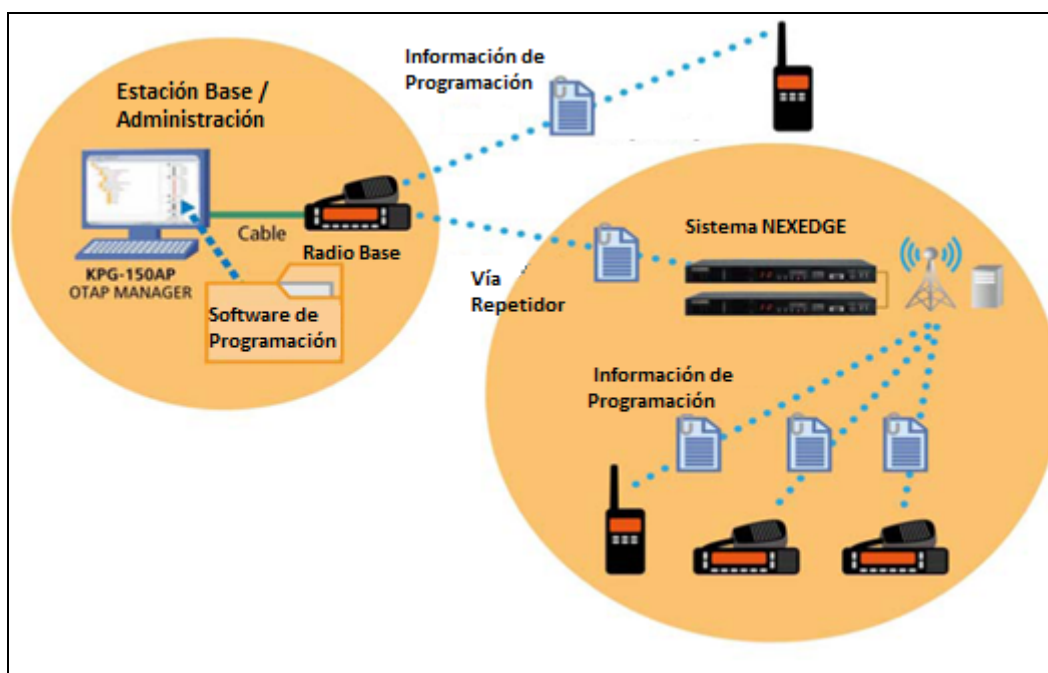


Figura 2.6: Programación vía aire OTAP [14]

La Figura 2.7 muestra el ejemplo de envío de imágenes para brindar servicio de video vigilancia a través de RF. Esto es útil para colocar cámaras en lugares móviles como autos, o sitios donde no se puede cablear. La calidad de imagen es de baja resolución, pero suficiente aceptable para la gestión que requiera un usuario.

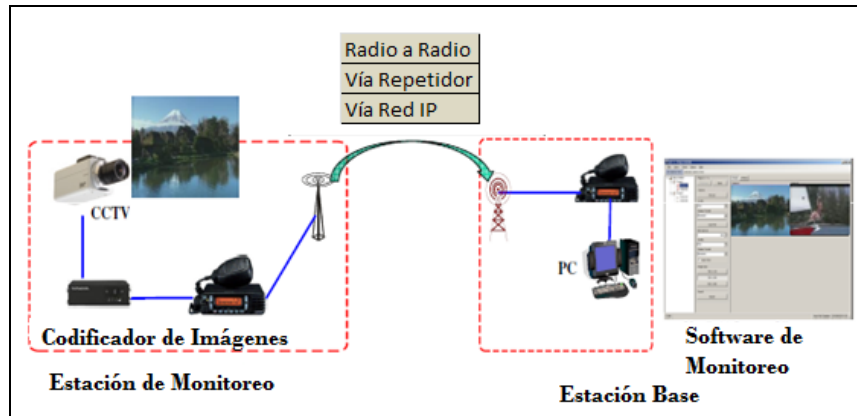


Figura 2.7: Video vigilancia mediante RF [13]

Una de las funciones que puede resultar más interesante para los usuarios es la conexión de los equipos de radio con la red pública telefónica y con la telefonía IP, como muestra la Figura 2.8.

Aunque la regulación ecuatoriana prohíbe esta conexión a los operadores de sistemas troncalizados, esta opción es viable cuando se tiene requerimientos privados con líneas analógicas o IP que no se conectarán con la red pública.

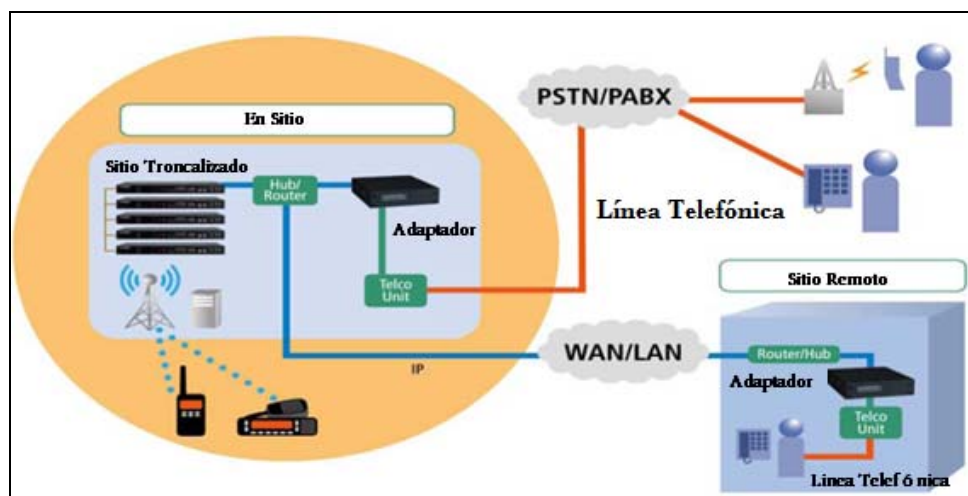


Figura 2.8: Conexión de sistemas troncalizados con la telefonía [13]

CAPÍTULO III

3 DISEÑO DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES DIGITAL TRONCALIZADA

3.1 SIMULACIÓN DE COBERTURA

Se desea brindar servicio de radiocomunicaciones al transporte pesado en la ruta Quito-Guayaquil, por lo tanto, el primer requerimiento es identificar el sitio desde el cual se puede conseguir la mayor cobertura para cubrir la ciudad de Quito y alcanzar la ruta hacia la costa pasando por la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas. El cerro más adecuado es el cerro Atacazo, cuya altura permite cubrir la mayor parte de la ruta con ciertos puntos de sombra en la carretera que une Aloag - Santo Domingo. Estos puntos se pueden ver en las simulaciones de las páginas siguientes.

Posteriormente, se tiene que cubrir desde Santo-Domingo el camino que se recorre hasta la ciudad de Guayaquil, siendo el cerro Cochabamba el más adecuado para ubicar las repetidoras, con el cual se cubre gran parte de todo el trayecto. Con estos dos cerros ya se tiene cobertura en toda la carretera y ciudades principales con equipos de comunicación móviles, a instalarse en los vehículos. Para el servicio de equipos portátiles, será necesario mejorar la señal en la ciudad de Quito mediante un sitio de repetición en el cerro Pichincha, y para la ciudad de Guayaquil mediante el cerro Azul.

Las coordenadas del cerro Atacazo para la primera fase del proyecto son las siguientes:

Longitud: 78° 37' 33.1"W

Latitud: 0° 21' 07.32"S

Altura: 4420m

Desde este sitio, se debe analizar la cobertura para ubicar correctamente la caseta y altura de las antenas, por lo cual se procede al estudio de propagación.

3.1.1 Estudio de Propagación Cerro Atacazo

A continuación se procederá a estimar la propagación y desempeño que tendrá el sistema utilizando el software de simulación SIRENET v3.4 de INTELIA. Este simulador permitirá obtener una idea cercana del funcionamiento del sistema.

Primero, se escoge la cartografía del Ecuador, como se puede observar en la Figura 3.1.

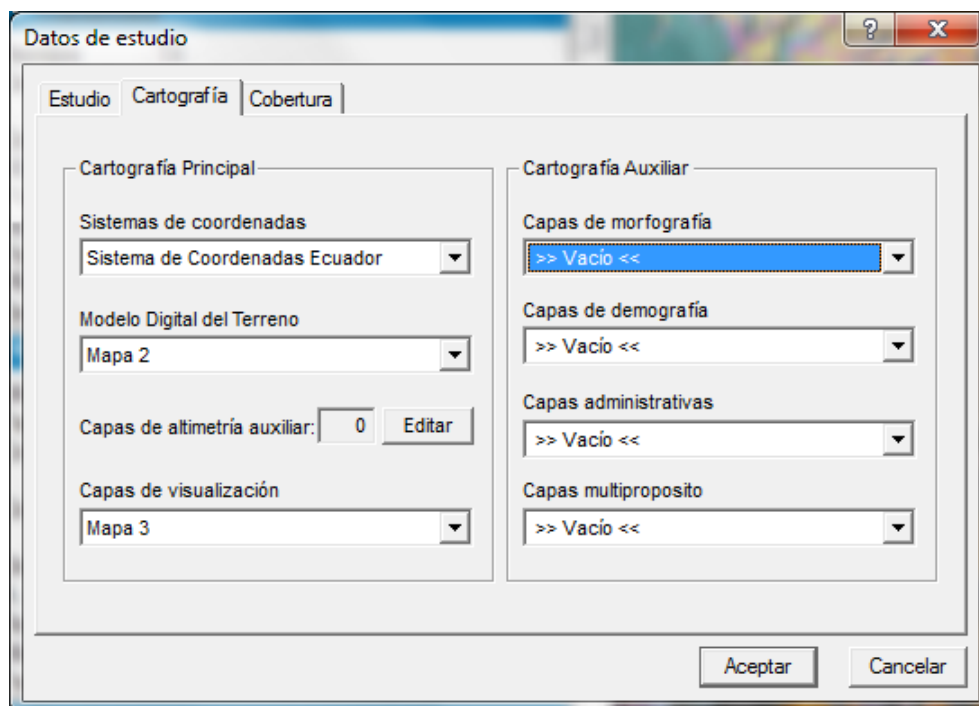


Figura 3.1: Datos del estudio [A]

En la pestaña Cobertura, se escoge el método de Comunicaciones móviles banda 400 (PMR) debido a que éste en su interior toma en cuenta el método

REC. 526 de la UIT como indica la Figura 3.2. Esto es de suma importancia, ya que la recomendación estipula lo siguiente:

Propagación por difracción: “Se recomienda su uso para el cálculo de las intensidades de campo en trayectos de propagación por difracción, que pueden corresponder a la superficie de una Tierra esférica o a terrenos irregulares con diferentes tipos de obstáculos” [12].

La irregularidad y obstáculos del terreno que se presenta desde el cerro Atacazo hacia los diferentes puntos de interés, hace que se requiera éste método de cálculo. Luego de la simulación, se podrá observar si efectivamente cumple con los requerimientos y expectativas con las mediciones de campo. En los parámetros de cálculo y demás pestañas se deja los valores por defecto, como muestra la Figura 3.3.

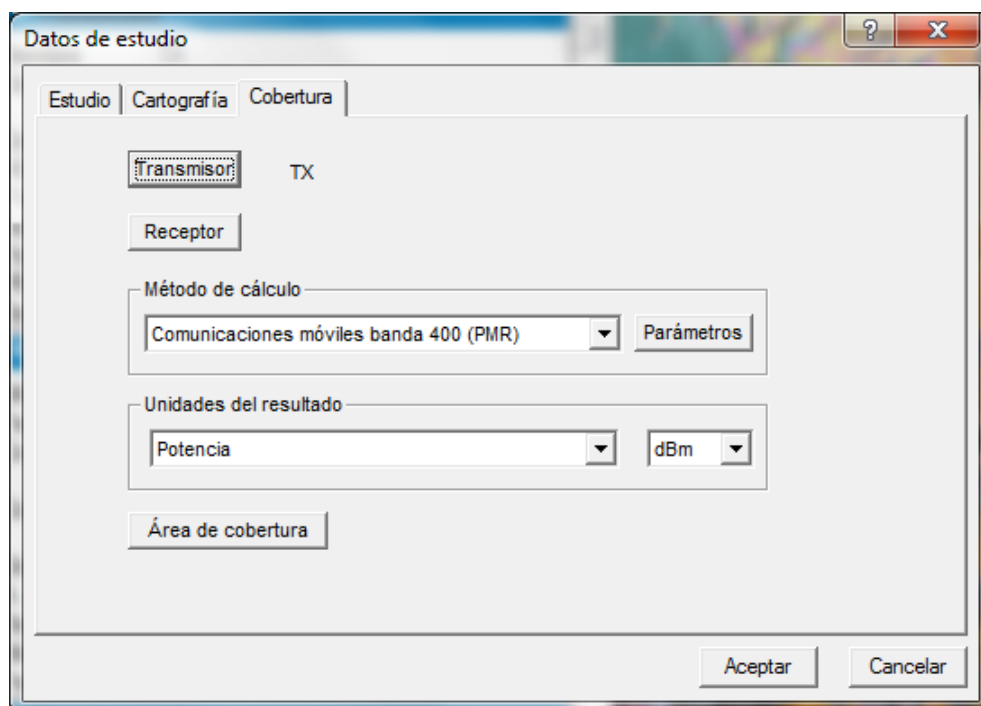


Figura 3.2: Método de cálculo [A]

Parámetros generales de cálculo

Parámetros del cálculo | Calidad e Indisp. | Estadísticos | Mejoras

Nombre:

Factor K:

Resolución: m/pixel

Método:

Atenuación por gases
Densidad vapor agua: gr/m³

Atenuación por reflexiones

Atenuación por lluvia
Precipitaciones (R_{0,01%}): mm/h

Tiempo asegurado: %

Figura 3.3: Parámetros de cálculo [A]

Transmisor

Identificación | Parám. radio | Parám. antena | Fuente

Servicio:

Fase:

Red:

Polarización:

Frecuencia

Banda:

F. referencia: MHz Canales:

Canal N°:

Retardo: μsg

Figura 3.4: Parámetros del transmisor [A]

En la Figura 3.4, se define los parámetros del transmisor con la utilización del servicio MPT-13XX que es el más cercano a NX-DN y se modifica la frecuencia de trabajo a 800MHz con un ancho del canal a 12.5kHz. En los parámetros de magnitud-umbral, se utiliza una señal a ruido de 12dB conocida como SINAD (razón de señal a ruido y distorsión), con una interferencia C/I (distorsión de intermodulación en el receptor) de 84dB (NXR-900) determinada por el equipo y una cobertura con sensibilidad de -110dBm. Los equipos NXR-900 tienen una sensibilidad de 0.33uV en modo digital a 12.5kHz y 0.30uV en modo analógico a 12dB SINAD, que corresponde a -117dBm. Los equipos portátiles NX-410 tienen una sensibilidad mayor de -119dBm (0.25uV). El manual *Programa de Entrenamiento de Usuario de Equipos Kenwood NX-DN* [13], indica que la calibración de equipos se debe realizar a +6dBm de la sensibilidad de equipo por lo que se decide tomar como referencia el valor de -110dBm para la sensibilidad de los equipos en esta etapa de simulación, a partir del equipo de menor sensibilidad. Esto implica que los resultados de la simulación serán las de peores condiciones, pudiéndose mejorarse dado el entorno y condiciones reales.

En la figura 3.5, para modificar el servicio, se calibra la frecuencia a 860,9465MHz que es la portadora del canal y se hace la separación de explotación del servicio a 1MHz entre transmisores y -45MHz entre el transmisor y receptor, en modo semiduplex, siendo esto una definición del estándar de troncalización.

Nombre:	
MPT-13XX base-móvil	

Magnitud/Umbral:	
Interferencia	C/I 84.0000 dB
Cobertura	Pot. -110.0000 dBm
C/N	12.0000 dB

Explotación del servicio	
Modo	Semiduplex
Tx_Tx	1 MHz Exacta
Tx_Rx	-45 MHz Exacta

Descripción:	
Servicio NX-DN	

Aceptar Cancelar

Figura 3.5: Descripción del servicio NX-DN [A]

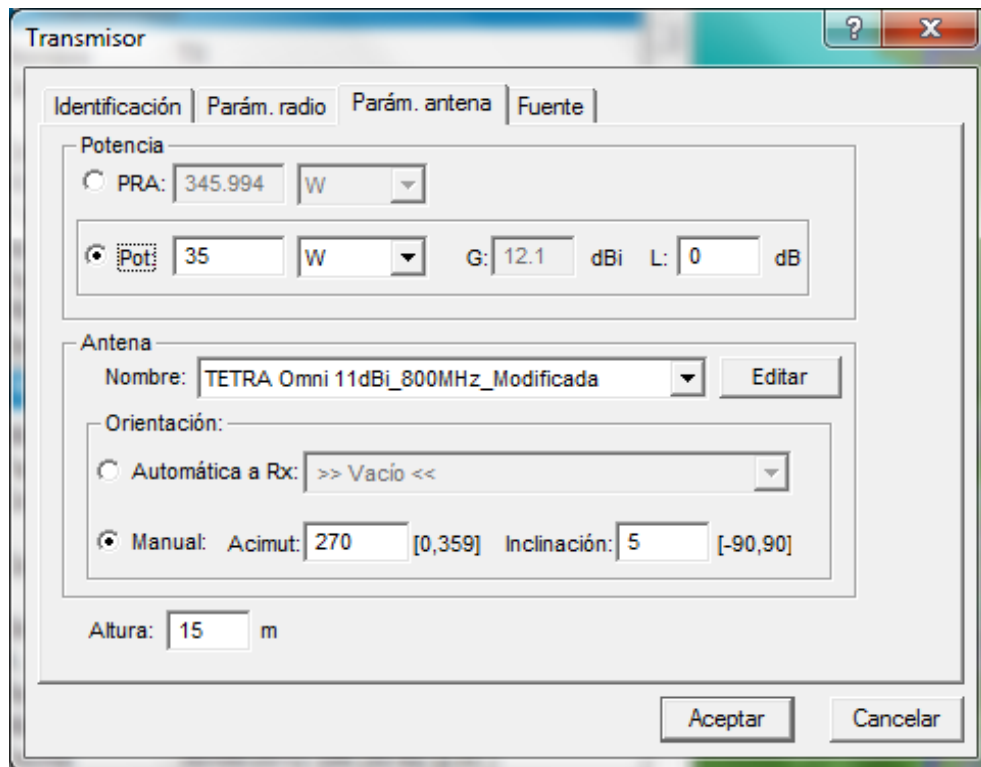


Figura 3.6: Parámetros de la antena [A]

En la salida del combinador, previo el envío de la señal a la antena de transmisión, se tiene una señal de potencia de 35[W]. Esta señal se envía con cable heliax hacia antenas omnidireccionales de 12.1dBi. La antena que en el simulador se asemeja más al del sistema NX-DN es la TETRA omnidireccional de 11dBi. Esta es inclinada 5° con dirección 270° para que apunte hacia la costa ecuatoriana, en donde interesa la cobertura. Además, es modificada de 11 a 12.1dBi. Es posicionada a 15m de altura en la torre. El diagrama de radiación de las antenas se puede apreciar en las Figuras 3.7 y 3.8.

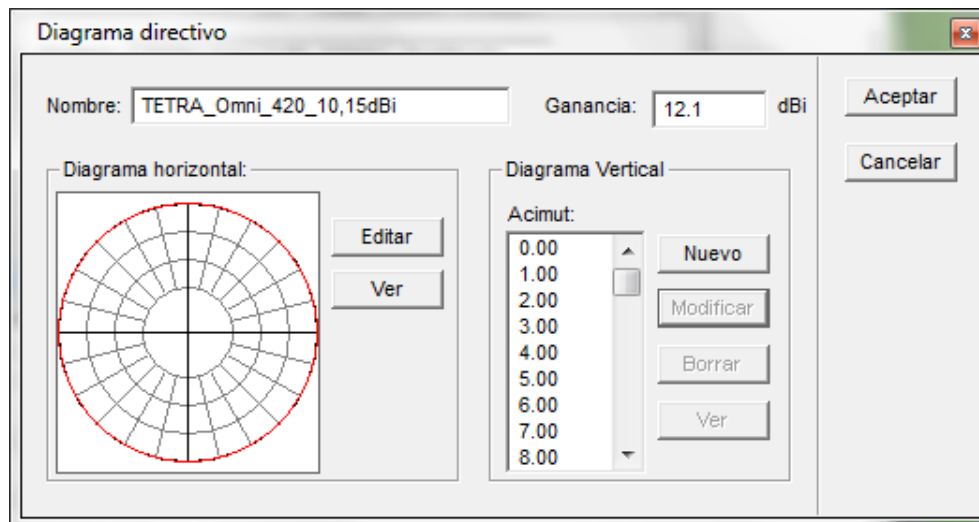


Figura 3.7: Diagrama horizontal de antena TETRA OMNI de 12.1dBi [A]

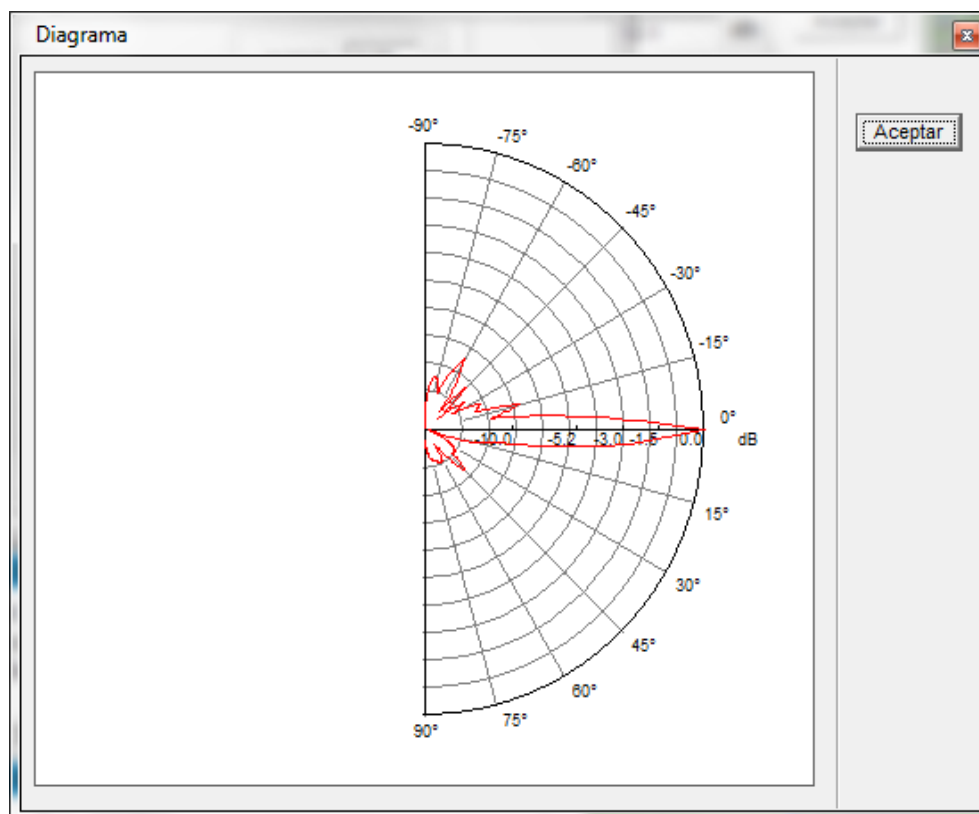


Figura 3.8: Diagrama vertical de antena TETRA OMNI de 12.1dBi [A]

Figura 3.9 nos muestra el receptor de cobertura, y se utiliza parámetros cercanos a los del equipo receptor Kenwood NX-800, que tiene una sensibilidad de 0.28uV, impedancia de 50Ω, pérdidas en conectores y cable de 2dB.

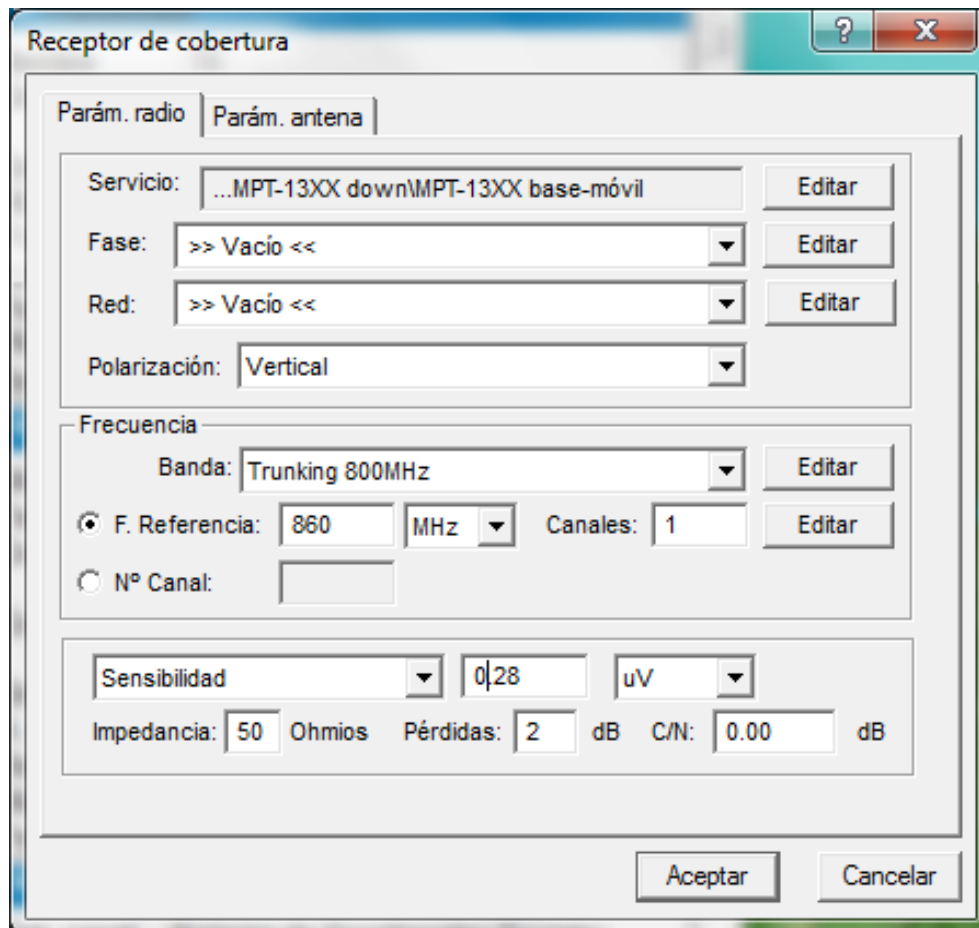


Figura 3.9: Receptor de cobertura [A]

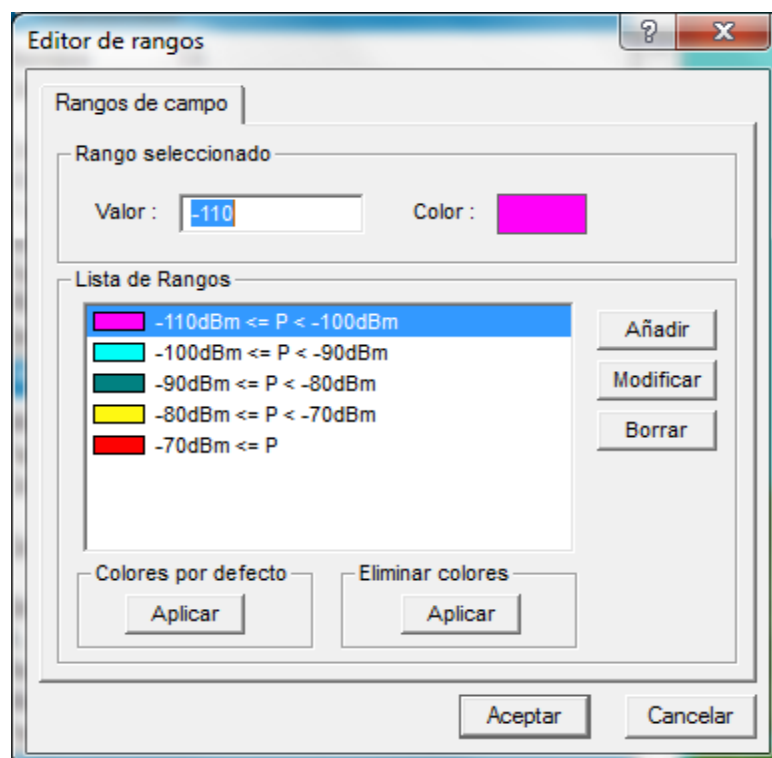


Figura 3.10: Editor de rangos de campo [A]

En el editor de rangos de campo (Figura 3.10), se crea una tabla que permita ver la intensidad de señal en el mapa con un grado de nitidez que permita distinguir si la intensidad de señal será buena o mala. Se define el límite de -110dBm como aceptable para que el equipo pueda decodificar la señal de manera entendible, de acuerdo al análisis realizado anteriormente. Los equipos aún podrían decodificar audio hasta los -119dBm , sin embargo en la práctica el audio es entendible hasta el rango de -100dBm a -110dBm , dado que a partir de ese nivel de señal la tasa del B.E.R. puede incrementar y también se presentan los problemas de multitrayecto que inciden sobre errores en los bits recibidos en el receptor.

Definido todos los parámetros, se procede a realizar el cálculo de propagación, generando la gráfica que muestra Figura 3.11.

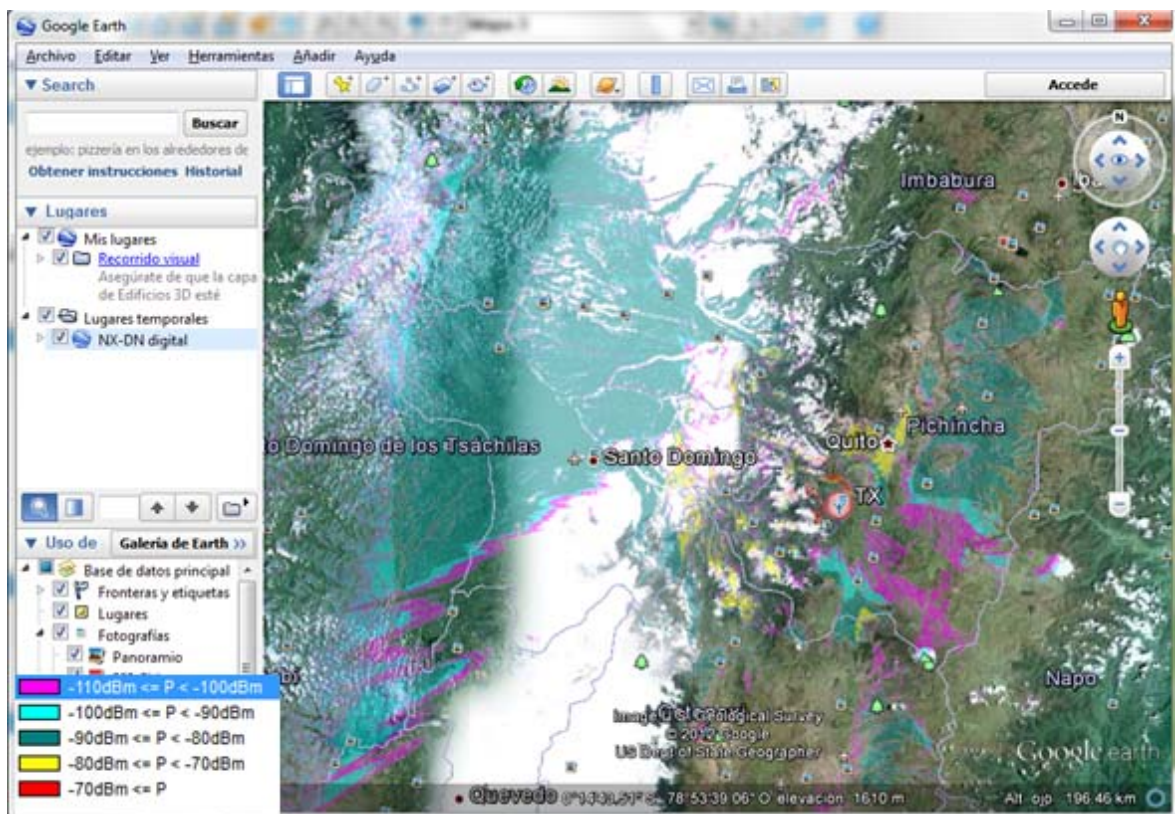


Figura 3.11: Simulación de cobertura en sistema troncalizado 800MHz [A]

Se puede observar el resumen de los parámetros del cálculo en la Figura 3.12.

Los colores que se pueden observar en el mapa corresponden a los niveles de señal definidos como Excelente (Rojo), Muy bueno (Amarillo), Bueno (Azul), Regular (Celeste) y Limite de Cobertura (Morado).

Desde el mapa de Figura 3.11 se puede visualizar que Quito tiene cobertura parcialmente muy buena (amarillo) y que las carreteras que parten desde Santo Domingo hacia el norte están cubiertas en su mayoría con una señal buena (azul). Hacia el sur, no se puede llegar desde el cerro Atacazo, por lo cual para ese estudio se realiza la simulación desde el cerro Cochabamba. El lector puede utilizar la Figura 3.10 para identificar los niveles de señal de mejor manera en las Figuras posteriores.


▼ Transmisor	
Nombre	: TX
Coordenadas	: Lon: 78 37 33.100W Lat: 0 21 07.320S
Cota	: 4300 m
Alt. antena	: 15.0 m
Polariz.	: Vertical
Antena	: TETRA Omni 11dBi_800MHz_Modificad
Frecuencia	: 860 MHz
PRA	: 345.993614 W
Servicio	: MPT-13XX base-móvil
▼ Cobertura	
Mét. Est.	: Rec. 526 UIT-R
Factor K	: 1.33333
Coordenadas	: NO X:609651.00 m NO Y:74891.00 m
Coordenadas	: SE X:819474.00 m SE Y:-250160.00 m
Dimensiones	: 177200.00x249132.00 m
A. antena Rx	: 5.00 m
Resolución	: 100.000 m
Magnitud	: Potencia (dBm)
Fecha	: 30/08/2012 (06:20:42 p.m.)
▼ Escala	
Sist. coord.	: Sistema de Coordenadas Ecuador
Escala	: 1 : 1401115
1 Div = 10000 m	
	

Figura 3.12: Resumen de parámetros de cálculo [A]

La ciudad de Quito tiene la mayor intensidad de señal, en el que se cubre la zona de interés que es al Norte por la zona industrial, pasando por la ciudad hacia el sur, con un campo menor en la entrada a Guamaní, como indica la Figura 3.13

Desde el cerro Atacazo se consigue dar servicio a gran parte de la ciudad de Quito. A considerar, que cuando el móvil se mantenga cerca de línea de vista con el cerro, la comunicación será excelente. Si el móvil estuviese obstruido por montañas y edificios, los multitrayectos podrían hacer que decremente la señal. El color amarillo determina una zona de -70dBm a -80dBm , por lo cual la señal se considera fuerte y el audio de muy buena calidad. En Tumbaco, se pierde la intensidad al segundo rango de -80dBm a -90dBm siendo este un rango aceptable y de audio entendible.

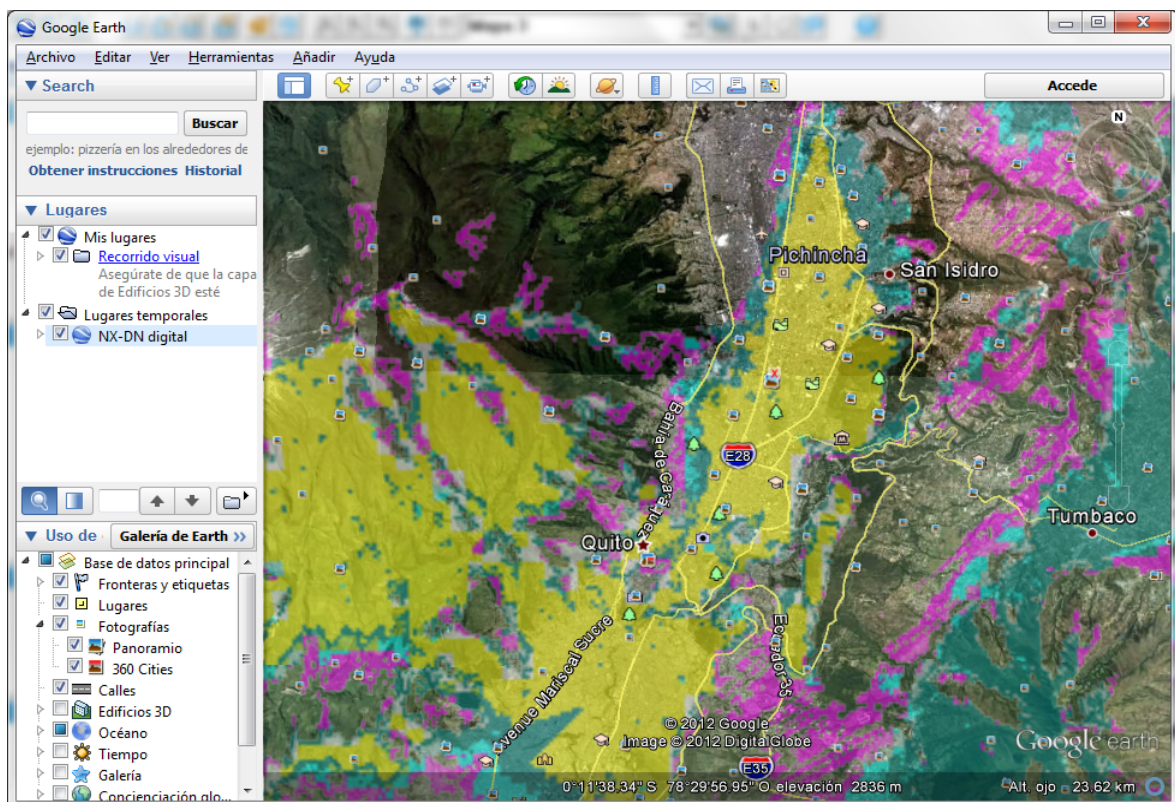


Figura 3.13: Cobertura en la ciudad de Quito [A]

Luego se presenta una zona de sombra de difícil acceso desde el sector de Amaguaña con rasgos intermitentes hasta pasar Aloag. Esto se debe a que la ubicación de la antena del cerro Atacazo está en la parte oriental, inclinada hacia el oeste, mientras que hacia el este existe una pequeña loma que obstruye toda la zona mencionada, como se puede observar en la Figura 3.14 y Figura 3.15.

Debido a esto, parte de la carretera en la zona de Aloag no podrá ser cubierta en la simulación. Sin embargo, en la práctica, los equipos móviles debido

a su potencia de transmisión y ganancia de antenas más recepción de señal por rebote podrían comunicarse en un alto porcentaje del trayecto. La no cobertura aplicaría para los equipos portátiles.

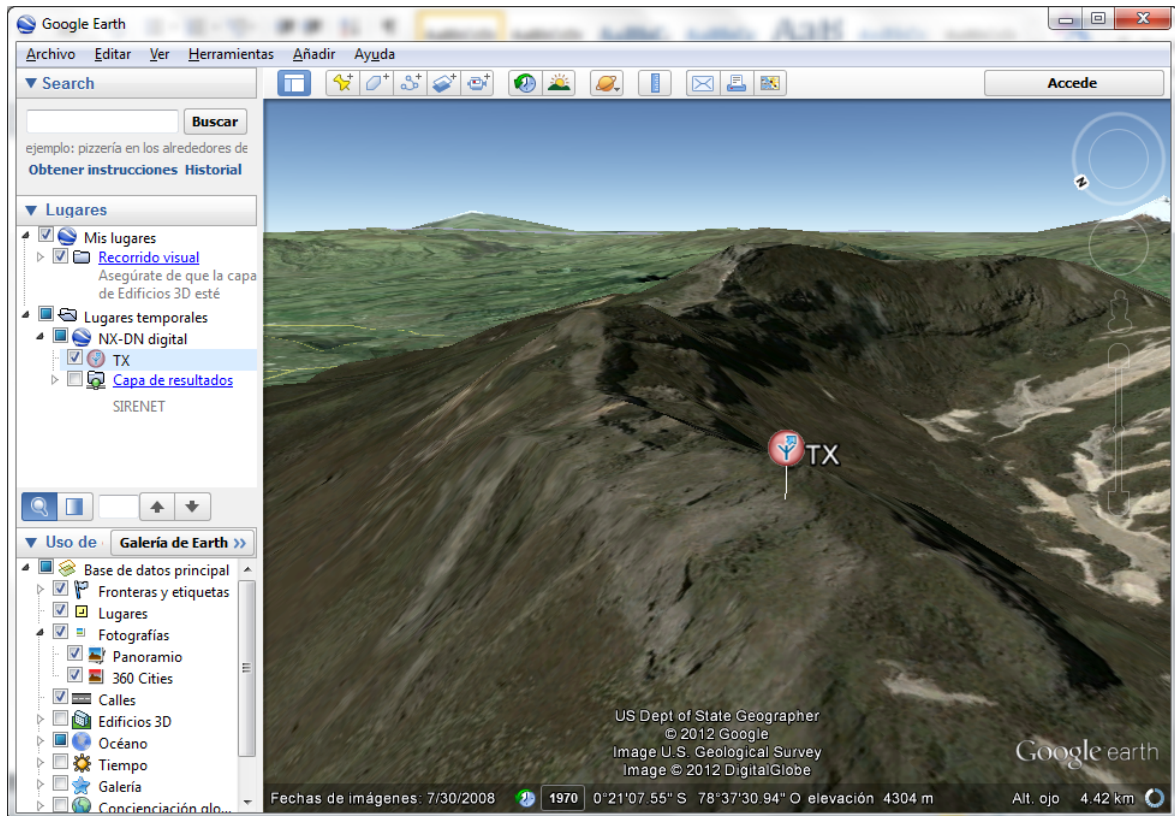


Figura 3.14: Ubicación de antena en el cerro Atacazo [A]

En la Figura 3.15, el sur de Quito (Amarillo) experimenta la mejor señal del sistema por su proximidad y línea de vista con el cerro Atacazo. El valle de los Chillos presenta una señal moderada que permite una comunicación fluida. La avenida Simón Bolívar, debido a su posición alta, goza de una buena señal en su mayoría de trayecto, y es en donde interesa que exista una buena comunicación ya que es la vía de tránsito del transporte pesado.

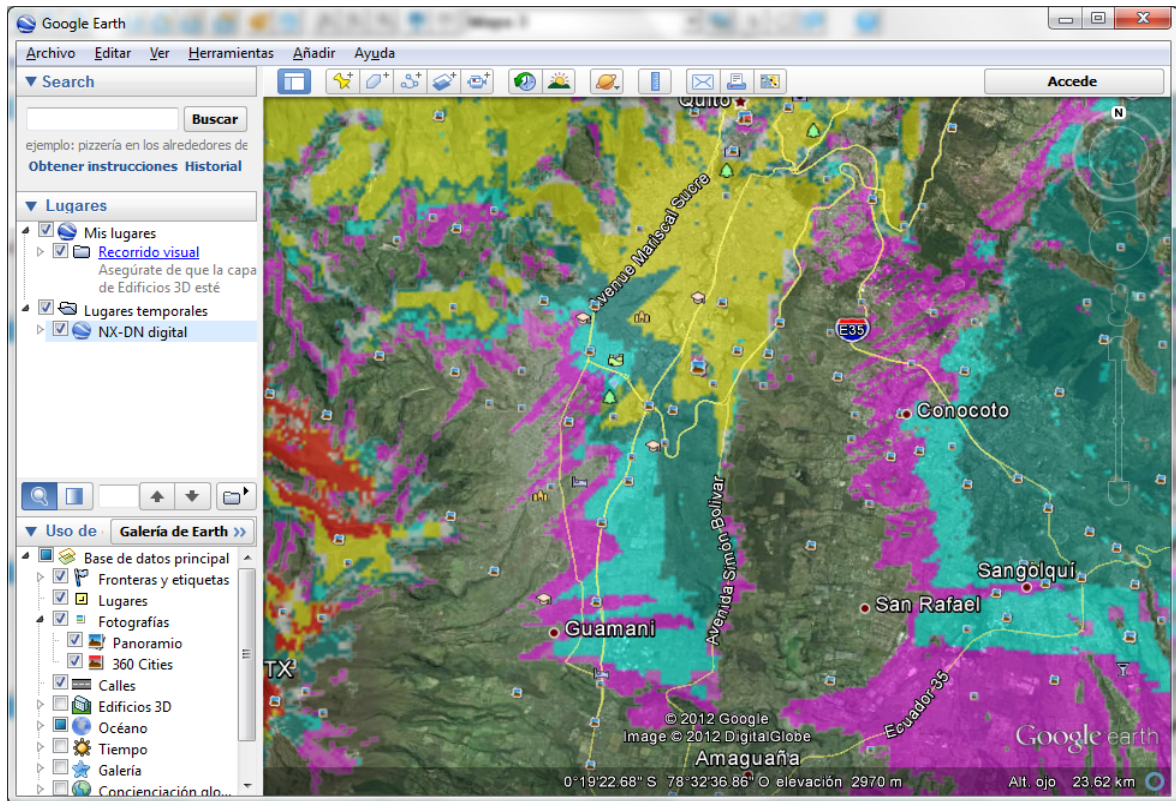


Figura 3.15: Cobertura del sur de Quito y Conocoto [A]

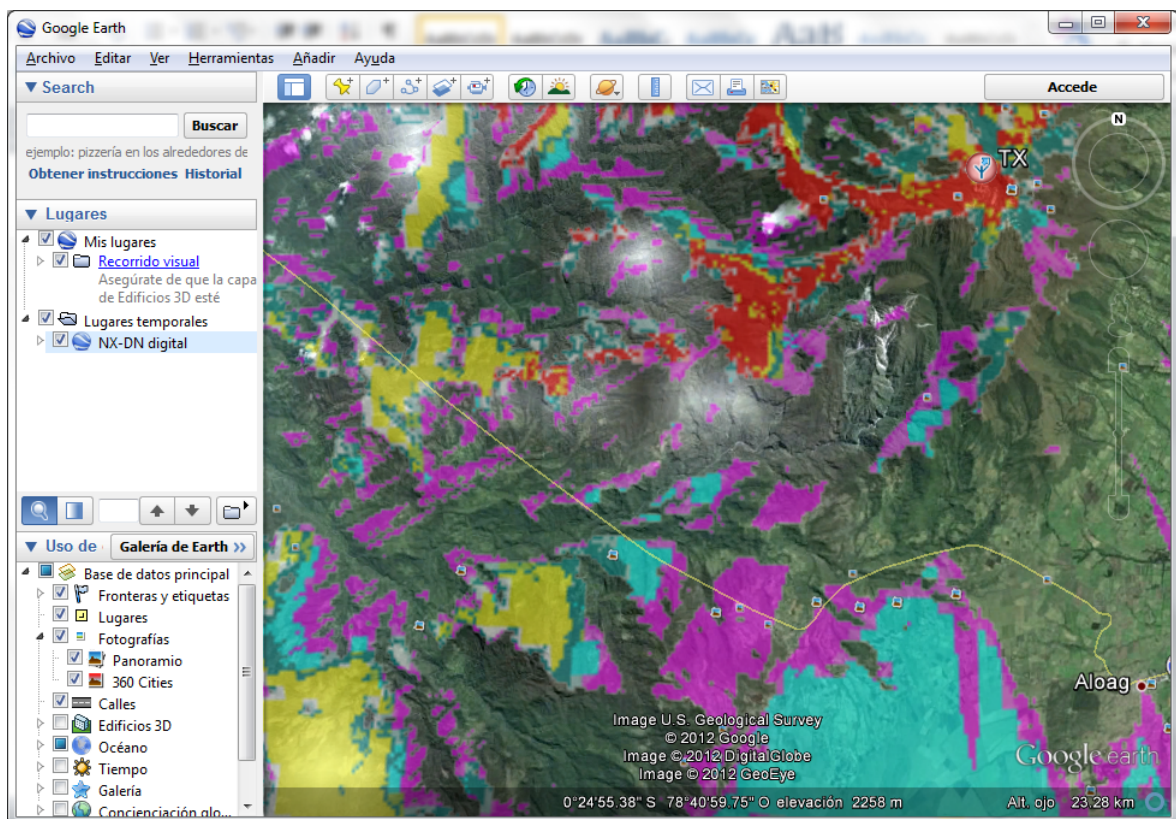


Figura 3.16: Carretera Aloag-Santo Domingo [A]

Figura 3.16 muestra la parte sur del cerro Atacazo donde se encuentra la carretera, y se puede ver que ciertas partes de ella no tienen cobertura aparentemente. Esto se debe a la ubicación de la antena en el cerro y la geografía del terreno. Se puede mejorar la aproximación si es que se incrementa la potencia de transmisión o con una elevación de la antena en el simulador. Vale destacar que se debe corroborar en la práctica éste resultado con mediciones de campo, como veremos en el siguiente capítulo.

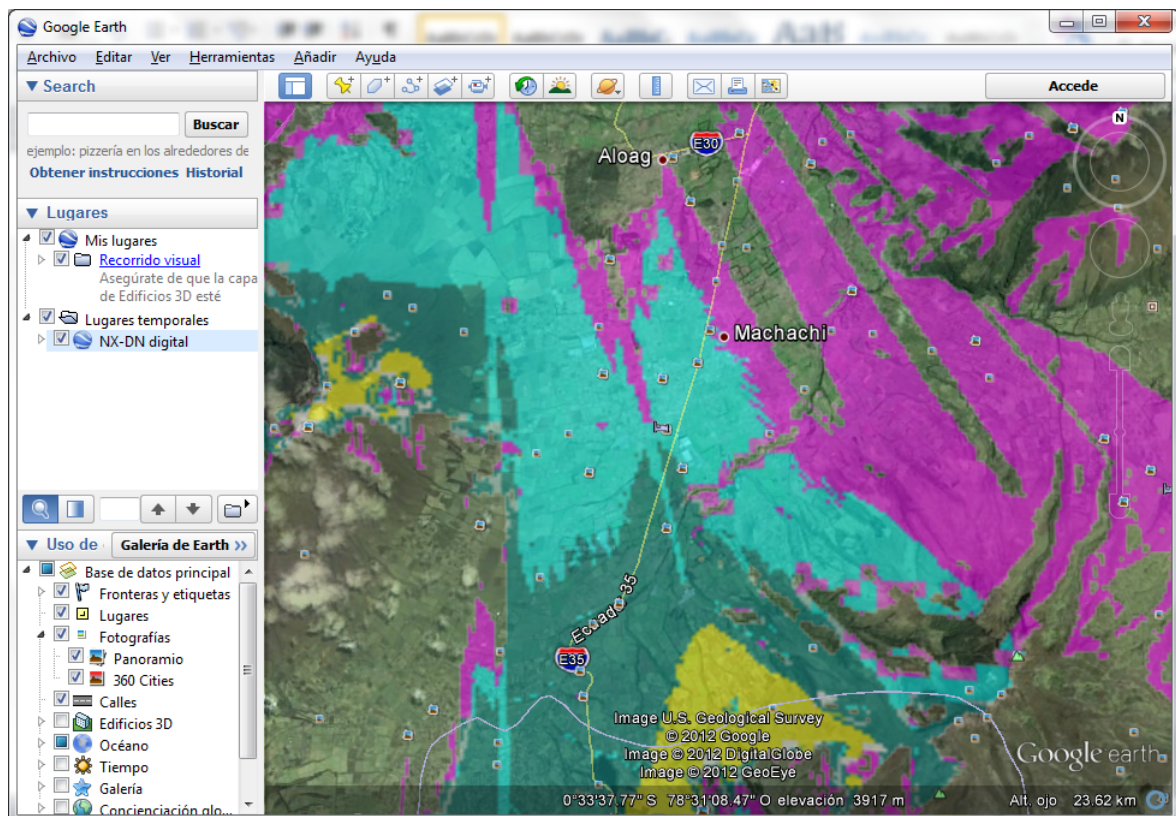


Figura 3.17: Cobertura en la zona Machachi [A]

La Figura 3.17 muestra la cobertura de la zona de Machachi hacia el sur, y con esto queda terminada el área de interés de la zona sierra. Se puede observar que conforme se aleja, se obtiene línea de vista y la señal mejora, llegando incluso a tener una señal amarilla de -70dBm a -80dBm .

La simulación muestra niveles de señal aceptables para dar servicio a Machachi, por lo tanto se podría ofrecer el servicio de radio digital a ese sector si es que las pruebas de campo comprueban la cobertura.

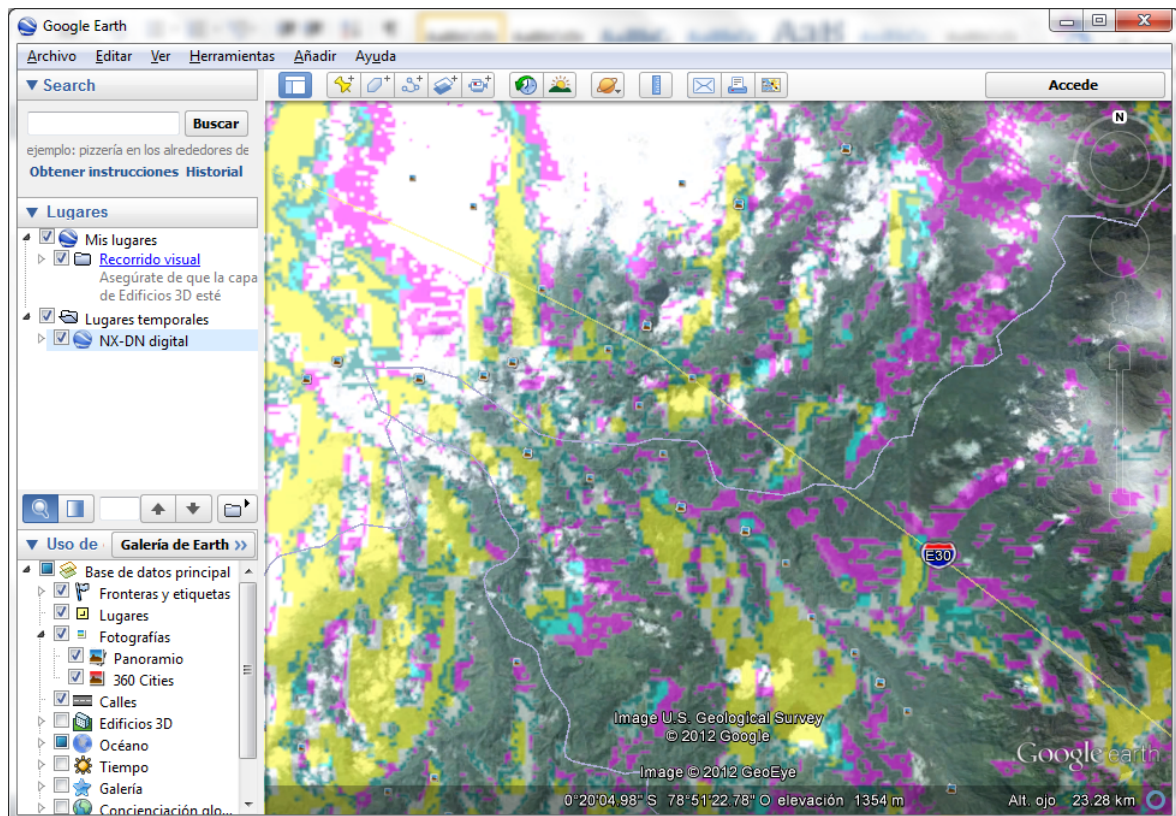


Figura 3.18: Carretera Aloat-Santo Domingo centro [A]

En la Figura 3.18, gran parte de la carretera Aloat-Santo Domingo tiene problemas de cobertura debido al difícil terreno en el que se encuentra. Sin embargo, se puede conseguir comunicación en la mayor parte de ella, y los equipos móviles ayudan a que se pueda comunicar en un grado entendible. Existirán zonas donde efectivamente no se podrá comunicar, pero se espera que las pruebas con equipos móviles permitan llegar con al menos cierto grado de comunicación. La simulación es una aproximación, por ende habrá que comprobarlo en el campo.

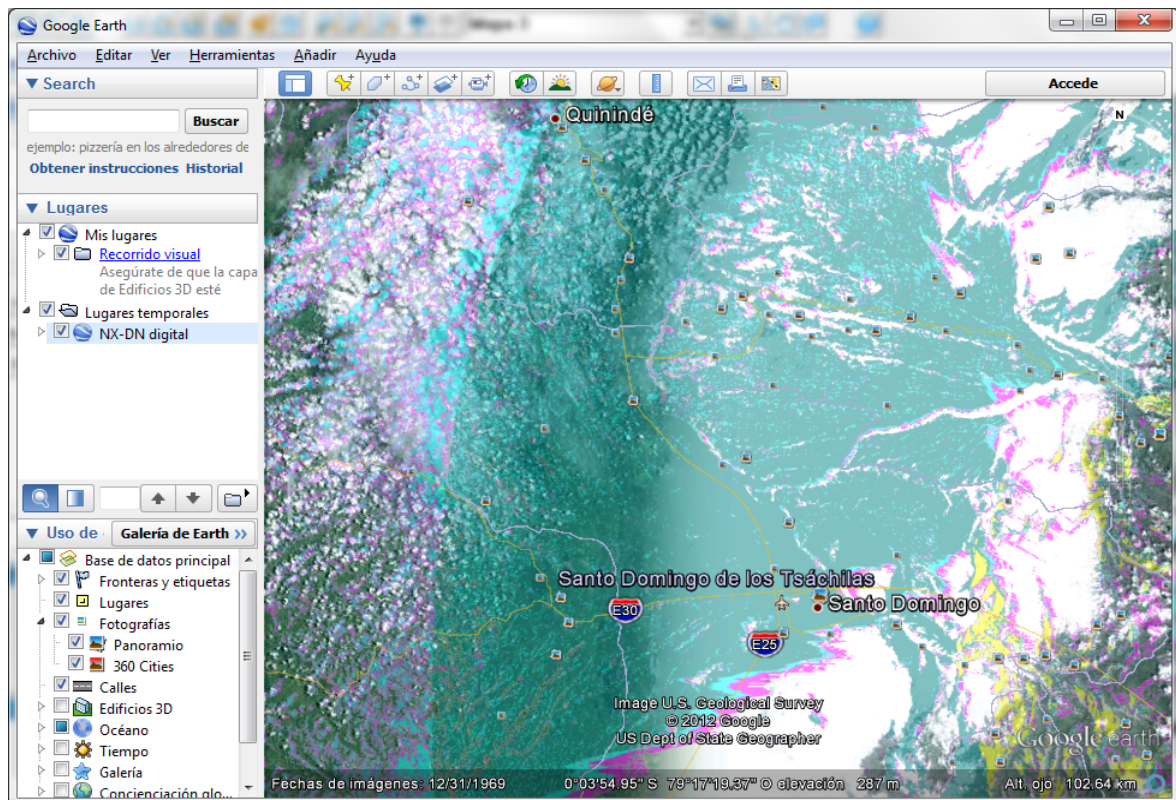


Figura 3.19: Cobertura Santo Domingo de los Tsáchilas y alrededores [A]

En Santo Domingo, la señal vuelve a tomar fuerza, en el rango de los -80dBm a -90 dBm, por lo que se puede comunicar de manera satisfactoria en toda la ciudad de Santo Domingo y a lo largo de toda la ruta hasta Quinindé, como muestra la Figura 3.19. El interés del proyecto es alcanzar a cubrir la ruta Quito-Guayaquil, por lo que el tráfico se moverá en la dirección sur.

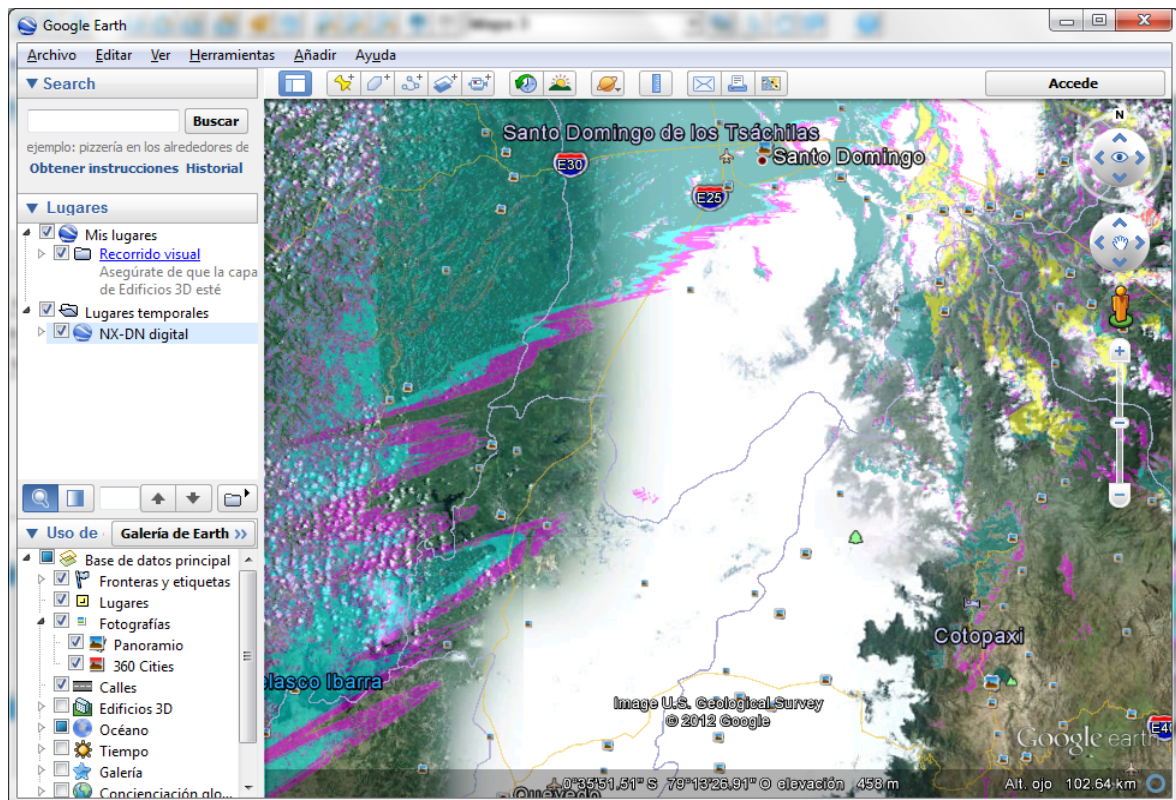


Figura 3.20: Cobertura sur de Santo Domingo de los Tsáchilas [A]

Figura 3.20 muestra la cobertura hacia el sur, donde se puede tener cobertura hasta las afueras de la ciudad de Santo Domingo. A partir de ese punto, entra a funcionar el siguiente bloque desde el cerro Cochabamba, cuyo objetivo es cubrir la ciudad de Guayaquil hasta el sector de sombra en Santo Domingo.

3.1.2 Estudio de Propagación desde el Cerro Cochabamba

Dado que se requiere cubrir la carretera Quito-Guayaquil en el futuro, se realiza la simulación del sistema desde el cerro Cochabamba para saber con antelación los límites de cobertura que puede tener el sistema.

El cerro Cochabamba tiene las siguientes coordenadas:

Latitud: $1^{\circ} 41' 52.76''\text{S}$

Longitud: $79^{\circ} 06' 32.95''\text{W}$

Elevación: 2929m

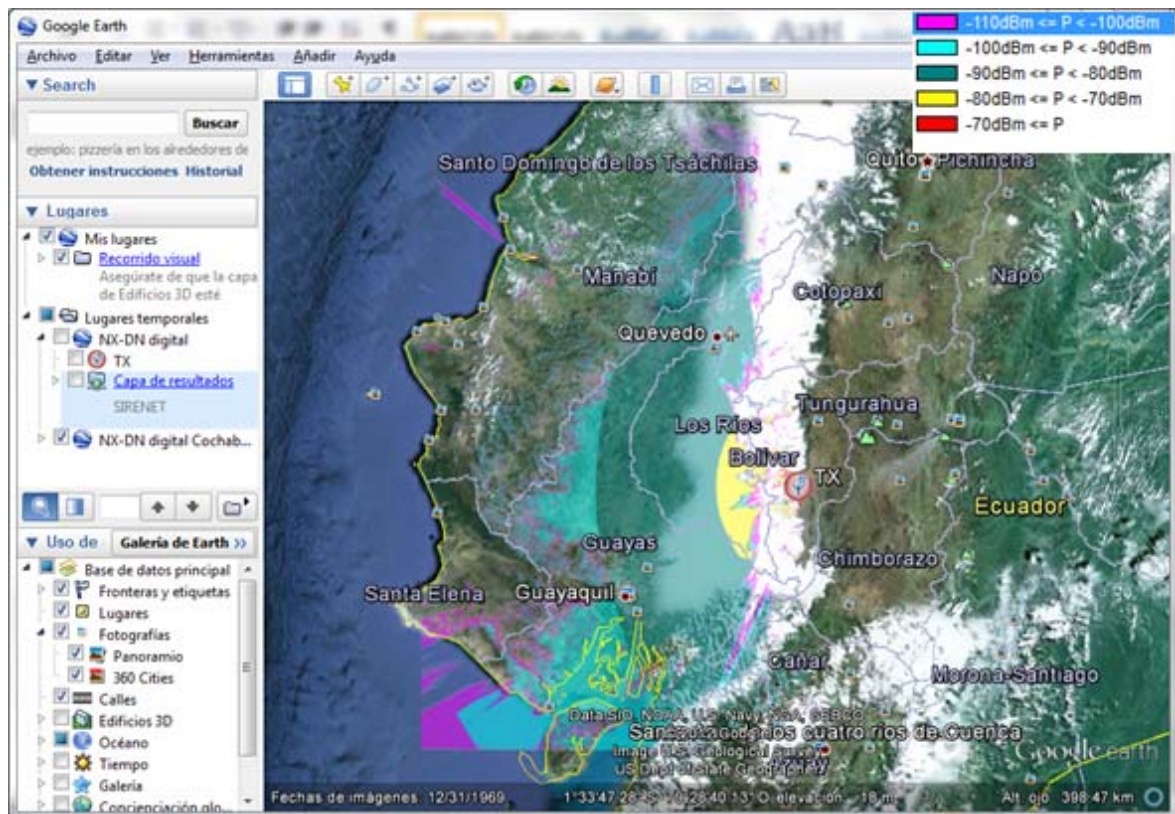


Figura 3.21: Simulación de cobertura desde cerro Cochabamba [A]

En Figura 3.21 se puede observar que desde el cerro Cochabamba se puede cubrir el tramo que une a Santo Domingo con Guayaquil, usando exactamente el mismo sistema. Se exporta la simulación a formato Google Earth para observar la cobertura con los puntos de interés.

De Figura 3.21, podemos ver que el alcance que tiene el cerro Cochabamba es mucho mayor en la zona costera. Es capaz de cubrir la ruta desde la ciudad de Santo Domingo hasta la Ciudad de Guayaquil. La intensidad de señal es buena en la mayor parte del trayecto, pero hay que considerar que dependerá de los equipos a utilizar para determinar la cobertura efectiva. El objetivo del proyecto es emplear equipos instalados en vehículos que tienen antenas de mayor ganancia. Los equipos portátiles no tienen el mismo desempeño, reduciendo el área de cobertura debido a que tienen menor sensibilidad y potencia de transmisión. Por esta razón, esta simulación permitirá ver la recepción y estimar un acercamiento a la realidad.

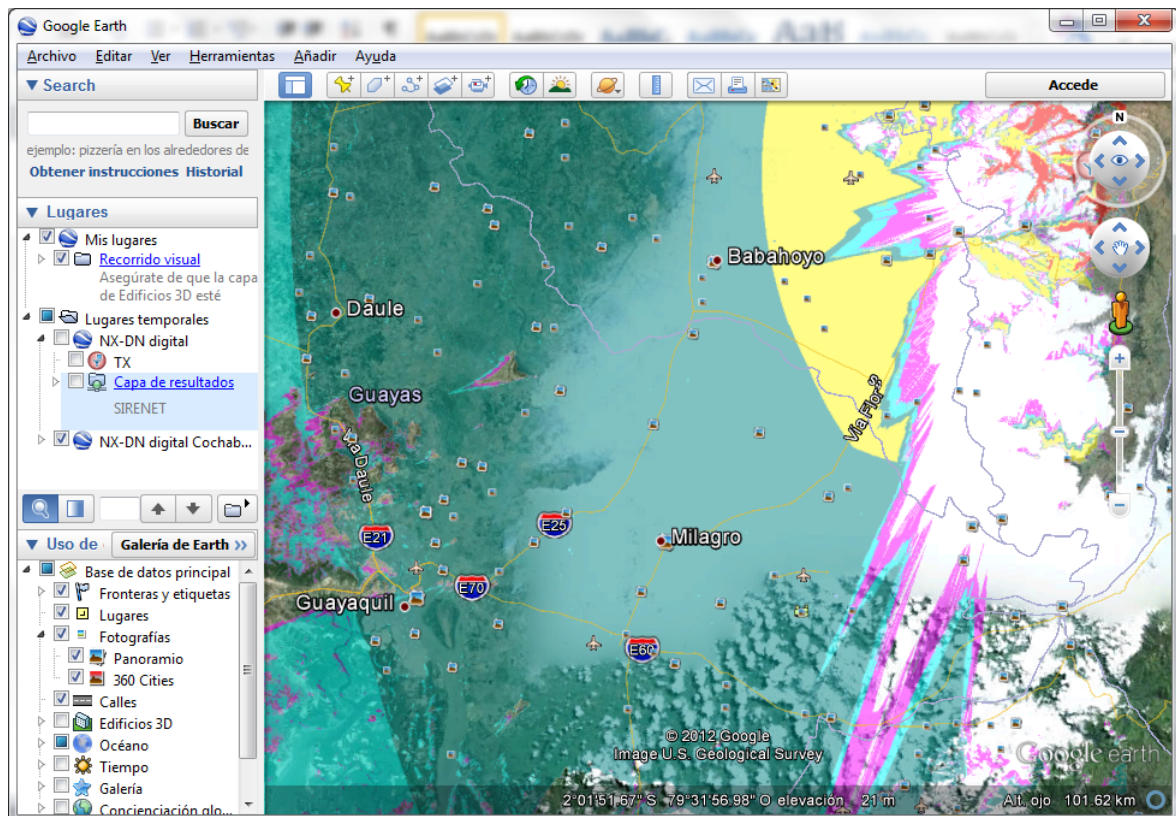


Figura 3.22: Cobertura sur de cerro Cochabamba [A]

Figura 3.22 muestra que hacia el sur están cubiertas las ciudades de Milagro, Babahoyo, Daule y Guayaquil. Hacia el norte esta cubierto Quevedo y parte de Santo Domingo. Se puede observar que la intensidad de señal esta en el orden de -80dBm a -90 dBm . Esto hace que se tenga comunicación muy buena con equipos móviles, y una posible comunicación buena con equipos portátiles que dependerá mucho de la línea de vista. Se debe considerar que en la cartografía se estima que se esta cursando en carretera. En la realidad, existen obstaculos como edificios que puede hacer que de alguna manera se vea afectada la recepción, por lo que las mediciones de campo podrían variar.

La parte norte del area de cobertura, incluye la ciudad de Quevedo, Velasco Ibarra, El Carmen y Santo Domingo de los Tsáchilas, como se muestra en las Figuras 3.23 y 3.24.

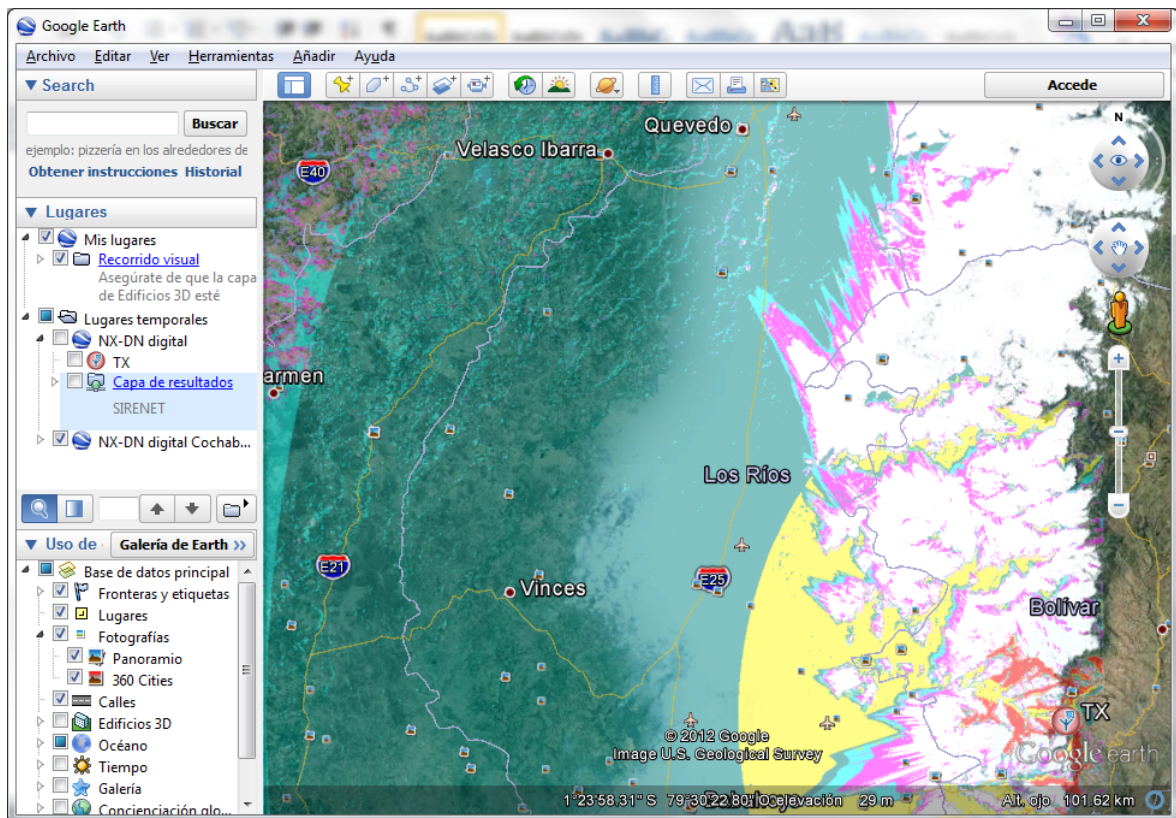


Figura 3.23: Cobertura norte de cerro Cochabamba [A]

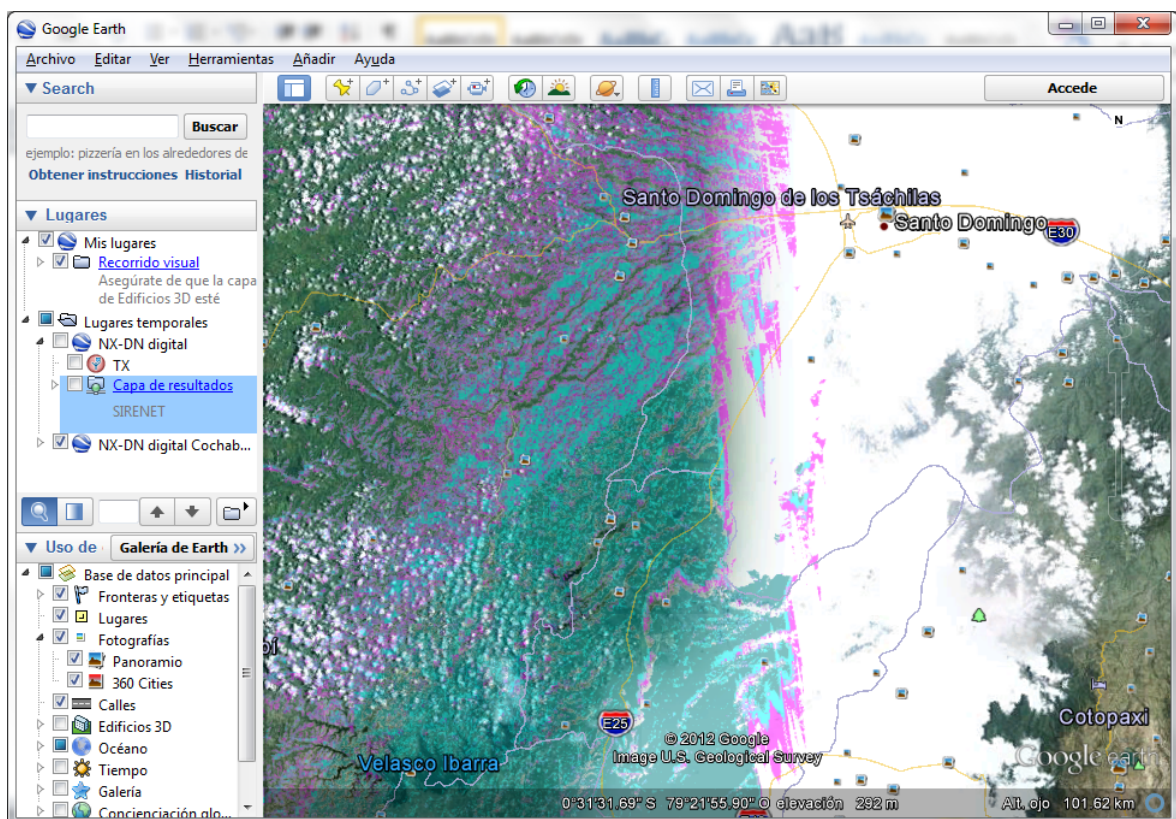


Figura 3.24: Cobertura de Santo Domingo desde cerro Cochabamba [A]

Se puede observar que la cobertura limite desde cerro Cochabamba al norte, se une con la que genera cerro Atacazo, como muestra Figura 3.24. En este sitio, los equipos realizarían roaming para escoger el cerro de mejor señal.

Al sobre poner los dos sitios como en Figura 3.24, vemos que las zonas de sombra al sur de Santo Domingo se cubren con dificultad pero con suficiente señal para brindar servicio a la carretera. Existen zonas de sombra conocidas que deberían poder mejorarse con equipos más robustos y antenas de mayor ganancia, y gracias a la señal digital el audio debería poder estar siempre entendible. En la práctica, los sistemas que están funcionando con sistemas similares al propuesto en la banda UHF tienen las mismas deficiencias, así que una propuesta digital debe tener un comportamiento similar o mejor.

La cobertura global del sistema quedaría como en la Figura 3.25.

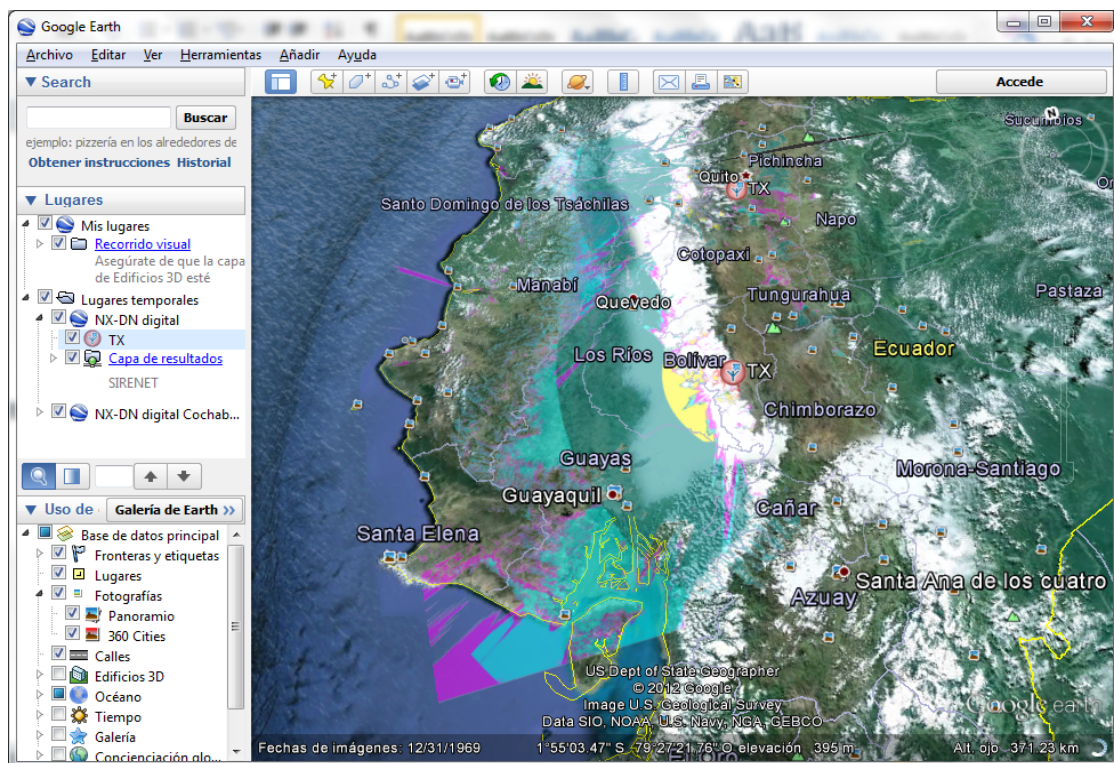


Figura 3.25: Cobertura general desde cerros Cochabamba y Atacazo [A]

El cerro que mayor cobertura genera gracias a su ubicación es el cerro Cochabamba con el cual se cubre la parte sur de la costa ecuatoriana en la carretera principal Guayaquil-Quito. En la ciudad de Guayaquil hay zonas en las

que con línea de vista se puede comunicar con equipos portátiles, pero no se garantiza servicio para esos equipos por ende queda exclusivo para servicio de equipos móviles. En el futuro, se piensa instalar el mismo sistema en el Cerro Azul para brindar servicio a Guayaquil, y en Cerro Pichincha para Quito. En la Figura 3.26 se muestra una vista panorámica de la cobertura.

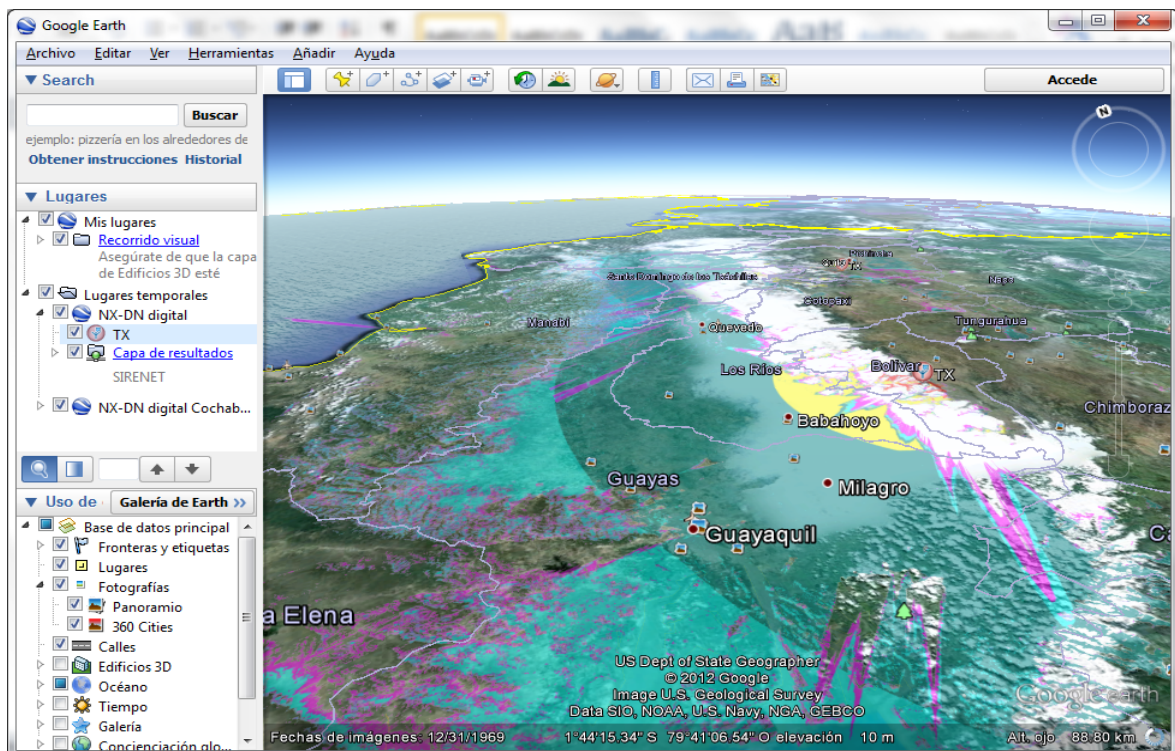


Figura 3.26: Vista panorámica de cobertura general [A]

3.2 ANÁLISIS DE INFRAESTRUCTURA DE RADIOCOMUNICACIONES

Definido el perfil de cobertura, se procede a realizar el análisis de infraestructura de radiocomunicaciones necesario para el funcionamiento desde el Cerro Atacazo.

La infraestructura necesaria se muestra a continuación:

- Shelter de Comunicaciones
- Torre
- Sistema de tierra
- Sistema de Pararrayos

El *shelter* necesario sería de 2 x 2.5 x 2.5 metros, que es suficiente para almacenar 2 racks que albergarían las repetidoras y equipos de amplificación de potencia.

La torre de telecomunicaciones sería de 25 metros de altura, conectada con un sistema de pararrayos y tierra.

Se define utilizar un pararrayos con un sistema de tierra de malla conectada a supresores de transientes para proteger la energía eléctrica.

Para casos de falla en el suministro de energía eléctrica es necesario brindar energía de respaldo, por lo tanto es necesario utilizar un banco de baterías. Debido al número inicial de repetidores y equipos, y la consideración de un sitio de prueba, es suficiente con 4 baterías de 80[Ah] cada una para realizar un respaldo de 4 horas aproximadamente. Conforme se desarrolle el proyecto, se puede reemplazar el sistema de respaldo de energía por uno de mayor capacidad y se tiene planificado instalar un generador eléctrico en un futuro.

3.3 PROGRAMACIÓN DE LOS REPETIDORES TRONCALIZADOS

Utilizando el software de programación KPG-109D, se procede a colocar las frecuencias de trabajo para los repetidores del sistema en la zona Atacazo y Cochabamba, de acuerdo a la distribución descrita por la tabla 3.1. Figura 3.27 muestra la programación de las repetidoras con la asignación de frecuencias para Cochabamba.

Cochabamba		
FCC	Tx	Rx
228	856.6875	811.6875
268	857.6875	812.6875
308	858.6875	813.6875
348	859.6875	814.6875
388	860.6875	815.6875

Atacazo		
FCC	Tx	Rx
238	856.9375	811.9375
278	857.9375	812.9375
318	858.9375	813.9375
358	859.9375	814.9375
398	860.9375	815.9375

Tabla 3.1: Tabla de distribución de frecuencias para sistema digital [A]

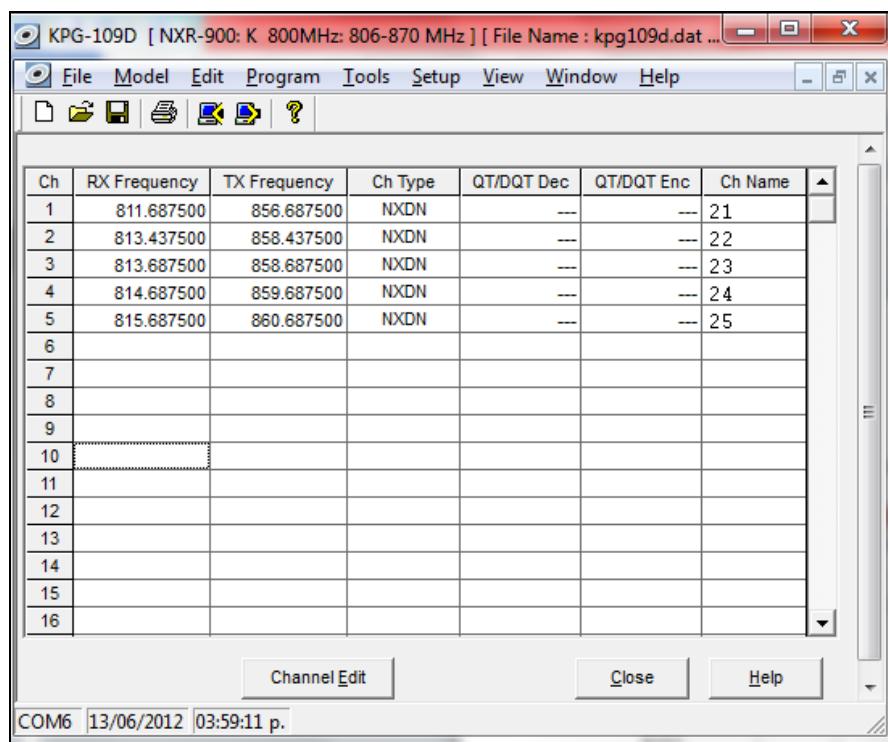


Figura 3.27: Programación de repetidores troncalizados [A]

Se colocan los 5 pares de frecuencias asignados y se utiliza la opción de tipo de canal en modo NXDN Troncalizado. En “*opciones de canal*” se escoge del ancho de banda *Narrow* que es igual a 12.5kHz, como muestra la Figura 3.28.

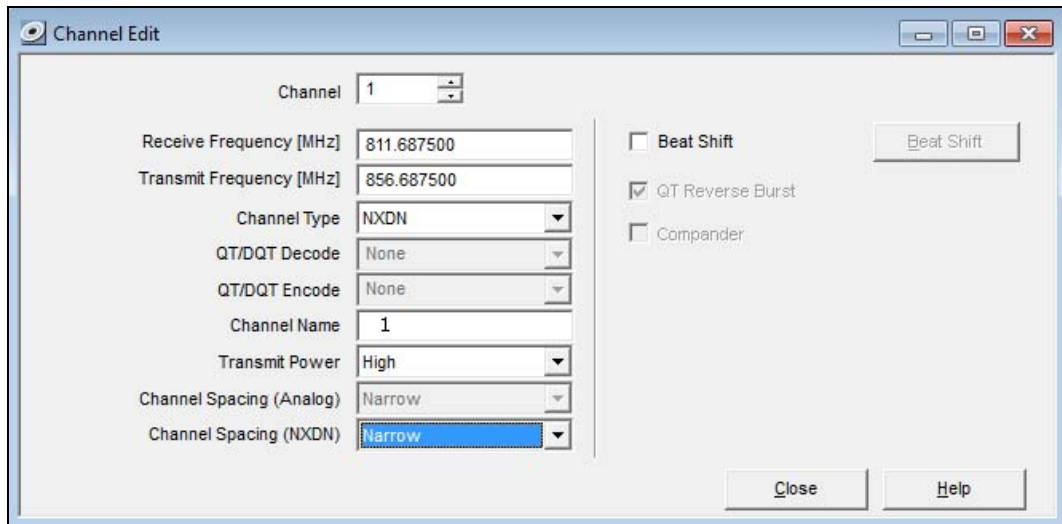


Figura 3.28: Editor de canal [A]

Se hace lo mismo con todos los canales, y se procede a escribir la configuración sobre los repetidores, utilizando el mismo archivo para los repetidores de un mismo sitio, y diferente para sitios alternos.

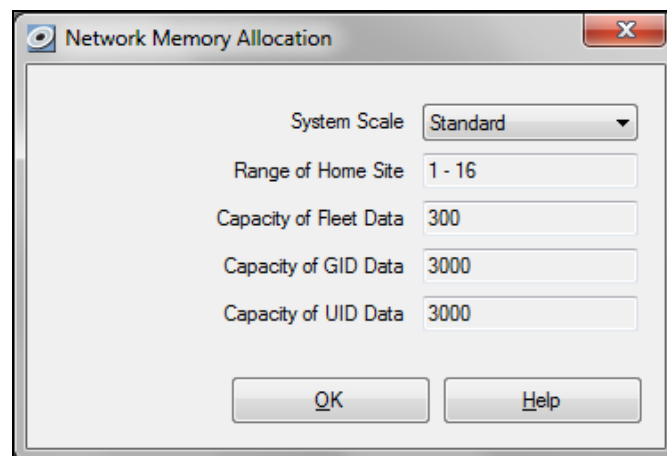


Figura 3.29: Alojamiento de memoria de red [A]

Una vez finalizada la programación de los repetidores, se procede a utilizar el programa KPG-110SM para administrar los sitios. Se escoge el tipo de escalamiento de usuarios a estándar, que permite un rango de 16 sitios interconectables por IP, con una capacidad de asignar 300 flotas, 3000 grupos de

usuarios y 3000 unidades, cuya información se guarda en la memoria de los repetidores, como se puede apreciar en la Figura 3.29. Adicionalmente, a cada repetidora se le asigna una dirección IP fija y puerta de enlace para que pueda comunicarse con los diferentes sitios.

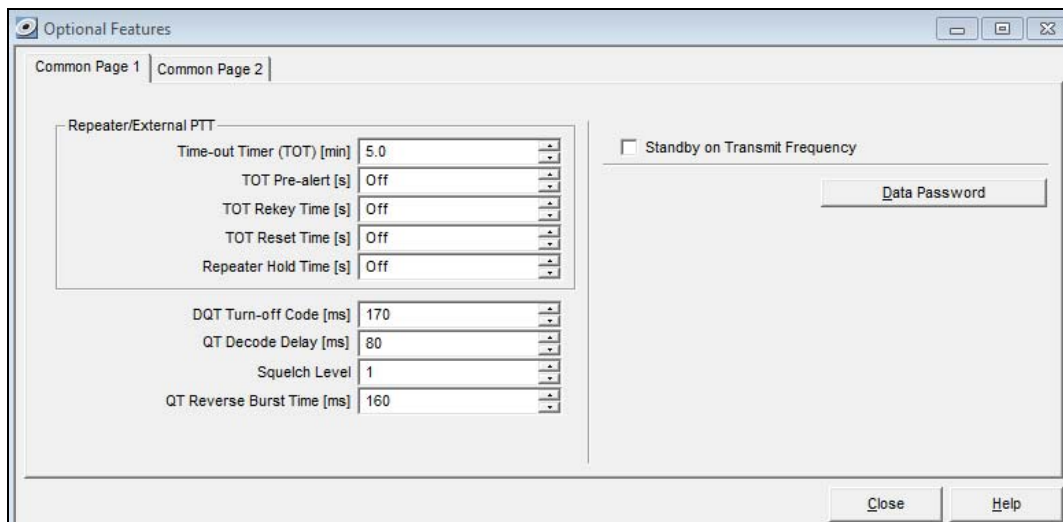


Figura 3.30: Características opcionales [A]

En características opcionales (Figura 3.30), se escoge un tiempo de corte de 5 minutos para que las llamadas duren más que ese tiempo, con el fin de liberar un canal ocupado. En la práctica, los canales se ocupan en el orden de los 18 segundos promedio y esta característica sirve para evitar exceso de ocupación del canal. Los demás parámetros se dejan por defecto.

El cableado de interconexión física que se debe realizar se muestra en la Figura 3.31.

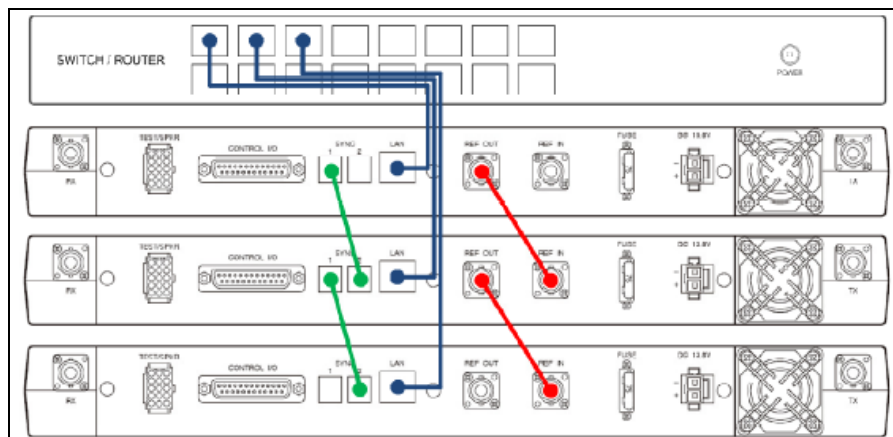


Figura 3.31: Cableado de repetidores [13]

El cableado **azul** corresponde a cable CAT5e para conectar el Switch/Router con los repetidores.

El cableado **verde** corresponde al cable de 4 hilos con conectores RJ-22 para conectar en cascada un repetidor con otro, con el fin de brindar la sincronía y elección del repetidor de control. En el ejemplo de Figura 3.31, el repetidor 1 será el de control, y los 2 siguientes subordinados. En caso de que el repetidor de control falle, el rol lo asumirá el siguiente repetidor, de acuerdo a la colocación de cableado de sincronía.

El cableado **rojo** corresponde a cable coaxial con conectores BNC para la señal OCXO, utilizado únicamente cuando se trabaja en los 6,25kHz.

3.4 DISEÑO DE LA RED VPN PARA LOS 4 SITIOS

Para permitir la comunicación entre los sitios de repetición, es necesario enlazarlos mediante IP. Para esto, se procede entonces a ilustrar la red como se muestra en la Figura 3.32.

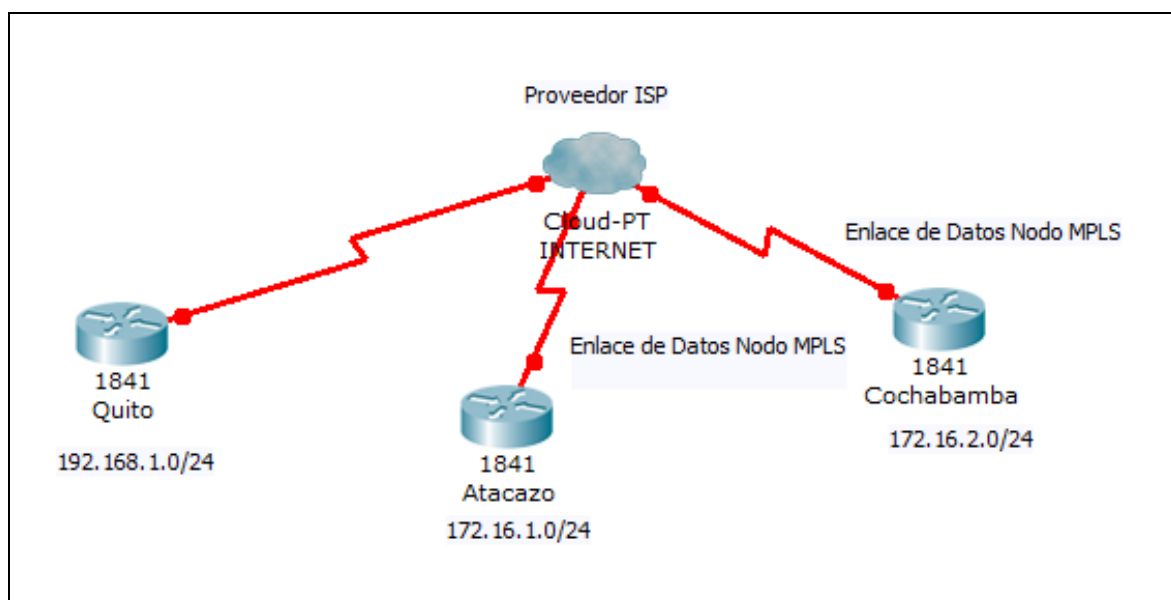


Figura 3.32: Diagrama de red VPN [A]

Para enlazar los tres sitios, es necesario contratar un proveedor de servicios de internet. En el cerro Atacazo, se puede llegar con un enlace en la banda de

5.8GHz desde la ciudad de Quito. Sin embargo, se debe enlazar con el nodo Cochabamba, cuyas características no permiten un enlace directo desde el nodo Atacazo. En el cerro Cochabamba, se puede realizar una conexión directa al *Backbone* de la red MPLS de un proveedor de servicios de Internet, ya que la mayor parte del tráfico que se une mediante enlaces de alta capacidad utiliza dicho cerro para unir la costa con la sierra y luego entrar al nodo de fibra óptica.

Es necesario encontrar el ancho de banda requerido para contratar el servicio, por lo tanto se procede al cálculo como se muestra en la Tabla 3.2.

TOPOLOGIA MULTICAST / Estrella	Formula	kbps
VOIP UP	$BW = 41,5 x$	83
VOIP Down	$BW = 41,5 x$	83
SIP UP	$BW = (17,32 + 29,86 y)x$	34,64
SIP Down	$BW = (34,24 + 18,86 y) x$	68,48
<i>Total Trafico de subida</i>	117,64	kbps
<i>Total Trafico de bajada</i>	151,48	kbps

Tabla 3.2: Cálculo del ancho de banda [A]

El fabricante proporciona las fórmulas de la Tabla 3.2 para calcular el ancho de banda requerido de acuerdo a la topología empleada [13]. Se decide utilizar una topología estrella, en donde el tráfico deberá enrutarse a través del nodo principal Atacazo. El ancho de banda de bajada total requerido es de 151,84kbps para 2 canales de tráfico, donde:

x: Número de canales

y: Número de nodos disponibles -1

En este caso el número de canales es de 2, compuesto por un canal de Voz y un canal de Control. El número de nodos disponibles para la implementación es 1, por ende este valor se omite. La proyección de crecimiento cuando esté disponible el nodo Cochabamba con 5 canales de tráfico en cada sitio es descrito en la Tabla 3.3.

TOPOLOGIA MULTICAST / Estrella	Fórmula	kbps
VOIP UP	$BW = 41.5 x$	207.5
VOIP Down	$BW = 41.5 x$	207.5
SIP UP	$BW = (17,32 + 29,86 y) x$	235.9
SIP Down	$BW = (34,24 + 18,86 y) x$	265.5
Total Trafico de subida	443,4	kbps
Total Trafico de bajada	473	kbps

Tabla 3.3: Proyección de Crecimiento de Ancho de Banda [A]

El cálculo se realiza sin encriptación de paquetes que agregan las cabeceras VPN, por lo tanto a estos valores se debe incrementar el *payload* de acuerdo a la tecnología que se utilice en la práctica.

3.5 TOPOLOGÍA DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES

La topología de la red de radiocomunicaciones se describe en la Figura 3.33.

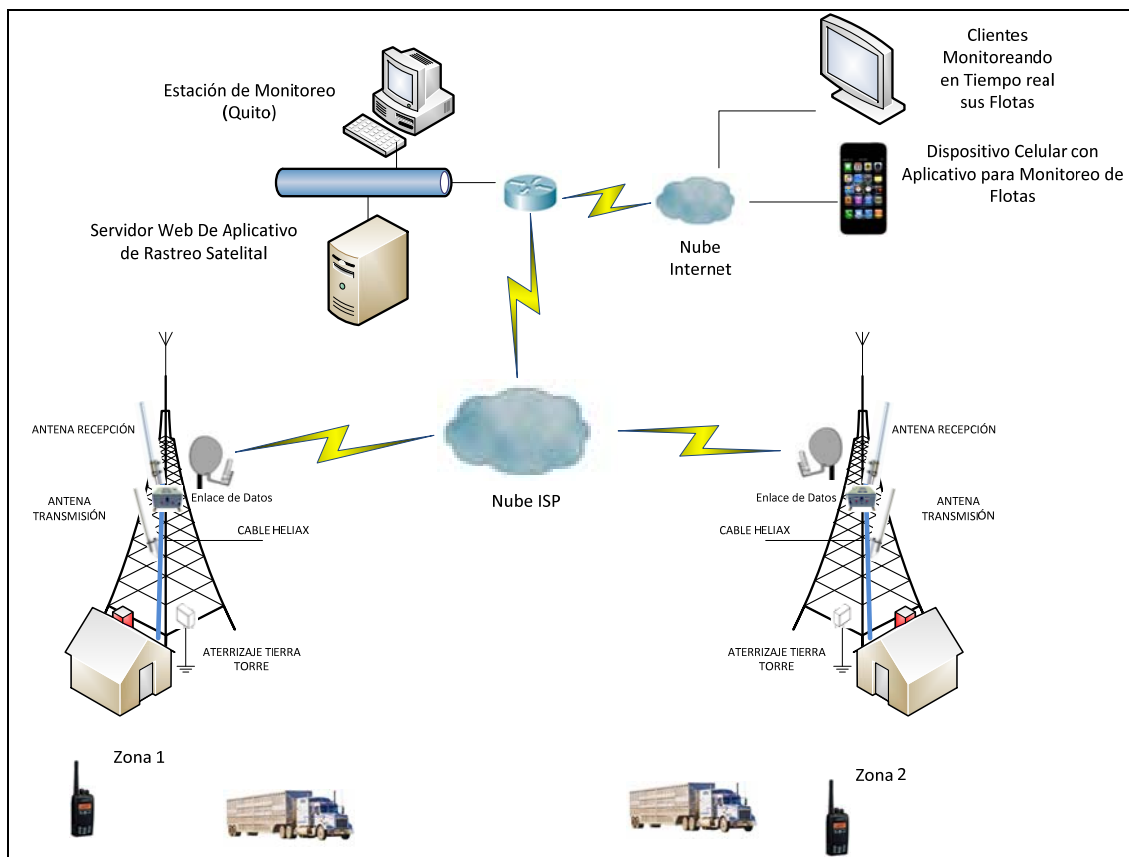


Figura 3.33: Topología de la red de radiocomunicaciones [A]

Los usuarios registran sus radios de acuerdo al sitio de mayor nivel de señal de manera automática. Los repetidores conocen y registran los usuarios que están activos en su zona. Aquellos que salen de una zona a otra realizan un *Hard Handoff* de manera similar que en los sistemas celulares, cambiando a la celda de mayor potencia. Para comunicarse entre sitios, el radio tiene programado el denominado CoS (*Class Of Service*), que determina con qué sitios puede comunicarse, cómo y con ciertos privilegios de usuario. Esto implica que si todos los usuarios están en la Zona 1, no habrá comunicación que salga de dicho sitio. Si un radio sale a la Zona 2, se abrirá un canal entre Zona 1 y Zona 2. Se puede restringir para que los usuarios trabajen limitados a celdas específicas o interceldas. Para que el Repetidor de Zona 1 pueda comunicarse con Zona 2, él envía las tramas de voz de manera *Uni-Cast* para que el sitio de interés escuche los paquetes y los retransmitan al canal designado en su zona. Si se requiere más Zonas, entonces lo realiza de manera *Multi-Cast*, para que todos los repetidores reciban los paquetes y retransmitan por la interfaz de aire.

Figura 3.33 muestra que los usuarios que desean monitorear sus flotas accederían vía internet en tiempo real mediante un aplicativo alojado en un servidor web. Este aplicativo permite que se pueda enviar mensajes, controlar la ubicación de las flotas, ver la velocidad que se encuentra cursando y sacar reportes del historial del recorrido. El aplicativo se encargará de realizar la gestión y control de los sitios repetidores, por ende se conecta mediante un enlace de datos a los sitios para intercambio de información.

En caso de que se perdiera el enlace de datos con los sitios, estos son capaces de trabajar por si solos con comunicación solo entre las personas que se encuentren localmente, perdiéndose la comunicación con los sitios aledaños.

Figura 3.36 muestra el cálculo de pérdidas y ganancias en el sistema de manera general. Se utilizaron como datos los valores del datasheet correspondiente a cada uno de los elementos utilizados y se presentan en el anexo.

A la salida del repetidor se tiene una potencia de transmisión de 250mW. Esto va conectado al amplificador de potencia que tiene una ganancia de 25dB. La pérdida de los cables que conectan la repetidora con el amplificador es de 0.16dB por metro, y el resultado es una señal de 49dBm a la salida del amplificador. Desde el Amplificador, se conecta al combinador cuya pérdida es de 4dB, para luego conectarse al cable de transmisión heliax cuya pérdida es de 0.29dB calculada a 15 metros. La antena de transmisión es de ganancia 10dBd, resultando en una señal de **54.71dBm** o **295.80 [W]**.

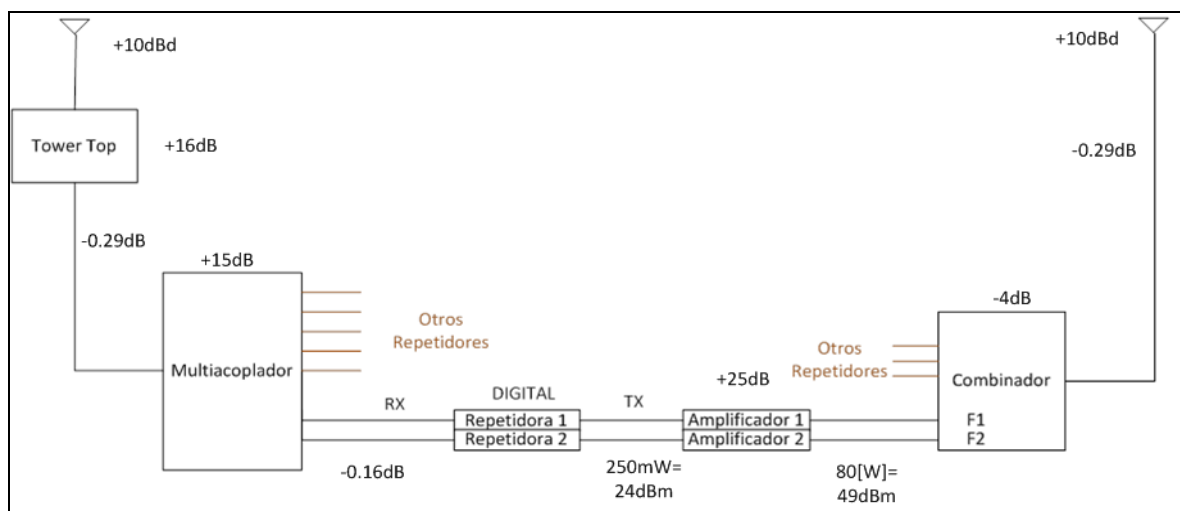


Figura 3.34: Cálculo de pérdidas y ganancias en el sistema troncalizado [A]

En la recepción, se tiene un sistema robusto de amplificación que permite que la señal recibida sea amplificada previamente para evitar la pérdida del cableado y que llegue al repetidor sin mayor pérdida. Tomando como ejemplo una señal de -120dBm en la antena, se tiene como resultado una señal de -79.45dBm en el repetidor luego de pasar por el sistema. La señal sigue siendo la misma que a la entrada, pero se facilita al repetidor una señal con buena potencia para que haga la detección de errores correspondientes y construya el patrón de audio codificado original. Incluso, permite que la sensibilidad del sistema incremente, dado que es capaz de escuchar una señal muy débil. Con esto, se puede entonces aprovechar aumentando la potencia de transmisión y así ganar cobertura de manera general, contrario a lo que sucede con los sistemas convencionales en donde se mantiene una potencia de transmisión a penas 3 veces mayor que con la que puede transmitir un radio convencional.

CAPÍTULO IV

4 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL

4.1 SHELTER DE TELECOMUNICACIONES

Se construye el *shelter* de telecomunicaciones con dimensiones de 2 x 2,5 x 2,5 metros en la que se alojarán los equipos del sistema.

Debido a la dificultad de acceso al terreno, se construye la caseta antes de subirla al cerro, y únicamente se trasladan las paredes y piezas para armarla rápidamente una vez trasladado al sitio.

Una vez terminada la obra civil, se procede a la construcción de la torre y conexiones eléctricas. Para esto se contrata a una empresa dedicada a la instalación de este tipo de obras. La caseta armada se puede apreciar en la Figura 4.1.



Figura 4.1: Shelter de Telecomunicaciones [A]

La instalación de supresores de transientes se realiza en la caseta para proteger a los equipos de descargas eléctricas, como se puede observar en la Figura 4.2.

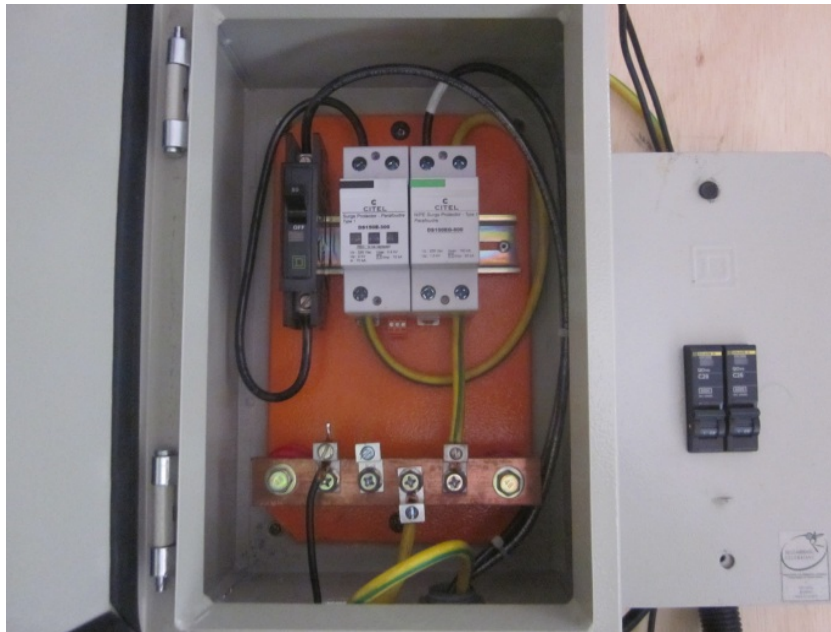


Figura 4.2: Protección de pararrayos y control de energía [A]

Se instala un pararrayos tipo Franklin de punta múltiple con su respectiva puesta a tierra. Se procede a colocar un sistema de control de suministro de energía para energizar a la caseta. La malla de tierra es colocada alrededor de la caseta para distribuir la descarga del rayo.

Finalizada la obra, se prueba que la energía sea óptima en los puntos requeridos y se procede con el resto de implementación.

4.2 INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES

Se calibra los repetidores, multi-acoplador, amplificador y combinador con las frecuencias de trabajo en el laboratorio y se realiza el traslado de los mismos hacia el cerro.



Figura 4.3: Combinador Sinclair instalado en rack [A]

El combinador es el primer elemento colocado en el rack. La función del combinador es de recibir las diferentes señales de los repetidores y mezclarlas para poder transmitir sobre una sola antena. Esto permite ahorrar significativamente costos de infraestructura. La pérdida de los combinadores es de 3dB a 4dB aproximadamente en la mayoría de sistemas. El datasheet del equipo indica una pérdida de 4dB.

El cargador de baterías tiene la función de cargar permanentemente 4 baterías de 80 cada una que alimentan al sistema en general. En caso de falta de energía, las baterías tienen un tiempo de 4 horas aproximadamente de respaldo. Se dimensiona de esta manera debido a que un generador eléctrico es costoso y difícil de trasladar a un sitio como Atacazo, razón por la cual es más fácil escalar la solución con baterías a coste del tiempo útil de respaldo. En función del crecimiento del sistema, se plantea buscar alternativas para la generación de energía como paneles solares y un generador eléctrico en un futuro.



Figura 4.4: Banco de Baterías [A]

Los repetidores se colocan adyacentes en el rack, y se realiza la conexión de cable de sincronía entre ambos, adicionado la conexión de transmisión hacia los amplificadores de potencia y la conexión de recepción hacia el panel de distribución, como muestra la Figura 4.5.

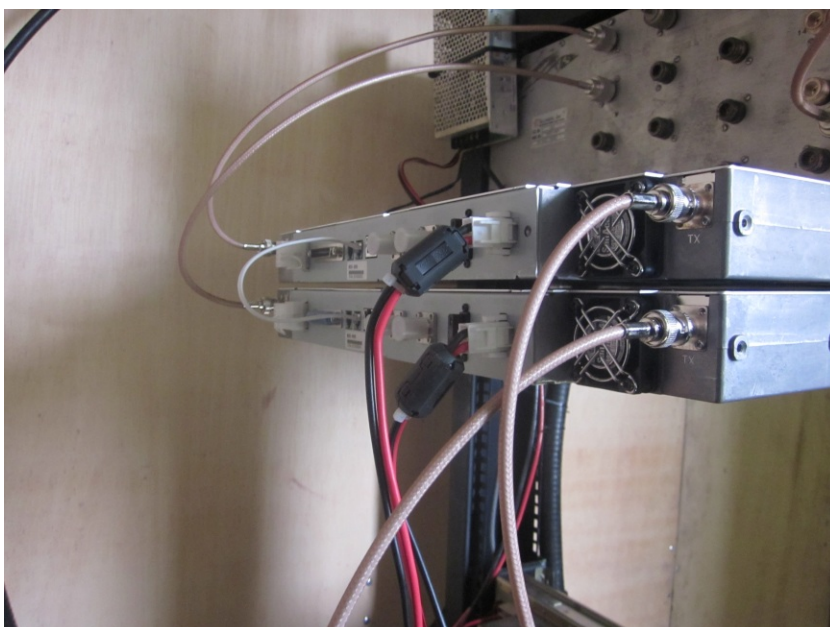


Figura 4.5: Cableado de Repetidoras [A]

Para minimizar las pérdidas en los cables y maximizar la ganancia del sistema, se procede a calcular la longitud de onda de las frecuencias con el fin de cortar de manera precisa la longitud de los cables. Si se cortan de manera correcta los cables a la misma longitud de onda, se evitan ondas reflejadas sobre las guías de onda y se hace un correcto acople de impedancias. Para calcular la longitud, se debe utilizar la siguiente formula (1).

$$\text{Longitud de cable} = \frac{\lambda \times c \times k}{f} \quad (1)$$

Dónde:

- λ = Medida de longitud de onda que deseamos utilizar. En el caso ideal, se debe utilizar la misma medida de la longitud de onda original $\lambda=1$ para máximo acople de impedancias. Si deseamos hacerlo a cuarto de onda, debemos reemplazar por $\lambda/4$
- c: Velocidad de la Luz
- k: Constante de factor de velocidad del cable. Esta es obtenida a partir de la constante dieléctrica del material empleado. En este caso, se utiliza cable RG8, que tiene un factor de velocidad igual a 0.84.
- f = frecuencia de trabajo en Hz.

$$\text{Longitud de cable} = \frac{\lambda \times c \times k}{f} \quad (1)$$

Reemplazando la constante de velocidad de la luz c, la constante de factor de velocidad K, y la frecuencia de trabajo, obtenemos la longitud de cable.

$$Lc = \frac{1 \times 3 \times \frac{10^8 m}{s} \times 0.84}{856.6875 MHz}$$

$$Lc = \frac{3 \times \frac{10^8 m}{s} \times 0.84}{856.6875 \times 10^6 \frac{1}{s}}$$

$$Lc = 0.294m$$

$$Lc = 29.4cm$$

Con esto, si vemos que desde el punto A al punto B hay una longitud X, entonces debemos utilizar cables de Lc unidades para distancias X.

Ejemplo:

Distancia entre *repetidor* y *combinador*: 1 metro.

Longitud de Cable = 0.294m × 4 = **1.176m**

Se procede a realizar el cálculo de los múltiplos de longitud de onda correspondientes para cuarto de onda y media onda en la tabla 4.1.

Cálculo de Longitud de Cables	
f1 (Rx)	856.6875
f2 (Tx)	811.6875
Longitud de Onda	1
c	300000000
k_9913	0.84
Longitud de Onda	Long cable 9913 Belden (cm)
1.5	44.1
	44.2
1.25	36.8
	36.8
1	29.4
	29.4
0.75	22.1
	22.1
0.5	14.7
	14.7
0.25	7.4
	7.4

Tabla 4.1: Cálculo de longitud de cable para múltiplos de longitud de onda [A]

Se cortan todos los cables con múltiplos de longitud de cable de acuerdo a la tabla 4.1, reemplazando únicamente las frecuencias de trabajo correspondientes al canal utilizado dentro de la formula.

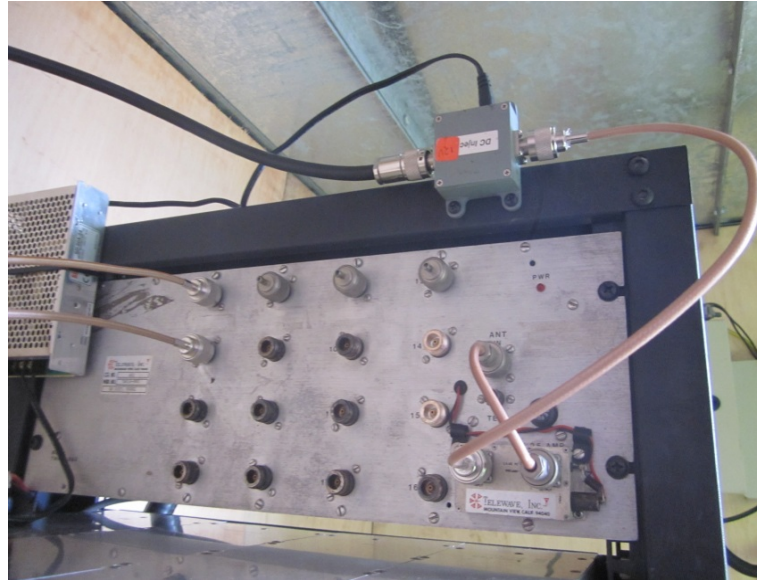


Figura 4.6: Multi-acoplador [A]

Figura 4.6 muestra la conexión del multi-acoplador, que recibe la señal desde la antena de recepción y la distribuye hacia los repetidores. Se puede ver en la parte superior que se encuentra un inyector de DC, cuya función es suministrar energía de 12VDC por coaxial al *Tower Top*.



Figura 4.7: Amplificadores de potencia [A]

Los amplificadores de potencia que muestra Figura 4.7 se colocan sobre el rack y se conectan a los repetidores. Por cada canal de transmisión se requiere un amplificador. La ganancia que tienen los amplificadores es de 250mW de entrada y 90W de salida como máximo. Se calibra la potencia de transmisión de salida del amplificador a 75W.



Figura 4.8: Repetidores digitales [A]

Se colocan los repetidores debajo del multi-acoplador para minimizar la pérdida de los cables de recepción. Se enciende el sistema y se verifica que los canales están al aire y que los repetidores están troncalizando.

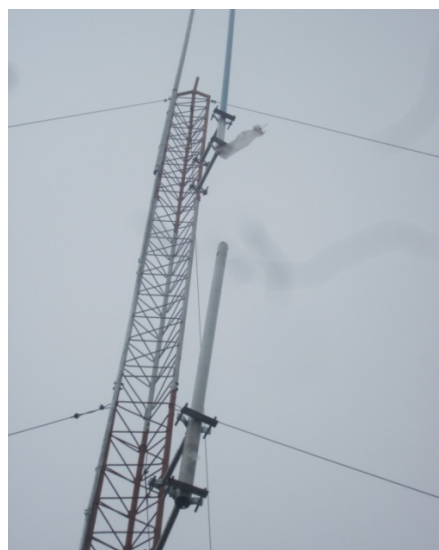


Figura 4.9: Antenas de recepción y transmisión [A]

Las antenas se colocan sobre la torre como muestra Figura 4.9. La antena de recepción se ubica sobre la de transmisión para ganar altura y mejorar la calidad de la señal. Se instala y conecta el *Tower Top* como en la Figura 4.10 y se realizan las conexiones entre la antena y el *Tower Top* con el multi-acoplador.



Figura 4.10: Tower Top [A]

Se conecta la antena de transmisión con el combinador y se procede a verificar que la portadora del canal de control se encuentra al aire como muestra la Figura 4.11.

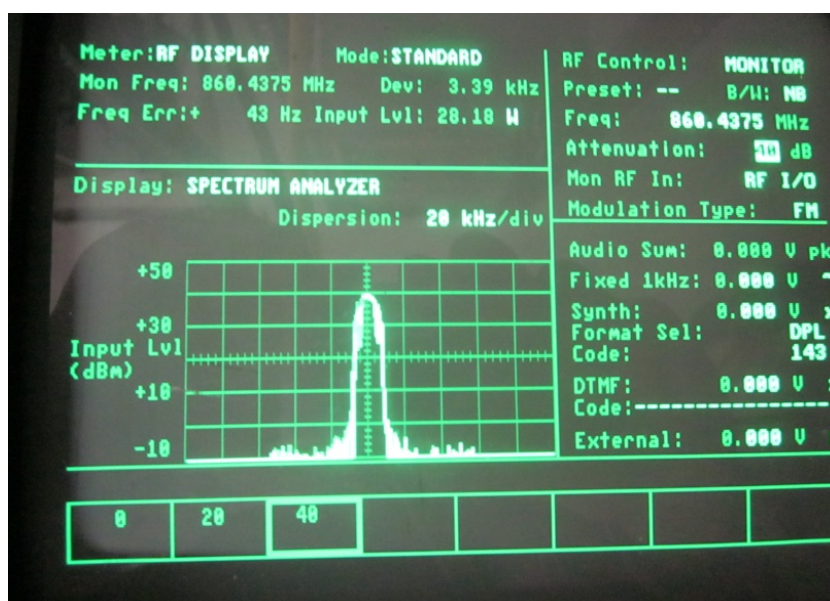


Figura 4.11: Portadora de canal de control [A]

4.3 PRUEBAS DE CONECTIVIDAD DE LA RED VPN, PARÁMETROS DE EFICIENCIA

Se realiza la medición de la calidad de la voz en la red VPN para predecir el comportamiento dentro de la WAN y obtener los parámetros de eficiencia. Se utiliza el método M.O.S. (*Mean Opinion Score*) para la calidad de la voz en la interfaz de aire, y el método del *Modelo E* para medir la calidad de la voz en la red de datos. El códec AMBE+2 es comparable con el códec G.723 a nivel de tasas de transmisión por ende se toma como referencia y aproximación el desempeño con dicho códec. La escala M.O.S. se describe en la Tabla 4.2.

MOS	Calidad	Esfuerzo
5	Excelente	No hace falta esfuerzo alguno
4	Buena	Es necesario prestar atención pero no es necesario un esfuerzo apreciable
3	Aceptable	Esfuerzo moderado
2	Pobre	Gran Esfuerzo
1	Mala	No es posible entenderse

Tabla 4.2: Escala M.O.S. [9]

El M.O.S. se calcula usando el *modelo E* a partir del factor R descrito continuación:

$$R=R_0-I_s-I_d-I_e+A \quad (1)$$

Donde:

R_0 : representa la relación señal a ruido

I_s : representa la degradación que sufre la señal en su conversión a paquetes

I_d : representa la degradación introducida por los equipos de red y depende del códec y de las pérdidas de paquetes

A: representa el margen de seguridad

La recomendación de la UIT nos provee de una fórmula más simplificada para calcular el parámetro R, y se trata de una aproximación menos precisa que la expresión anterior puesto que supone algunos valores por omisión.

$$R=94.2-I_d-I_e \quad (2)$$

De acuerdo a la recomendación de la ITU, el parámetro I_d se normaliza con la siguiente fórmula:

$$I_d=0.024 \times d+0.11 \times (d-177.3) \times H(d-177.3) \quad (3)$$

Donde d es el retardo de red en si expresado en milisegundos y $H()$ es la función de Heavyside $H(x)=0$ para $x < 1$ y 1 para $x \geq 0$.

Finalmente para calcular I_e debemos basarnos en una tabla aproximada de cálculo del MOS que depende del códec utilizado y del porcentaje de perdida de paquetes.

Cálculo de MOS para llamadas telefónicas IP			
Calcular I_e de acuerdo a la tabla:			
Pérdida de Paquetes %	G.711	G.723.1	G.729A
0	0	11	15
1	3	15	18
2	5	18	20
4	7	20	25
8	9	22	28
16	20	24	30

Tabla 4.3: Cálculo del MOS para llamadas telefónicas [A]

Se puede observar que mientras más compresión se involucra en el uso de un códec, mayor es la contribución al parámetro I_e por ende menor la calidad de voz. Para traducir R a la escala MOS se utiliza la siguiente fórmula:

- Para $R < 0$: MOS = 1
- Para $0 < R < 100$: MOS= $1+0,035 \times R+R(R-60)(100-R) \times 7 \times 10^{-6}$
- Para $R > 100$: MOS=4,5

De esta forma se puede medir la calidad de la voz en la red de manera objetiva. Se procede entonces al cálculo basándose en los datos obtenidos de las pruebas en la red.

Resultados de ping:

Paquetes: enviados= 10, recibidos=10, perdidos=0. (0% perdidos)

Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:

Mínimo =9ms, Máximo=137ms, Media=34ms.

Tomando como referencia el códec de mayor compresión G.729A, se utiliza el valor de Le de 15 y se procede a calcular el MOS. En este caso, el retardo pico en el test ping fue de 137ms, por lo tanto se reemplaza estos datos en la fórmula de Ld , arrojando un valor de 3.28. Como resultado se obtiene:

$$R=94,2-Ld-Le \quad (4)$$

$$R=94,2-3.28-15 \quad (5)$$

$$R=75,912 \quad (6)$$

Traduciendo R a la escala MOS arroja un valor de **MOS = 3.86**, que se define como ACEPTABLE. Para eliminar el error introducido por el uso de un códec diferente, con niveles de cuantización y codificación distintos al AMBE +2, se duplica el valor de Le y se realiza un nuevo cálculo, que da como resultado **MOS=3.14** y **R=60.28**. Al duplicarlo, debido a que es una relación logarítmica, se están introduciendo 15dB de error al cálculo, suponiendo un porcentaje de paquetes perdidos de 16%. Aun así, el nivel de aceptación esta entre el 3 y 4, definido como aceptable, por lo que se llega a la conclusión de que el AMBE+2 no se ve afectado en el canal de enlace de datos. Sin embargo, esto es una aproximación suponiendo que la señal del radio es buena, con poca tasa de

B.E.R. (menor al 5%) en la interfaz de aire. Cuando el B.E.R. es más alto, la señal reconstruida por el repetidor ya estará distorsionada debido a la corrección de errores y, al entrar al canal del enlace de datos, la pérdida de paquetes sobre el enlace será diferente y afectaría directamente a la escala MOS. Por esta razón, para mantener calidad de servicio sobre los abonados, es importante que la señal de interfaz de aire sea buena para que no se vea afectada por el enlace.

4.4 PRUEBAS DE CONFIGURACIÓN ROAMING DE LOS MÓVILES

La configuración de Roaming en los móviles es importante ya que se tendrán 4 sitios en el futuro, por lo tanto los radios deben saber discriminar los niveles de RSSI (Indicador de Fuerza de Señal de Radio) antes de la toma de decisión de salto de sitio.

La tabla 4.3 indica los niveles con los cuales el radio indica un nivel de FUERA DE COBERTURA, con el cual el radio empieza la búsqueda de celdas disponibles.

Política de Búsqueda de Sitios	Condición de Roaming (Nivel de RSSI)
Roaming Preferencial	-100 dBm to -105 dBm
Normal	-115 dBm to -120 dBm
Sitio Preferencial	Debajo de lo normal

Tabla 4.3: Políticas de Búsqueda [A]

La función “*Background Hunt*” es la función encargada de permitir a una unidad suscriptora buscar periódicamente canales de control adyacentes para adquirir una señal con mayor fuerza. Mientras que la *Política de Búsqueda de Sitios* determina la función de FUERA DE COBERTURA, el margen de la función *Background Hunt* es la que determina si realizará el salto de celda. Cuando esta función esta activada, el radio buscará periódicamente canales de control adyacentes, y si encuentra una señal con mayor potencia que la especificada en el margen, entonces la unidad hace un *hardhandoff* y se cambia de sitio. Los

niveles son especificados en saltos de 6dB, desde 0 a 42dB. Si se especifica en 0dB, el radio es muy probable de que migre al canal de mayor potencia, si se especifica en 42dB, el radio es muy probable de que se mantenga en el mismo canal de control.

Para probar la configuración de roaming de los móviles, se realizó una prueba simulando un sitio aledaño instalando los repetidores del sitio 2 en las oficinas de la empresa sin equipos de amplificación y antenas de transmisión, es decir, solamente los repetidores transmitiendo a 250mW.

Con esto, se realizó una prueba donde los móviles al estar cerca de las repetidoras se podían comunicar enganchando a las repetidoras cercanas, y luego saliendo a la calle alejándose de la oficina automáticamente los radios enganchaban al sitio Atacazo.

Las pruebas mostraron que los radios si podían conmutar de un sitio a otro. Sin embargo, para tomar una decisión de salto el radio se basa en los niveles de recepción de la señal y la configuración establecida para la decisión. Además, el *handoff* puede demorar cuando se estipula una preferencia de sitios, con el cual el radio va a escoger siempre un sitio incluso si este tiene mala señal. Para esto se requiere analizar los parámetros y funcionamiento de la configuración roaming descritos en la tabla 4.3.

Para que el radio escoja el sitio a conectarse, él utiliza el RSSI (Indicador de fuerza de señal de recepción) mediante las tramas *beacon* que envía cada cierto intervalo de tiempo el canal de control. Se compara la señal con el umbral de recepción definido para escoger un canal como aceptable

Cuando se envían las tramas *beacon*, el radio inicia un proceso de escaneo cada 1ms por defecto para buscar la intensidad de señales, determina cuál es el canal de mejor intensidad, y luego establece el canal con mejor señal como principal. Se mantiene en ese canal por un tiempo de 1230s máximo en ese canal, hasta que vuelve a enviarse una trama *beacon* y se reinicia un proceso de

escanear las intensidades de señales de nuevo. Por esta razón, es importante que los tiempos definidos se ajusten a la realidad del escenario, puesto que el proceso consume batería por procesamiento.

Existe una opción llamada *Nivel de Roaming Rápida*, que se puede programar para que los radios interrumpen el proceso de escaneo de intensidad de señal dado un nivel de señal predefinido como aceptable. Es decir, si debe hacer un *polling* a las repetidoras que conoce, pero la primera de ellas tiene el nivel aceptable, el no hace el resto del *polling* y finaliza el proceso dado que encontró un canal fuerte. Esto ahorra batería y permite que se escoja rápidamente un sitio.

Para realizar el proceso inverso, el Nivel de *Roaming* Mínimo es utilizado. Este determina que cuando la señal de RSSI está por debajo de lo establecido, el radio automáticamente empieza el proceso de *Roaming* para buscar señales de mejor intensidad de señal.

Las pruebas realizadas sobre los móviles para probar la función de Roaming utilizaron los valores que vienen por defecto en los radios. Esto ocasionó que tarde 20 segundos el equipo en discriminar los niveles de señales antes de enganchar a un sitio nuevo.

4.5 PRUEBAS DE CAMPO

Dado que la calidad de la voz en la interfaz de aire es subjetiva y variable de las condiciones y factores aleatorios que puedan presentarse en el medio, se utiliza el método M.O.S. (*Mean Opinion Score*) para medir la calidad de la voz. Adicional, se utiliza la función "*Management Mode*" incorporada en los radios para monitorear la potencia de la señal recibida. Además, se realizan pruebas para verificar el correcto funcionamiento del sistema de rastreo satelital mediante el software FLAV2.0g y 3.0g. Por último, se prueba el funcionamiento del sistema del software de *Gestión del Sistema Troncalizado* KPG-110SM, con el cual se monitorea y prueba el funcionamiento integral de todo el sistema.

4.5.1 Mediciones de Calidad de Señal de Voz

Se observa que la calidad de la señal está en función del nivel de señal de acuerdo a la simulación realizada aproximadamente, y se degrada conforme los obstáculos se presentan. Dado que la función del cerro Atacazo es brindar servicio a los equipos a ser instalados en vehículos de transporte pesado, se consideran suficientes las pruebas debido a que los vehículos se encuentran en tránsito y en línea de vista gran parte del tiempo.

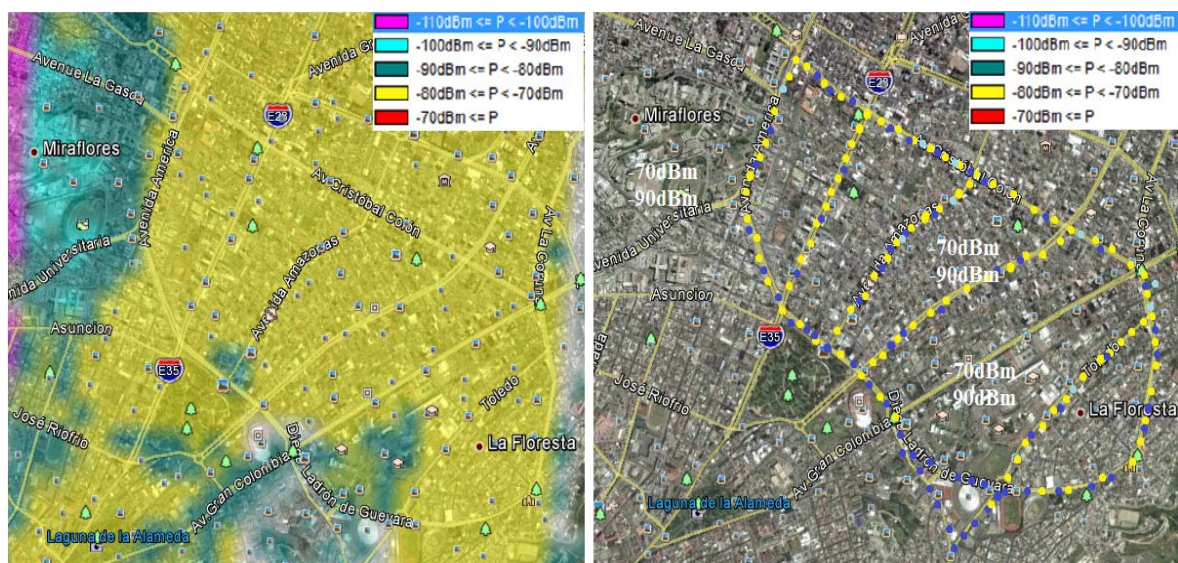


Figura 4.12: Pruebas de campo en Quito [A]

Figura 4.12 muestra las pruebas de campo realizadas sobre un sector de buena recepción de señal. En figura se puede apreciar que las trayectorias recorridas tienen un nivel de señal de -70dBm a -90dBm a lo largo del 95% de los sitios medidos.

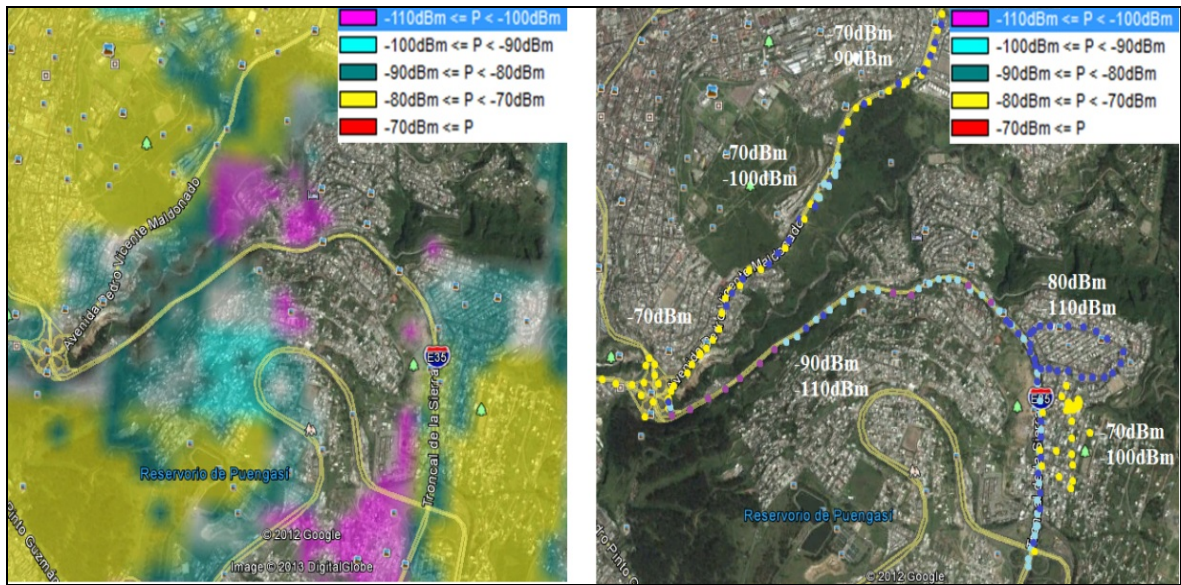


Figura 4.13: Pruebas de campo en sector El Trébol [A]

La Figura 4.13 muestra una trayectoria recorrida desde el *Coliseo Rumiñahui*, pasando por “*El Trébol*”, con dirección al *Valle de Los Chillos*. En ella, se puede ver que existe una similitud en los valores simulados y los medidos de campo eléctrico. Se puede distinguir que la señal amarilla de -70dBm a -80dBm se hace fuerte en el sector Norte. En el sector centro de la imagen, las mediciones revelaron que había una señal de -90dBm a -117dBm (morado) desde *El Trébol* hasta llegar a la parte más alta de la autopista General Rumiñahui. En el sector de Monjas, la señal recupera fuerza y se encuentra en el orden de los -70dBm a 100-dBm, variable dependiendo de la localización respecto del cerro Atacazo. La precisión de la simulación es cercana, pero se evidencia un incremento de cobertura en la parte céntrica en las mediciones de campo frente a las simuladas.

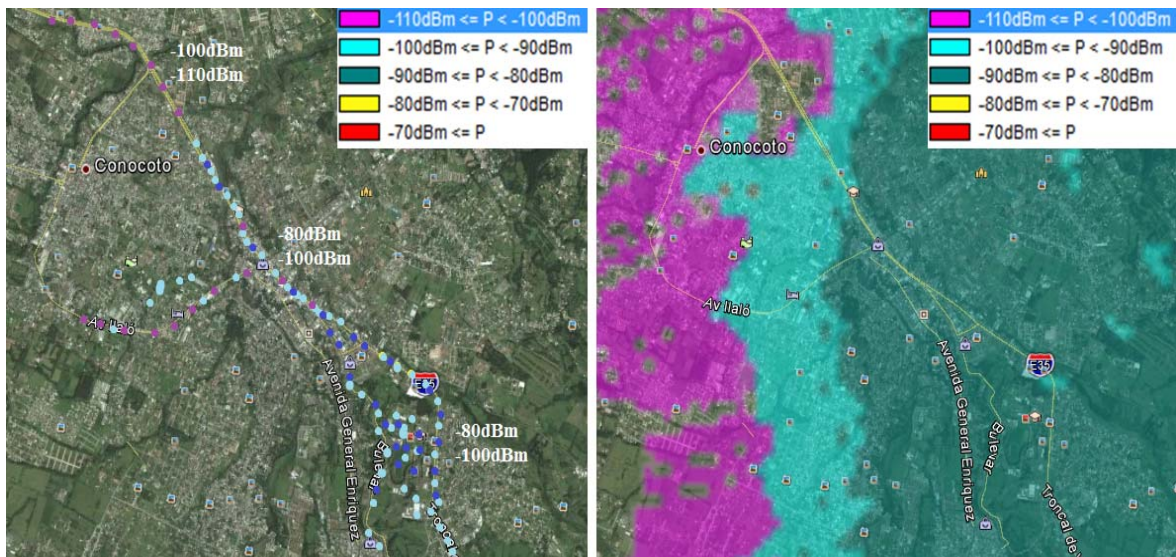


Figura 4.15: Pruebas de campo Valle de los Chillos [A]

En el sector del valle de los Chillos, como muestra la Figura 4.15, se puede evidenciar que la señal medida ha adquirido un patrón similar al simulado. En todas las mediciones se tiene una desviación de 10dBm, mientras se mantiene línea de vista con el Cerro Atacazo. El sector de Conocoto se ve afectado directamente, y se evidencia que pierde cobertura la parte de la vía antigua entre Quito-Conocoto. Son pocos los puntos donde se puede llegar con facilidad. Una inspección física revela que en este sector se pierde línea de vista con el Cerro Atacazo, teniendo una señal aún en el orden de los -110dBm pero con tasa de B.E.R. alto relativo que impide una comunicación efectiva.

Se conoce que el Cerro Pichincha obstruye ligeramente al Norte-Oeste de Quito, y que este es un buen punto para verificar la comunicación y patrón donde es difícil acceso al canal. La simulación de Figura 4.16 revela que no existe cobertura a partir de la zona del Centro Comercial el Bosque. Las pruebas de campo demuestran que el límite es ampliado al sector de San Carlos, en el edificio Agencia Nacional de Tránsito. Ahí la señal tiene un valor promedio de -117dBm. Las pruebas por los sectores aledaños revelan que oscila entre -100dBm a -117dBm, pudiendo todavía mantener una comunicación con escala de M.O.S. 3/5. En la avenida Galo Plaza Lasso, la señal se vuelve fuerte y está en el orden de los -70dBm a -90dBm.

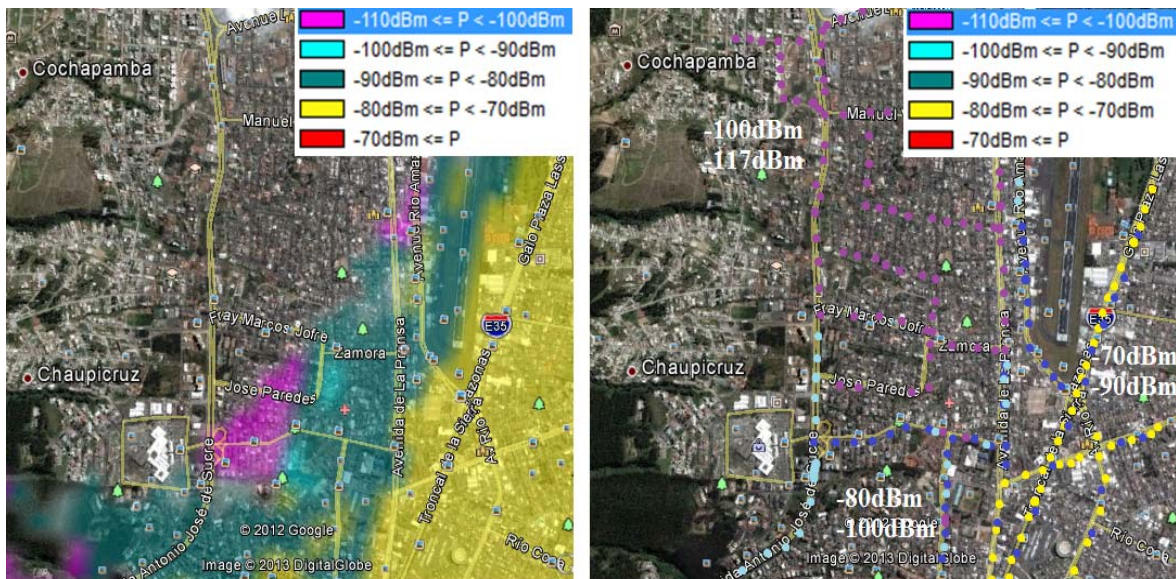


Figura 4.16: Mediciones sector Centro-Norte de Quito [A]

4.5.2 Mediciones de Localización Vehicular, Análisis de Precisión-Exactitud

Para determinar la posición de un objeto, un GPS debe recibir una señal de radio de al menos 3 satélites. Debido a que cada satélite emite una señal única, el receptor puede calcular la distancia del receptor con cada satélite y calcula la posición geográfica.

La precisión es afectada por varios factores, incluyendo posición de satélites, ruido en la señal de radio, condiciones atmosféricas y barreras naturales de la señal. El ruido puede crear un error de 1 a 10 metros. Objetos como edificios y montañas entre el satélite y el receptor pueden producir error de hasta 30 metros. El cálculo más preciso ocurre cuando la posición entre el satélite y el receptor tienen línea de vista clara y no existen objetos que interfieran.

Los datos del GPS_15L utilizado en el radio móvil, tienen los siguientes parámetros de precisión y exactitud:

- Tiempo de readquisición: <2s
- Arranque caliente: Aproximadamente 15 segundos (conociendo toda la información)

- Arranque frío: Aproximadamente 45 segundos (conociendo posición inicial, tiempo, y almanaque, desconociendo efeméride).

Precisión:

- GPS Standard Positioning Service (SPS)
Posición: <15m, 95% típico
Velocidad: 0.1 nodos RMS a paso continuo
- DGPS (USCG/RTCM)
Posición: 3-5m, 95% típico
Velocidad: 0.1 nodos RMS a paso continuo
- DGPS(WAAS)
Posición: <3m, 95% típico
Velocidad: 0.1 nodos RMS a paso continuo
- Tiempo de PPS (pulso por segundo): $\pm 1\mu\text{s}$ en alza del PPS

Con estos datos, se puede realizar una comprobación de la precisión con un recorrido y viendo la localización respecto de un mapa.

Figura 4.17 muestra el rastreo de una unidad en la ciudad de Quito, específicamente en las calles 9 de Octubre y Santamaría. El objetivo se encontraba exactamente en esa ubicación, y la altura desde la cual se aprecia con el software hace que en este caso el rastreo de una ubicación con 95% de precisión. Entendiendo que el error máximo que puede entregar un dato GPS es de 15m de acuerdo al catálogo, la altura desde la cual se puede observar el mapa del software de rastreo permite que no sea percibido ese error por parte del usuario.

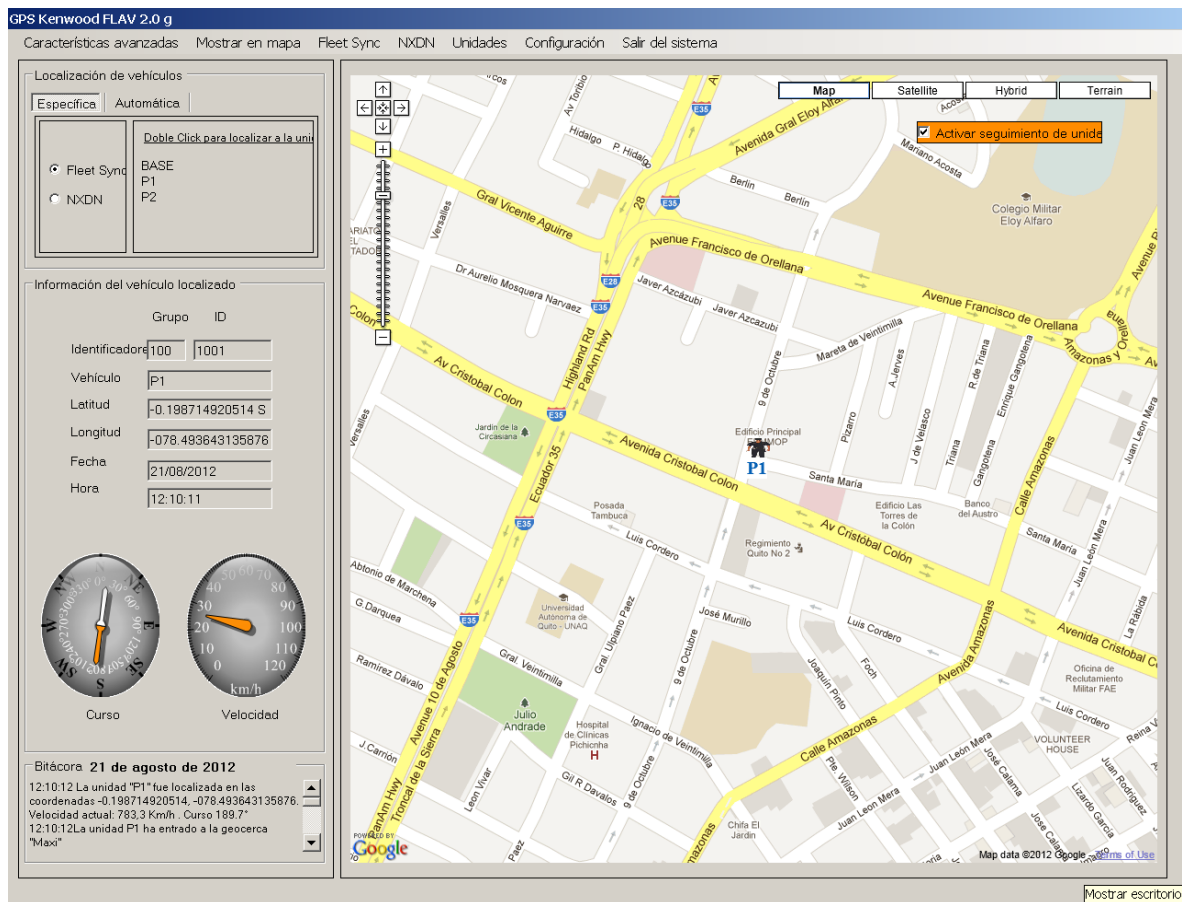


Figura 4.17: Prueba de ubicación del punto con GPS [A]

La Figura 4.18 muestra la trayectoria de un vehículo en el sur de la ciudad de Quito. De todos los datos obtenidos, un tramo correspondiente a la zona marcada con color verde, corresponde a los datos erróneos. Esto se debe a que en ese tramo la señal se perdió por unos segundos, por lo que el radio no pudo realizar su transmisión. En ese caso, el software realizó una interpolación de la curva, haciendo que se sobreponga por sitios que no corresponden, pero acerca la trayectoria a la real. Sin embargo, todos los datos del resto de la trayectoria están correctos, teniendo en cuenta que el error en esa zona pudo estar menor a 3m debido al área despejada sin obstáculos en las que se encontraba el vehículo. Cuando se realizan las mismas pruebas en el sector centro de Quito, el error se encuentra menor a los 15m en zonas cercanas a edificios, pero la interpolación de datos hace que se reduzca este error.

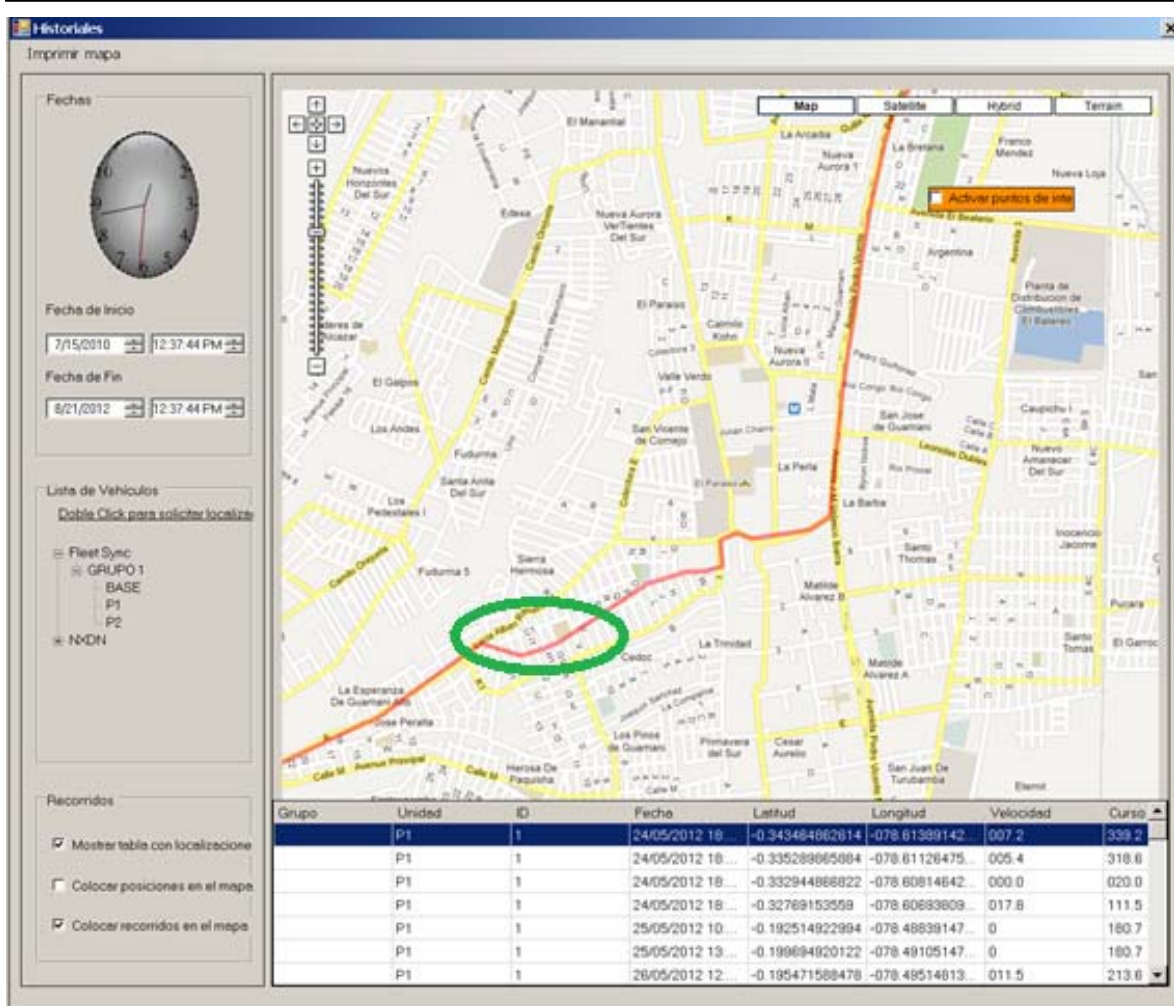


Figura 4.18: Trayectoria recorrida por un móvil [A]

Se introducen límites de velocidad para generar alertas automáticas, como muestra la Figura 4.19.

Además, se agregan las funciones de alertas de entrada y salida de la geocerca, como muestra la Figura 4.20. En este caso, se evidencia la utilidad de limitar una zona de trabajo con alertas cuando un usuario entra o sale de dicha zona.

Una función útil del software FLAV3.0 es el envío de correos electrónicos y mensajes de texto al celular cuando se generan alertas de cualquier índole, como excesos de velocidad y entrada-salida de geocerca.

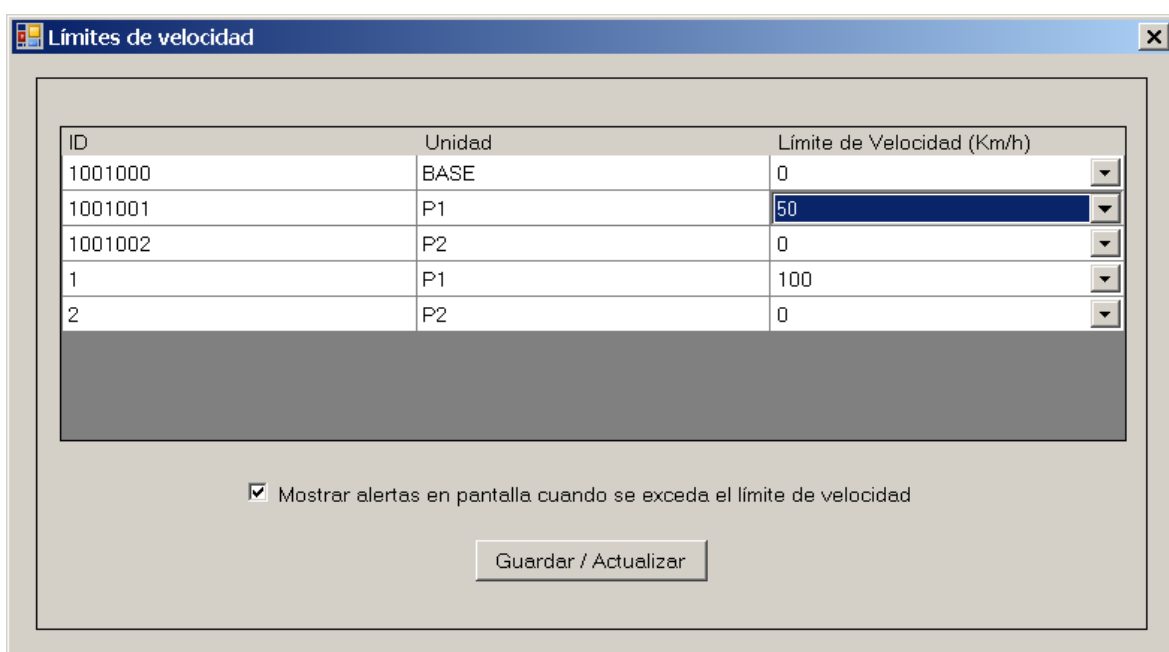


Figura 4.19: Límites de velocidad [A]

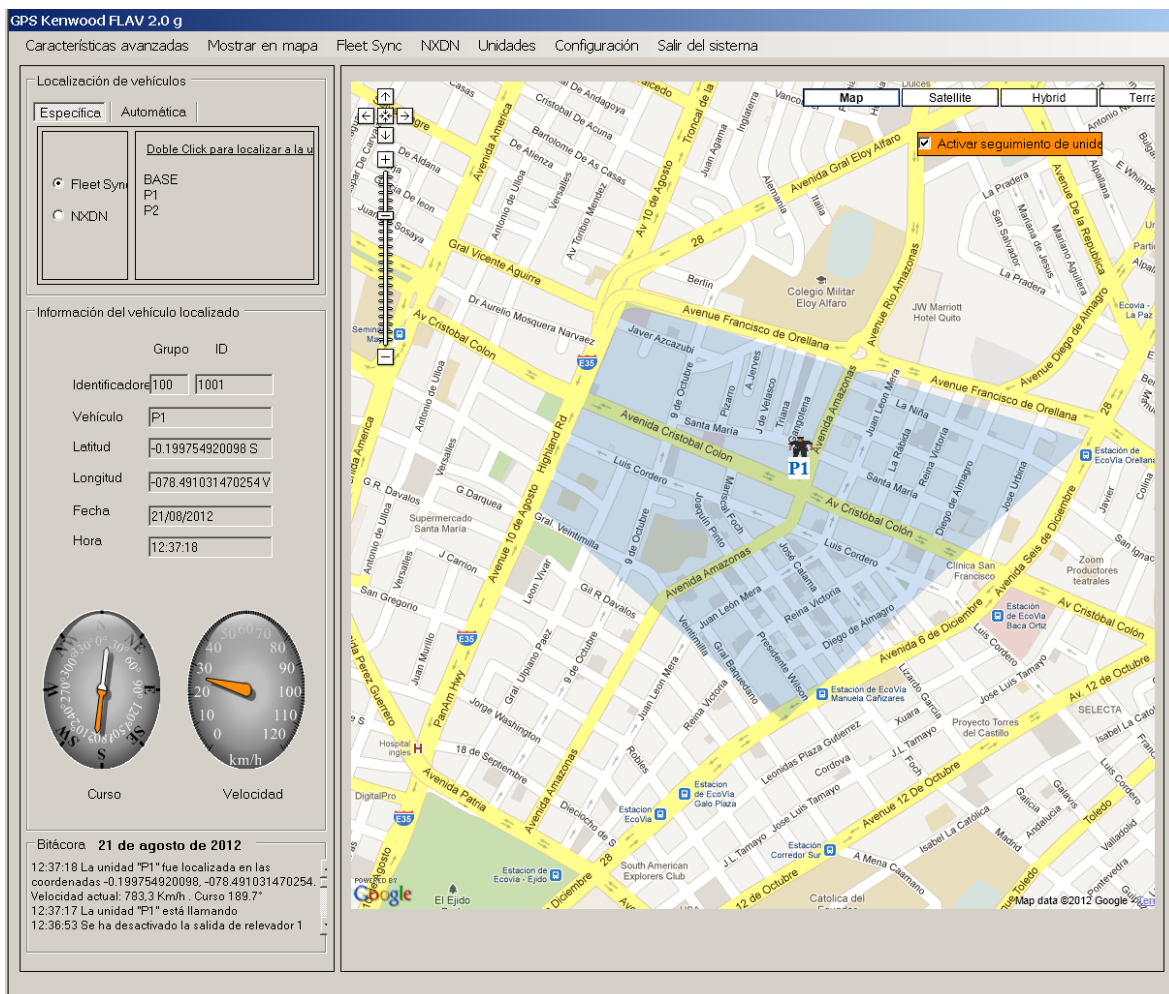


Figura 4.20: Geocercas [A]

4.5.3 Envío de Mensajes de Texto

Se realiza un envío de mensaje de texto utilizando el software FLAV 3.0g para probar las funcionalidades del sistema. Figura 4.21 muestra la pantalla con un mensaje de prueba enviado a un portátil.

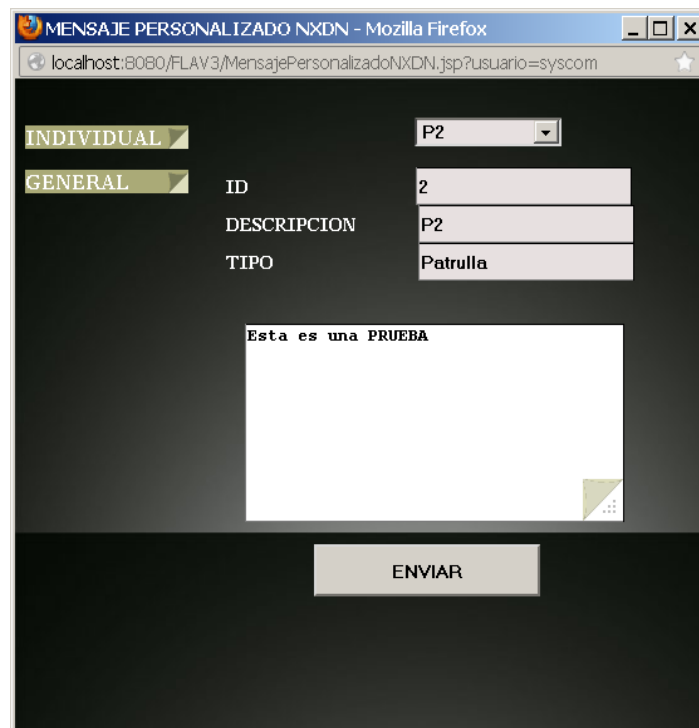


Figura 4.21: Mensajes de Texto en NEXEDGE [A]

El mensaje sale de la computadora, a través del radio y es enviado por aire a la unidad denominada P2. Se recibe el mensaje y se lo muestra en pantalla exitosamente. Se realizan pruebas repetidas para probar los mensajes individuales y generales, todos con éxito y con un tiempo de retardo menor a 1 segundo.

Cuando se ocupa un canal para envío de mensajes de texto, el canal se considera como ocupado. Por esta razón, es importante que se tenga en consideración que el uso de mensajes puede llegar a incrementar la probabilidad de bloqueo de canal conforme se incremente el uso de mensajes, por lo que se debe tratar de mantener un equilibrio.

Los datos de GPS (considerados como mensajes cortos) enviados automáticamente no afectan a la transmisión de voz, por lo tanto se considera segura su utilización, siempre y cuando no sea muy frecuente para saturar un canal. Figura 4.22 muestra cómo se envían las tramas de GPS automáticamente.

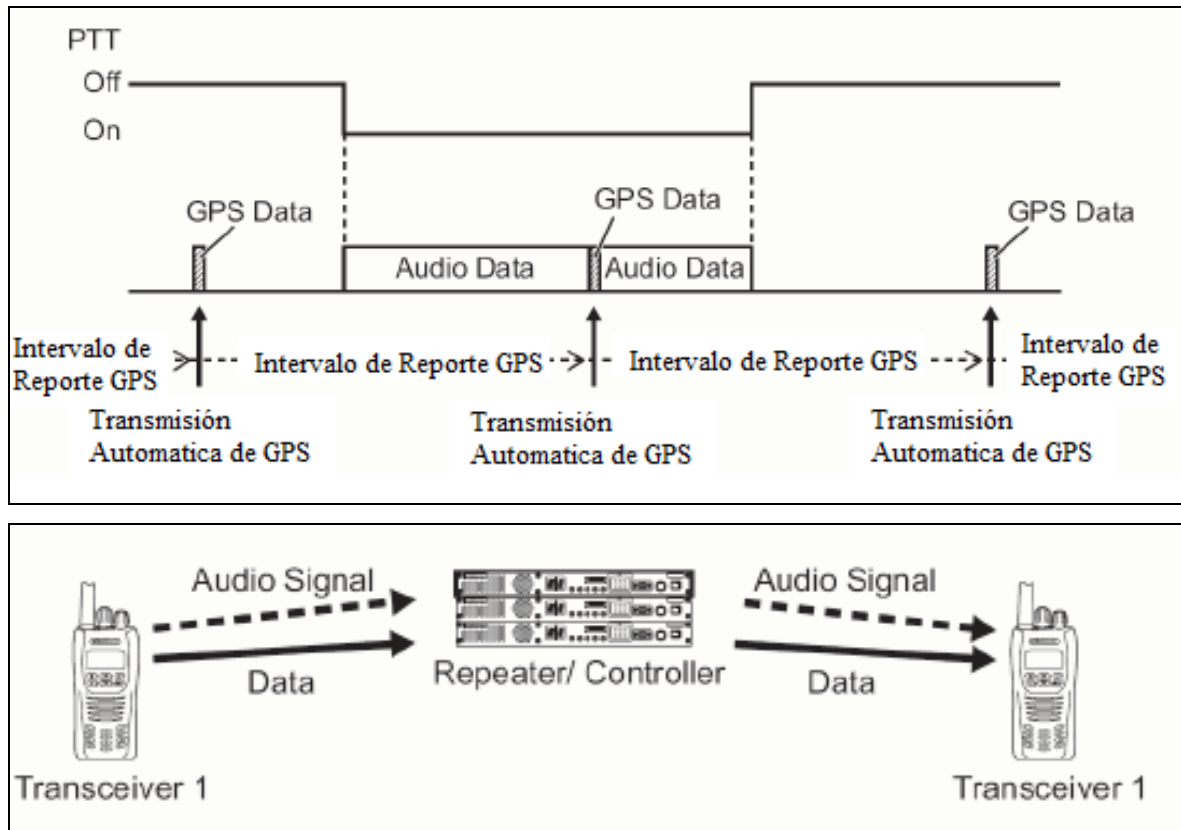


Figura 4.22: Envío de datos GPS en sistema troncalizado [13]

La realidad muestra que un dato GPS es enviado por el mismo canal de audio de subida debido a que es un dato digital. Luego el dato es extraído y enviado por el canal de control a la base. Con esto no se vería interrumpida la conversación para el usuario. Esto implica que en la bajada estarían activos dos canales, el uno con el audio y el otro con el dato GPS. Cuando se escala el número de abonados, se debe realizar un buen dimensionamiento del tiempo para los auto reportes GPS para que no sature el canal de control, y este a su vez muestre un intervalo prudente para que el usuario actualice la posición sus flotas con tiempos prudentes.

La Tabla 4.4 muestra la capacidad que tiene el sistema de reportar unidades dado un intervalo de tiempo, utilizando un solo canal. Se muestra la capacidad utilizando anchos de banda de 6,25kHz y 12,5kHz. Esto implica que los tiempos para reportar unidades es bien bajo y debe configurarse correctamente el intervalo de tiempos para autoreportes, con el fin de no saturar el canal de tráfico. Para esto, se puede plantear dos alternativas:

1. Utilización del canal de control para envío de datos.
2. Utilización de canales exclusivos de tráfico de datos GPS.
3. Utilización del canal disponible para envío de datos GPS.

Tiempo	Unidades Aproximadas	
	6.25kHz	12.5kHz
1 min	45	80
2 min	90	160
3 min	135	250
4 min	180	320
5 min	225	400
6 min	270	480
7 min	315	560
8 min	360	640
9 min	405	720
10 min	450	800

Tabla 4.4: Capacidad de reporte de unidades con datos GPS [13]

El uso del canal de control se verá afectado por los tiempos mostrados por la Tabla 4.4 con la diferencia de que al tratarse de un canal de datos que está siempre al aire, es más capaz de asimilar la información que llega de distintos usuarios de manera más ágil.

El uso de canales exclusivos de datos GPS significa la reducción de capacidad de usuarios del sistema, a cambio de agregar servicio de rastreo satelital a más usuarios. Como se proyecta 5 canales instalados en Atacazo, de los cuales 4 son de tráfico y 1 de control, la reducción de canales implica que la población de radios disminuye considerablemente.

En el uso de canales disponibles, cuando un radio busca acceder a un canal, este envía su petición a través del canal de control, recibe la información de canal disponible y luego cambia de frecuencias al canal asignado para la conversación. Esto implica que va a utilizar el canal de control y adicional va a utilizar un canal adicional por el tiempo aproximado de envío de datos GPS.

Las tres alternativas planteadas suponen un reto de diseño ya que se debe dimensionar de acuerdo a los requerimientos del cliente. No todos los usuarios de radio requieren del servicio de rastreo satelital, pero a su vez, todos requieren de al menos un canal de tráfico para conversar. Dentro del grupo de usuarios de un mismo cliente, no todos los usuarios se comunican entre si, es decir, tendrán canales distintos para conversar con sus grupos asignados de acuerdo al grupo de trabajo. Mientras menos grupos de conversación, mayor será la población de radios que tiene capacidad el sistema. Esto implica que queda abierto el diseño para cuando se empiece la comercialización.

Por esta razón, para asignar el canal de envío de datos de autoreportes GPS y determinar el intervalo de los autoreportes, se deben tomar en cuenta muchas consideraciones más en el ámbito empresarial y comportamiento de las empresas que utilizan radio y rastreo satelital como servicios separados antes de la entrada a producción.

4.5.4 Pruebas de Funcionamiento del Software de Gestión del Sistema Troncalizado

Como todo sistema de telecomunicaciones, el sistema troncalizado NX-DN tiene un software de gestión para controlar y monitorear los canales de los diferentes sitios del operador para saber el estado y poder sacar estadísticas del funcionamiento.

Desde este software se crean los sitios, se agregan políticas de Clase de Servicio, se administra la red LAN, y se gestiona las llamadas que están cursando.

Figura 4.23 muestra la carga de canal que se tiene a lo largo del día. En este reporte de ejemplo, se muestran 72 llamadas realizadas en la hora más ocupada, representando un 5% de carga para el total de 73 llamadas realizadas en el día. Estas estadísticas permiten observar el tráfico cursado y poder tomar decisiones sobre el sistema para mejorar la calidad de servicio. Cuando entre en vigencia el pleno funcionamiento con usuarios reales, esta herramienta permitirá calcular en erlangs el tráfico cursado en la hora más cargada, para así obtener una probabilidad de bloqueo de canal y determinar si es necesario aumentar el número de canales (repetidores) para disminuir dicha probabilidad de bloqueo, mejorando la calidad de servicio y aumentando la población de radio.

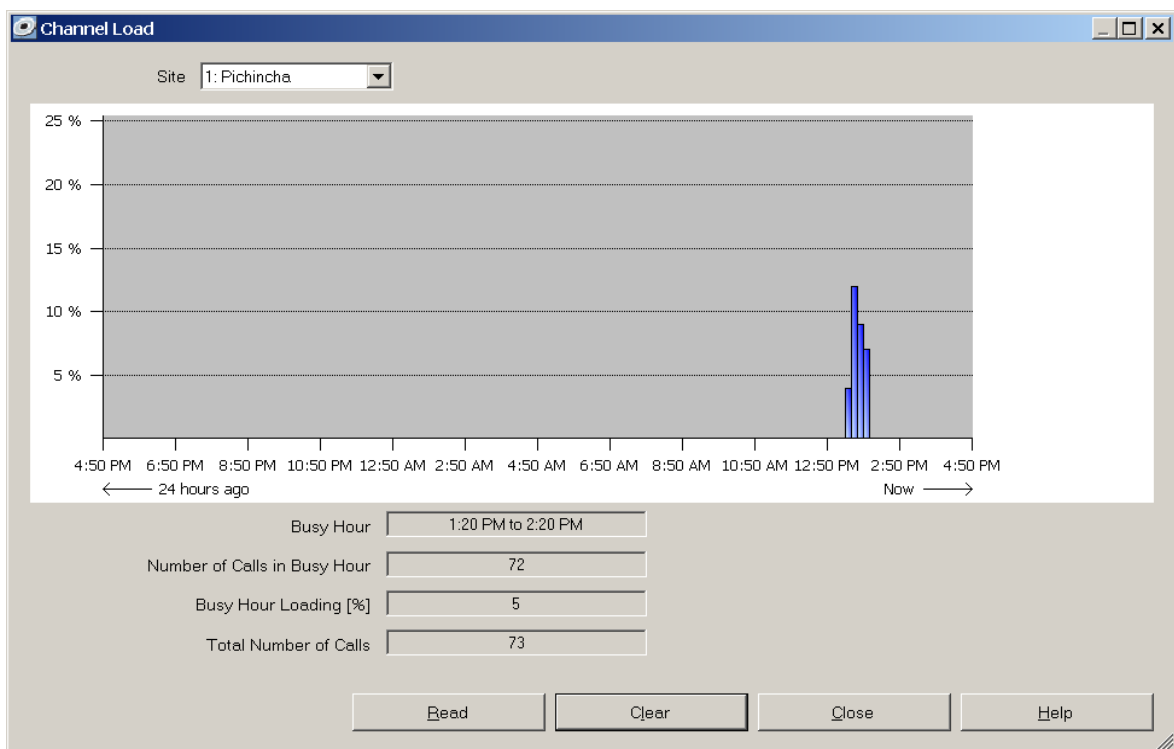


Figura 4.23: Gráfica de carga de canal [A]

Figura 4.24 presenta un resumen del estado de las repetidoras de un sitio determinado. En el ejemplo, se puede ver el nombre del sitio, las direcciones IP de los canales asociados y el estado de la red. Si llegara a presentarse algún inconveniente, este reporte reflejaría los problemas de red o de hardware que puedan presentarse.

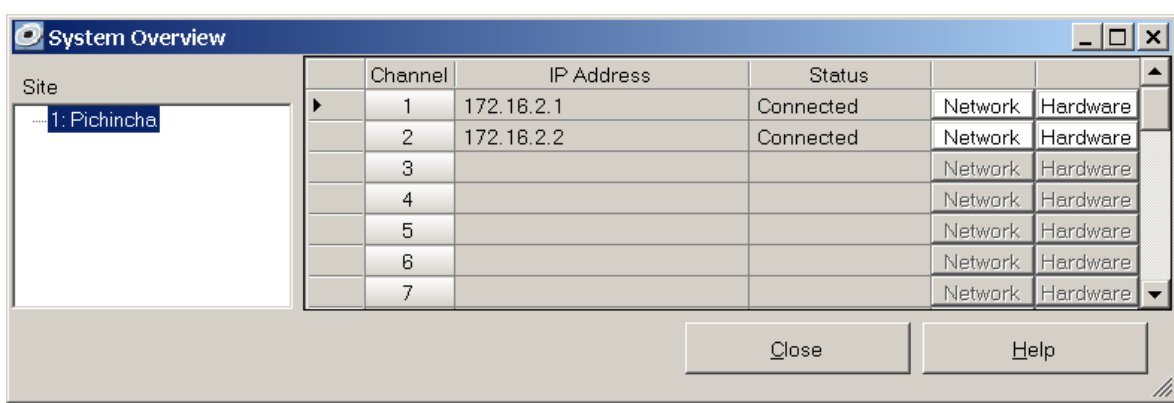


Figura 4.24: Resumen de estado de sitio [A]

Figura 4.25 presenta en tiempo real el estado de los canales asociados a un sitio. En este caso, se está visualizando que el canal de trafico 2 tiene un usuario con ID 4, haciendo una llamada al grupo con GID 1, con una llamada tipo conferencia y una duración de 10 segundos.

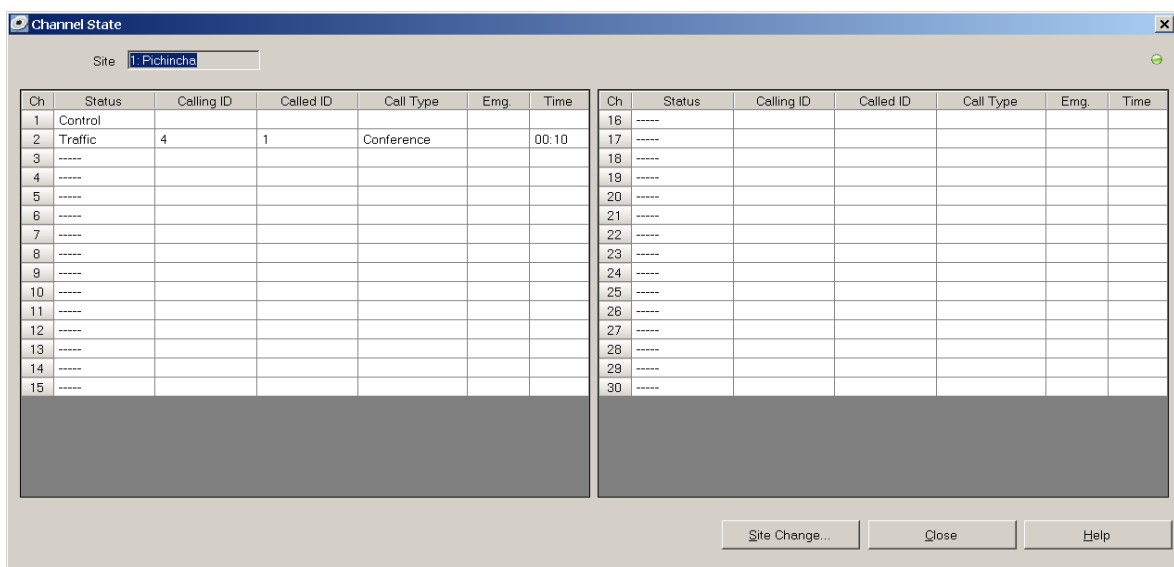


Figura 4.25: Estado de canal en tiempo real [A]

La capacidad máxima que tiene un solo sitio troncalizado es de 30 canales. De cada 5 canales, uno es de control. Es decir, del total de 30 canales, 6 serán canales de control y el resto de tráfico.

Figura 4.25 permite observar el reporte de tráfico de comunicaciones, pudiéndose ver toda clase de llamada y mensaje de estado de los usuarios.

Record Type	Call Type	Emerge...	Calling ID	Called ID	Date	Talk Time	Cause	Direction	Chan...
Registration		Normal	1	1	DEC/12/2012 2...		N001		
Registration		Normal	4	2	DEC/12/2012 2...		N001		
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...	00:00:18	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...	00:00:01	N004	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...		E018	intra	
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...	00:00:01	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...	00:00:04	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...	00:00:01	N004	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	2	1	DEC/12/2012 2...	00:00:01	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	2	1	DEC/12/2012 2...	00:00:05	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	2	1	DEC/12/2012 2...	00:00:01	N006	intra	7
Registration		Normal	4	2	DEC/12/2012 2...		N001		
Voice Call [S to S]	Individual	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...		N004	intra	
Voice Call [S to S]	Individual	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...	00:00:07	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Individual	Normal	4	2	DEC/12/2012 2...	00:00:02	N006	intra	7
Registration		Normal	4	1	DEC/12/2012 2...		N001		
Registration Clear		Normal	2		DEC/12/2012 2...		N001		
Registration		Normal	2	1	DEC/12/2012 2...		N001		
Registration Clear		Normal	2		DEC/12/2012 2...		N001		
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	1	DEC/12/2012 4...	00:00:01	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	1	DEC/12/2012 5...	00:00:03	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	1	DEC/12/2012 5...	00:00:08	N006	intra	7
Voice Call [S to S]	Conference	Normal	4	1	DEC/12/2012 5...	00:00:11	N006	intra	7

Memory Used [%]

Buttons: Extract... Read Clear Close Help

Figura 4.26: Reporte de comunicaciones [A]

El reporte de comunicaciones permitirá al operador y al usuario determinar los eventos que ocurrieron con precisión para poder levantar información que permita determinar eventualidades que se puedan presentar.

Figura 4.27 por otro lado, muestra el reporte de mensajes de hardware de las repetidoras. En el ejemplo, se muestra errores de canal debido a la falla del cable de sincronización que permite determinar el rol de las repetidoras como canales de tráfico o control.

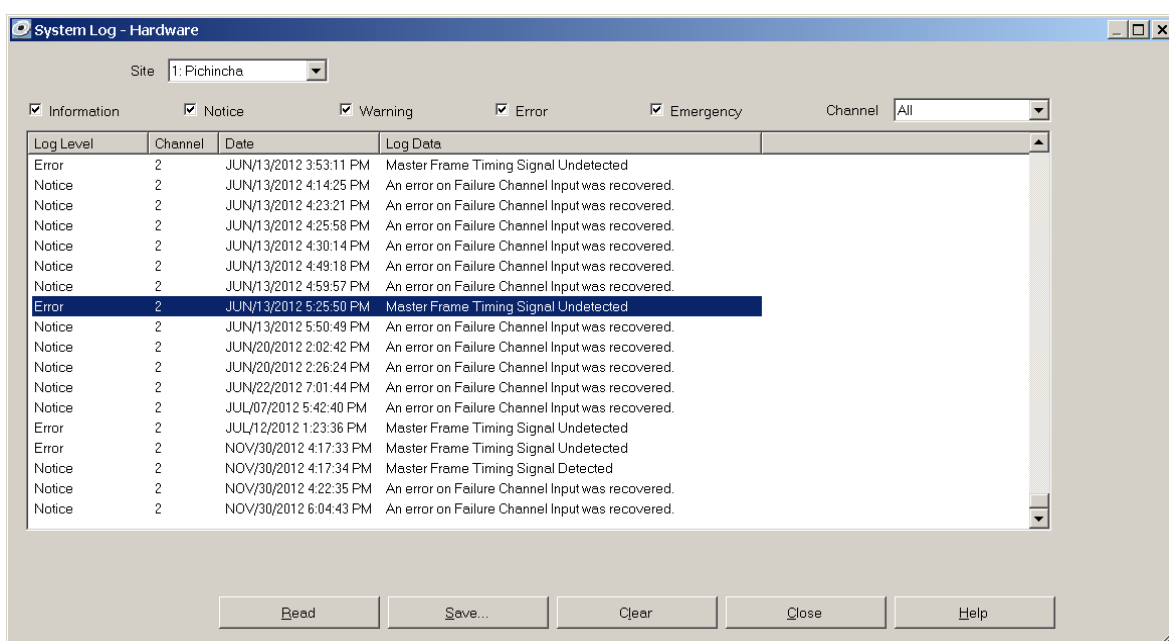


Figura 4.27: Reporte de mensajes de hardware [A]

CAPÍTULO V

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL PUESTO EN MARCHA EN UN SOLO SITIO

Finalizada la implementación y pruebas de funcionamiento, se puede realizar un análisis de fortalezas y debilidades del sistema de radiocomunicaciones troncalizado, pudiendo llegar a identificar donde se puede mejorar el servicio a entregar posteriormente.

Entre las fortalezas se encuentra lo siguiente:

- La tecnología digital permite innovar y entregar servicios de valor agregado a los usuarios finales con la llegada de mensajes de texto y GPS incorporados al sistema de radio tradicional, permitiendo entregar en un solo paquete todos los servicios que normalmente antes se entregaban por separado. Con esto, un usuario puede invertir en un sistema que garantice y permita obtener bajo un mismo proveedor y a un costo competitivo de largo plazo un beneficio enfocado a la seguridad y gestión de flotas.
- La transmisión de voz digital permite que en cierto grado se perciba un incremento de cobertura, dado que la corrección de errores elimina el ruido que normalmente se escucha en transmisiones analógicas.
- Las comunicaciones son más difíciles de interceptar, por ende se considera que es un sistema más seguro. Se puede agregar encriptación

de acuerdo a la exigencia de cada cliente, por lo que el grado de seguridad puede ir en función del tipo de misión crítica y presupuesto del cliente, que por defecto al migrar a digital ya viene incorporado un nivel mínimo.

- Con el sitio Atacazo implementado, ya se puede brindar servicio de comunicaciones a empresas de transporte entre Quito, Santo Domingo, y Quinindé.

Las debilidades que posee preliminarmente el sistema se describe a continuación:

- El alto costo de la implementación de los equipos de usuario final hace que el modelo de negocio al momento tenga dificultades notorias. El cambio de equipos por la nueva tecnología requiere de una inversión alta por parte de los usuarios y el operador de radio.
- La vulnerabilidad del sistema se hace notoria dadas las características del Cerro Atacazo. Los cortes de luz son frecuentes debido a las condiciones climatológicas. El banco de baterías no abastece un tiempo prudente para un funcionamiento adecuado con respaldo de energía que garantice estabilidad de energía.
- El difícil acceso a la caseta hace que los tiempos de respuesta a incidentes como fallas eléctricas se eleven.
- La utilización de un vocoder de baja tasa de transmisión (AMBE+2 a 4kbps) hace que se requiera de un enlace de datos confiable para la futura expansión de sitios, dado que los problemas de red como paquetes perdidos, latencia y jitter afectarían notoriamente a la calidad de voz cuando existen problemas de red.

Para poder entrar en operaciones comerciales, es necesario instalar el sistema en el cerro Cochabamba, desde el cual ya se enlazan los puntos de interés en la carretera. La experiencia en la instalación del sitio Atacazo permitirá una mejor y más ágil implementación en las siguientes fases del proyecto. Cabe destacar que todas las funcionalidades del sistema NEXEDGE se probaron y verificaron.

Los enlaces de datos para interconectar los sitios deben ser confiables, por lo que futuras pruebas se requieren realizar sobre los sitios para verificar la calidad.

Se procede a instalar el programa KPG-110SM que es el software de gestión y monitoreo de los sitios troncalizados. Con este software se realizan pruebas para verificar el correcto funcionamiento de las funcionalidades arrojando los resultados mostrados en la Figura 5.1.

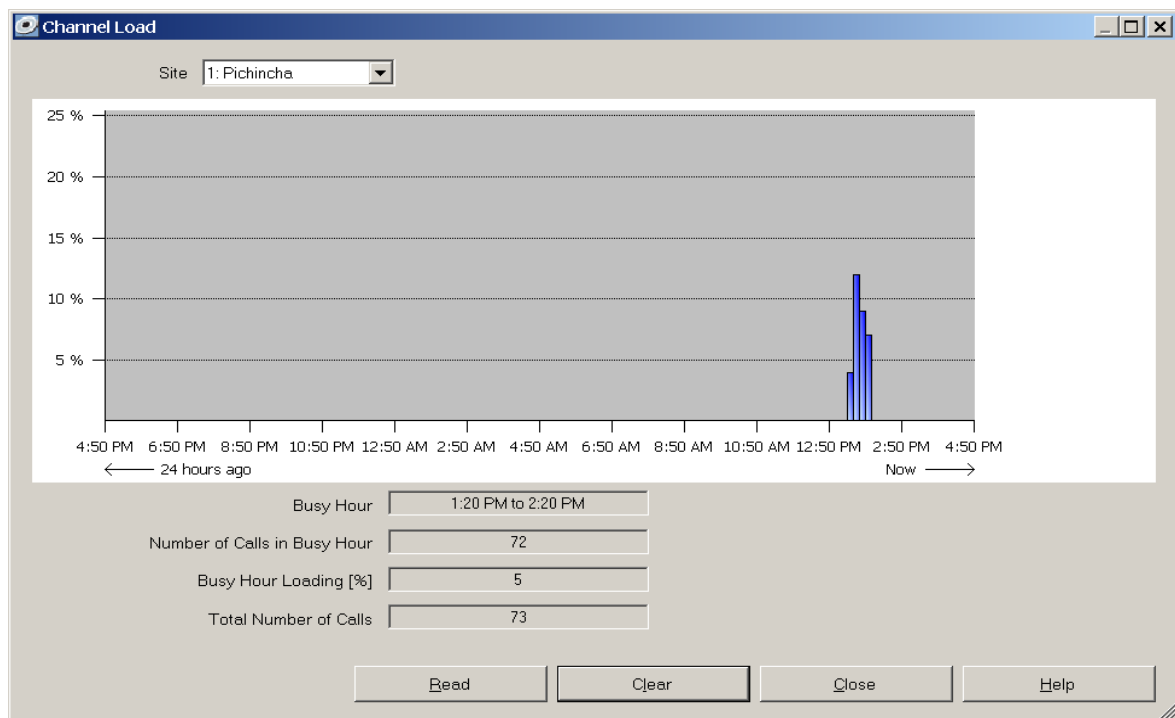


Figura 5.1: Carga de canal [A]

En la Figura 5.1 se puede ver los datos estadísticos de tráfico. El software indica la hora más congestionada, el número de llamadas realizadas en esa hora, qué porcentaje de carga representa, y el número de llamadas en total del día.

Sobre la marcha, esto permitirá que se hagan controles sobre el tráfico en la red para brindar Calidad de Servicio sobre el sistema. Si se llegara a detectar un volumen alto de llamadas, se tiene que calcular cuántos canales se deben agregar para disminuir la probabilidad de bloqueo de canal, conforme el crecimiento lo demande.

El punto crítico para una transición suave entre sitios, será la configuración *roaming* que se realice sobre los radios. Se han expuestos los parámetros que utiliza el radio para un *handoff* en el capítulo IV, quedando pendiente las pruebas de campo a futuro cuando se instalen los sitios Cochabamba, Pichincha y Cerro Azul para determinar los niveles de señal a discriminar para un cambio de celda suave. Este cambio de celda permitirá que se tenga más ágil control sobre las flotas y una mejor calidad de servicio.

5.2 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO Y LOCALIZACIÓN VEHICULAR EN EL ÁREA DE COBERTURA DEL SITIO

Las pruebas de campo con equipos portátiles y móviles revelan que la comunicación es de muy buena calidad, mejorando la experiencia del usuario respecto a un sistema analógico tradicional.

La señal de -119dBm era la más baja en todas las mediciones, sin embargo se podía entender todavía con cierta dificultad el mensaje. A partir de los -110dBm, las comunicaciones eran posibles pero dependían de la tasa del B.E.R. que tenga la señal. Si era una señal libre de obstrucciones con línea de vista se tenía una comunicación fluida, pero si era una señal ruidosa con obstrucciones la comunicación se perdía a los -116dBm. En ocasiones, se podía perder comunicación o el mensaje no era entendible a los -110dBm. Esto demuestra una diferencia entre una señal analógica vs digital, donde con el modo analógico se abre el *sqelch* del radio a -110dBm y se escucha el mensaje independiente de como llegue la señal, y será sumada el ruido propio de propagación y rebotes la que impide entender el mensaje, mientras que en una señal digital al mismo nivel de señal requiere además que la tasa de B.E.R. sea baja para una corrección de errores buena. Si la tasa de errores es alta (relativa a canal ruidoso análogo), el

mensaje no puede ser decodificado de manera exitosa y el mensaje no es entendido a pesar de tener un buen nivel de señal.

Para mejorar las pruebas de campo y que sea más precisa la observación se puede utilizar un analizador de espectros de NX-DN que además de verificar la portadora de canal, pueda también decodificar el audio y la tasa del B.E.R. para poder entender mejor el comportamiento de la señal digital.

El comportamiento de la señal del canal de control es de suma importancia ya que este permite o no el acceso al canal. Un balance correcto permitirá que un radio con niveles buenos de potencia de recepción transmita información legible para el repetidor. Si está mal calibrado el balance y relación Potencia de Transmisión vs Sensibilidad del Radio, un radio con mala recepción accederá y transmitirá al canal con bajos niveles de señal y no será entendido el mensaje por los demás participantes de conversación. Dicho de otra manera, la potencia de transmisión del sistema debe ser equilibrado para que se escuche al radio solo hasta cuando el radio ya no pueda ser entendido en el canal de retorno. Un exceso de potencia de transmisión hará que el radio escuche a la portadora pero en el retorno envíe un mensaje distorsionado y quizás que no llegue a la repetidora.

La localización vehicular demora en realizarse entre 1 y 2 segundos por radio, entregando información útil como coordenadas geográficas, velocidad, y orientación. Con estos tres datos ya se puede utilizar un software de gestión de monitoreo en tiempo real como el FLAV 3.0 que permite localizar a las unidades mediante un aplicativo servidor web. La ruta tomada desde Quito hasta Santo Domingo reveló que todo el trayecto tiene cobertura, a excepción de las zonas de sombra conocidas mostradas en las simulaciones y pruebas de campo.

5.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE COBERTURA-EFICIENCIA EN LA RED DE TRANSPORTE DE VOZ Y DATOS PARA LA VPN

Luego de realizar un recorrido por las zonas de difícil acceso al sistema en la interfaz de aire, se constató que el audio era entendible con una escala MOS 4/5, distorsionado hasta 3/5 de alguna manera mientras había más errores y menor

señal, pero se podía entender el mensaje de comunicación. Sin embargo, al enlazar los futuros sitios, se requiere ver la influencia que tendrá la red de transporte sobre los paquetes de voz y el vocoder.

Para medir la eficiencia de la VPN, se utilizó el programa JPERF para realizar inyecciones de tráfico. La latencia pico tomada de una prueba fue de 231ms, y la mínima de 30ms. En promedio, había 100ms de latencia en la red. Con esto, la calidad de la voz es todavía aceptable dado que desde los 175ms en adelante ya se puede considerar a una red no apta para VoIP. En este caso, las intermitencias son normales dentro de un canal de radio y en general no se percibe los picos en una conversación.

Las repetidoras utilizan un Jitter Buffer adaptativo para que de manera inteligente minimicen los errores en la transmisión del canal IP. Una transmisión entre sitios a través de la red VPN siempre dependerá de la buena calidad de los enlaces. Si en la interfaz de aire una llamada tiene mala señal y el audio es de mala calidad, es muy probable que cuando pase por el canal IP esta se degradara con mayor razón. La utilización del Jitter Buffer Adaptativo permite que se los paquetes que llegan a destiempo o con errores puedan obviarse al entrar al buffer, minimizando el error en el canal IP. Una ventaja frente a VoIP, es que la comunicación es half-duplex, por lo que si llegará a incrementarse el retardo, este no es percibido por los que escuchan el mensaje.

Al inyectar tráfico UDP en el canal mientras se tenía una conversación, se pudo evidenciar que la calidad de audio se ve afectada directamente. Esto se debe a que el ancho de banda del canal se ve saturado con más paquetes que lo que puede dejar pasar. Por esta razón, la implementación de Calidad de Servicio es imprescindible, ya que en ese canal pasarán datos de control y datos de estado de las repetidoras, pudiendo llegar a afectar una llamada. Debido a que los datos son TCP y UDP, una correcta identificación de los paquetes críticos es importante para que se puedan definir las políticas de QoS sobre el canal. Los paquetes que pueden llegar a interferir en el canal son los paquetes de control, gestión y monitoreo del sistema generados por el software de administración KPG-110SM.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Finalizada la implementación del sistema de radio troncalizado, se procede a realizar las siguientes conclusiones:

- Se implementó un sistema de radiocomunicaciones troncalizado multisitio de tecnología digital con aplicativos de control de flotas y rastreo vehicular para la empresa RACOMDES S.A., comprobándose y verificando que esta funcional y listo para entrar en operaciones para el área de cobertura diseñado y comprendido por los límites del presente trabajo de investigación.
- Se analizó la situación actual de la red analógica troncalizada, para poder realizar los cambios necesarios para la migración paulatina futura a la tecnología digital de los abonados actuales mediante un análisis de mercado del sector de radiocomunicaciones. Se evidenció que existe un total de 2097 abonados al cierre del año 2012, y que éste ya es un nicho de mercado potencial para migrar a la nueva tecnología digital.
- Se implementó un sistema basado en Kenwood NX-DN dado que luego del análisis de mercado se determinó que éste presenta altas prestaciones de confiabilidad, unificación de servicios de mensajería y rastreo satelital y servicios de valor agregado a bajo costo que permitirán diferenciarse en el mercado de las radiocomunicaciones.

- Se diseñó una red de radiocomunicaciones digital troncalizada de acuerdo a los requerimientos de la empresa RACOMDES S.A. que cumpla con la posibilidad de ampliar su red mediante conexión de sitios por IP con capacidad de rastreo satelital, realizando estudios para determinar la cobertura efectiva mediante software de simulación. Se realizó un estudio de dimensionamiento de tráfico para determinar el ancho de banda requerido entre sitios en la red de datos, con proyección de crecimiento a futuro y se determinó que la capacidad de los enlaces de datos a contratar para 5 canales de tráfico por sitio interconectados es de 512kbps.
- Se calculó la longitud de cable a utilizar de acuerdo a la frecuencia de trabajo para un correcto acople de impedancias maximizando ganancias y minimizando pérdidas sobre la línea de trasmisión, evitando también la generación de onda reflejada en los equipos. La potencia de transmisión medida a la salida del combinador es de 37.15 [W].
- Implementada la red de radiocomunicaciones digital, se realizó pruebas de campo para verificar el funcionamiento y cobertura de acuerdo al diseño planteado, pudiéndose constatar que de manera subjetiva el 95% de la carretera entre Quito-Santo Domingo está cubierta con una señal entre -80dBm a -110dBm, pudiendo garantizar una comunicación fluida para los usuarios, y que las zonas de sombra serán cubiertas cuando se terminen de instalar los demás sitios del sistema previstos en un futuro.
- Se analizó los resultados obtenidos de las pruebas de campo en el sitio de cobertura, viéndose que estos arrojan datos esperados de acuerdo a la cobertura simulada, mediante la comparación de intensidad de campo eléctrico simulado frente a mediciones reales con los radios portátiles utilizando la función "*Management Mode*" incorporada en los radios NX-410, con el cual se puede verificar en dBm la intensidad de señal. Las pruebas mostraron que las zonas de -70dBm a -80dBm en las zonas simuladas tienen igual comportamiento que en las mediciones de campo, y que las zonas de -80dBm a -110dBm son similares, pudiendo variar

entre 10dBm a 15dBm el error, dado que en esas zonas puede hallarse obstáculos no contemplados en la cartografía, además de la propagación propia de la onda como difracción y rebote. Incluso se pudo constatar que el radio puede comunicarse con hasta -116dBm si es que tiene línea de vista con el cerro, pudiendo así incrementar el área de cobertura real frente al simulado.

- Se realizaron pruebas de campo adicionales para verificar el funcionamiento del sistema de rastreo satelital verificando la precisión y exactitud de las coordenadas. Dado que el error máximo del GPS es de 15m con condiciones ideales, éste error es despreciable en la cartografía dado que la altura desde la cual se visualiza el mapa y el tamaño de los iconos en el software de rastreo minimizan éste error por escala. Además, se realizaron pruebas para verificar que los mensajes de texto esté en pleno funcionamiento y que la gestión de flotas como es el reporte de comunicaciones permita ver en tiempo real la ocupación de canal del sistema. En general, el sistema presenta un buen funcionamiento, siendo preciso en todas las pruebas efectuadas.
- La capacidad de usuarios del sistema es un número relativo que dependerá de la frecuencia y tiempo de uso del canal en un sistema. Por lo tanto se estima con datos estadísticos basados en el sistema analógico y con la recomendación general de operadores de radio, de que un canal puede tener hasta 90 usuarios [13]. Con los 5 canales instalados, 1 de control y 4 de tráfico, el total de usuarios máximos que se puede brindar para el sitio implementado es de 360 aproximadamente. La población de radio puede crecer si es que el número de llamadas de grupo es mayor y el tiempo de ocupación de canal es menor. Para esto, se puede emplear teoría de colas para estimar el número de usuarios que se puede incrementar en el sistema dado los datos de estadística de tráfico que arroja el software de gestión y monitoreo KPG-110SM.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la instalación de un generador eléctrico a combustible para buscar una alternativa de respaldo de energía. Este generador debe ser instalado en un sitio de fácil acceso donde se pueda ingresar con vehículo, para garantizar que se pueda abastecer combustible de manera rápida. El generador que se tiene instalado actualmente en el cerro Pichincha como respaldo de energía para el sistema Motorola Privacy Plus tiene abastecimiento de combustible para hasta 2 días, por ende se debería instalar un generador de similares prestaciones y respaldo de combustible para garantizar el continuo funcionamiento en el cerro Atacazo. Desde el sitio de instalación del generador, se debe llevar líneas de transporte de energía a la caseta.
- Se debe procurar para las siguientes fases de implementación de los sistemas de Cochabamba, Cerro Azul y Pichincha mantener documentado todos los parámetros de funcionamiento y línea base, ya que una vez que entre en operaciones se deben realizar correcciones y mantenimiento, por lo tanto esto puede alterar el desempeño y cobertura. Una buena documentación permite tener una sólida base ante posibles fallos.
- Se recomienda realizar mediciones con inyección de tráfico entre los sitios para probar la confiabilidad de los enlaces y medir parámetros como latencia y jitter. Se recomienda mantener el parámetro de latencia de red menor a los 150ms para que no se afecte la voz.
- La utilización de la función de *roaming* debe ser probada con los sitios implementados antes de la entrada a producción. Los niveles de sensibilidad para discriminar los sitios a enganchar puede provocar problemas de reconocimiento de sitios, haciendo que se utilice un canal lejano con baja sensibilidad degradando la voz antes del *handoff*. Para esto se debe realizar mediciones de campo en los sitios en donde se sobreponen las señales de sitios aledaños, midiendo la sensibilidad de la

señal de la portadora del canal de control de los sitios solapados. Una vez que se establezca un patrón, se puede realizar una correcta calibración de niveles de sensibilidad a discriminar para el *handoff*.

- Se recomienda encontrar la capacidad máxima de usuarios que pueda tener el sistema sin aumentar la probabilidad de bloqueo de canal cuando se utiliza la función de rastreo satelital automática. Cada solicitud de rastreo se debe considerar como canal ocupado, y este está en el orden de 1 a 2 segundos por radio. La tabla 4.3 muestra el número de solicitudes y tiempo que demora en hacer un sondeo de datos GPS, por lo que se puede adicionar los datos de estadística de volumen de tráfico de voz y encontrar un balance entre el número de usuarios vs. solicitudes dado el número de canales disponibles. Además, se debe considerar si se utilizará el canal de control como canal de envío de tráfico de reportes de posición o si se utilizará canales de tráfico aleatorio. Esta decisión se debe tomar a nivel general para todos los sitios y antes de la programación de los equipos suscriptores.
- El software utilizado FLAV3.0 que es un software de rastreo con servicios web tiene ciertas limitantes en términos de utilización por parte de un operador de radio troncalizado. Por esta razón, se plantea el desarrollo de un nuevo software que realice las mismas funciones del software FLAV3.0, pero que permita discriminar los usuarios con niveles de privilegios, para que se pueda visualizar solo las flotas de interés del cliente y no a todos los abonados del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [A] GUEVARA, Daniel *“Implementación de un sistema de radiocomunicaciones troncalizado digital multisitio con capacidades de rastreo vehicular automático y control de flotas”*, Escuela Politécnica del Ejercito, año 2013
1. Biblioteca Digital de la E.P.N., *“Análisis de la problemática de interconexión en Ecuador entre los sistemas troncalizados y las redes telefónicas fijas y celulares”*, Johana Ortega-Estefanía de las Mercedes, Junio 2009
 2. SENATEL, Internet - www.senatel.gob.ec. Última visita, Mayo 2012
 3. Revista *RadioResource International*, 3er Trimestre del 2012, editorial RRMediaGroup.
 4. Revista en línea de *RadioResource International*, Internet - <http://www.rrimag.com/onlyonline.cfm?OnlyOnlineID=174>. Última visita: 16 - 09 - 2012
 5. *TETRA SEPURA GATEWAYS - Communication solutions for Ambulances in the UK*, Internet -<http://www.tetramou.com/Library/Documents>. Última visita: 16 - 09 - 2012
 6. *DIFFERENCE BETWEEN FDMA and TDMA*, Internet <http://www.differencebetween.net/technology/difference-between-fdma-and-tdma>. Última visita: 16 - 09 - 2012
 7. *WHITE PAPER: WillTek. Migrating from analogue to digital: Important measurements on TETRA mobile devices*, Internet-http://www.tetramou.com/Library/Documents/TETRA_Resources/Library/willtek_tetra_wp660_0108_en.pdf. Última visita: 16 - 09 – 2012
 8. SPRINKLE, Matthew *“Design Considerations in a Modern Land Mobile Radio System”*, 20 de Junio de 2003
 9. LANDIVAR, Edgar *“Comunicaciones Unificadas con Elastix”* Volumen 1, 2da. Edición.
 10. JOSKOWICZ, José y SOTELO, Rafael: *“Medida de la calidad de voz en redes IP”*
 11. MORA Jeanpaul: Tesis de Grado, *“Cálculo de cobertura para el sistema de radiocomunicación trunking en el sur del estado Anzoátegui para comunicaciones móviles EDC”*, Universidad Central de Venezuela, año 2008

-
12. Recomendación UIT-R P.526-10, Propagación por Difracción.
 13. NEXEDGE, Training Program for KENWOOD Authorized Dealers, Noviembre 2010
 14. NEXEDGE NXDN System Guide, Version 2.50, Kenwood Corporation, 10 de Mayo 2011

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- AES** *Advanced Encryption Standard* Es un esquema de cifrado por bloques.
- AFSK** *Audio frequency-shift keying.* Es la técnica de modulación por la cual información digital es representada por los cambios en la frecuencia de un tono de audio, dando paso a una señal codificada adecuada para transmisión por radio o teléfono.
- AMBE+2** *Advanced Multi-Band Excitation* Es un vocoder que opera a tasas de transmisión entre 2 y 9.6kbps y a una tasa de muestreo de 8 KHz en cuadros de 20ms. Es utilizado por el estándar P25 y NX-DN.
- APCO** *Association of Public-Safety Communications Officials-International*
- AVL** *Automatic vehicle location,* Localización automática de vehículos
- B.E.R.** *Bit Error Rate,* Tasa de bits errados.
- BNC** Bayonet Neill–Concelman. Es un conector de rápida conexión/desconexión de RF usado para cable coaxial.
- C4FM** *Continuous 4 Level Frequency Modulation*
- CAI** *Common Air Interface,* Interfaz común de aire
- CoS** *Class of Service,* Clase de Servicio
- CTCSS** *Continuous Tone-Coded Squelch System*

dB	Decibelio Unidad relativa empleada para expresar la relación entre dos magnitudes: la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia. Su unidad es el dB.
dB_i	Decibelio Isotrópico
dB_m	Potencia relativa a 1 mW.
DES	<i>Data Encryption Standard</i>
DPSK	<i>Differential phase shift keying</i>
DTMF	<i>Dual-tone multi-frequency</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso múltiple por división de frecuencia
FEC	<i>Forward Error Correction</i> , Corrección de errores hacia adelante. Es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite la corrección en el receptor sin retransmisión de la información original.
FleetSync	<i>FleetSync</i> es una señalización digital abierta para equipo de dos vías desarrollada por KENWOOD, esta señalización digital trabaja a 1200 ó 2400bps.
FM	<i>Frequency modulation</i> , Frecuencia modulada.
FSK	<i>Frequency-shift keying</i>
GID	<i>Group ID</i>
GMSK	<i>Gaussian minimum-shift keying</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>

IDAS	<i>Icom Digital Advanced System</i>
iDEN	<i>integrated Digital Enhanced Network</i>
IMBE	<i>Improved Multi-Band Excitation</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTR	<i>Logic Trunked Radio</i>
MDC1200	<i>Motorola Data Communications 1200</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
MPL	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
nLOS	<i>near Line Of Sight</i>
OTAP	<i>Over The Air Programming</i>
P25	<i>Project 25</i>
PBX	<i>Private branch exchange</i>
PMR	<i>Private mobile radio</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
PTT	<i>Push To Talk</i>

QoS	<i>Quality of Service</i>
RF	Radio Frecuencia
RSSI	<i>Radio Signal Strength Indicator</i>
SINAD	<i>Signal-to-noise and distortion ratio</i>
TCP	<i>Transport Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UID	<i>Unit ID</i>
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VoIP	<i>Voice over IP, Voz sobre IP</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

FECHA DE ENTREGA

El día 7 de Marzo de 2013, en la ciudad de Sangolquí, firman en constancia de la entrega del presente Proyecto de Grado titulado “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES TRONCALIZADO DIGITAL MULTISITIO CON CAPACIDADES DE RASTREO VEHICULAR AUTOMÁTICO Y CONTROL DE FLOTAS”, en calidad de Autor el Sr. Daniel Andrés Guevara Haro, estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones, y recibe por parte del Departamento de Eléctrica y Electrónica el Director de Carrera de Telecomunicaciones, el Señor Ing. Darío Duque.

Daniel Andrés Guevara Haro

C.I.: 171604895-2

Ing. Darío Duque

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES