

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

SISTEMA DE CONTROL OPERACIONAL DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO

Informe final de Proyecto de Graduación para
optar por el título de Ingeniero en Electrónica
con el grado académico de Licenciatura

Erick Eliseo Soto Chong

Cartago, Diciembre 2011

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor asesor



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor lector

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 1 de Diciembre del 2011

Declaro que el presente Anteproyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

San José, 1 de diciembre del 2011


Erick Eliseo Soto Chong
ced: 1-1135-508

RESUMEN

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados cuenta con el Centro de Control Operacional con el propósito de supervisar el correcto funcionamiento del acueducto metropolitano.

El objetivo de este proyecto es rediseñar la topología de los radio enlaces entre las estaciones remotas del acueducto metropolitano y el Centro de Control Operacional ubicado en el plantel de la Uruca.

En la primera parte del proyecto se recopiló información de manuales, libros de texto y por medio de entrevistas al personal encargado del mantenimiento, funcionamiento y control del acueducto.

Se realizaron estudios de campo mediante la visita a las estaciones remotas, posteriormente, mediante la utilización de un software especializado se calculó la factibilidad de los enlaces de la topología propuesta, cumpliendo con la normativa nacional y los estándares internacionales.

Finalmente se realizaron recomendaciones de acuerdo al análisis de resultados.

Palabras clave: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Centro de Control Operacional, Monitoreo, Telemetría, Estación Remota, Acueducto Metropolitano.

SUMMARY

The Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados counts with the Centro de Control Operacional for the purpose of supervising the metropolitan water duct's proper functionality.

The objective of this project is to redesign the topology of the radio links between the remote stations of the metropolitan ducts and the Centro de Control Operacional located in the Uruca region.

In the first part of the project information was gathered from manuals, text books, and through a series of interviews to the personnel in charge of the maintenance, functionality and control of the water duct.

A series of field experiments took place in a manner of visits to the remote stations, later, through the use of specialized software the links of the proposed topology were measured and such complied with both, the national norms and with the international standards.

In the end, recommendations were made based on the analysis of the results.

Key words: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Centro de Control Operacional, Monitoring, Telemetry, Remote Station, Metropolitan Water Duct.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución.....	1
1.2 Solución seleccionada	4
Capítulo 2: Meta y Objetivos	5
2.1 Meta.....	5
2.2 Objetivo General.....	5
2.3 Objetivos Específicos	5
Capítulo 3: Marco Teórico	6
3.1 Descripción del Acueducto Metropolitano.....	6
3.1.1 Área del proyecto	8
3.1.2 Estaciones Remotas	9
3.2 Descripción de los parámetros y componentes electrónicos utilizados por el software de simulación de los radio enlaces	11
3.2.1 Modelos Digitales del terreno.....	11
3.2.2 Modelo de Propagación Longley-Rice	13
3.2.2.1 Parámetros del modelo	13
3.2.2.2 Funcionamiento del modelo	16
3.2.3 Antenas.....	17
3.2.3.1 Parámetros de las antenas.....	17
3.2.3.2 Antena Yagi.....	19
3.2.3.3 Antena Omnidireccional	21
3.2.4 Zonas de Fresnel	22
3.2.5 Pérdidas.....	23
3.2.6 Margen de desvanecimiento	25
3.2.7 EIRP.....	26
3.2.8 Torres para telecomunicaciones	27
3.2.9 Normativa Costarricense.....	27
Capítulo 4: Procedimiento metodológico.....	30

4.1 Reconocimiento y definición del problema	30
4.2 Obtención y análisis de información	30
4.3 Implementación de la Solución	31
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	32
5.1 Ubicación de las estaciones	32
5.2 Topología de la red	32
5.2.1 Sector Suroeste	35
5.2.2 Sector Sur	37
5.2.3 Sector Norte	39
5.2.4 Sector Noreste	42
5.2.5 Sector Central	45
5.2.6 Sector Este	46
5.2.7 Enlace entre el Centro de Control Operacional y los centros de control secundarios.....	48
Capítulo 6: Resultados	50
Capítulo 7: Conclusiones	57
Bibliografía	58
Apéndices y Anexos.....	60
Apéndice A.1 Glosario de términos y abreviaturas	60
A.1.1 Glosario de términos.....	60
A.1.2 Glosario de Abreviaturas	61
Apéndice A.2 Información sobre la institución	62
Apéndice A.3 Estaciones Remotas del Acueducto Metropolitano	63
Apéndice A.4 Simulación de los enlaces inalámbricos terrestres	71
Anexo B.1 Normativa Costarricense.....	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Diagrama esquemático de la Estación Remota La Meseta.....	7
Figura 3.2	Foto Satelital de la Estación Remota La Meseta	7
Figura 3.3	Cantones del Acueducto Metropolitano	8
Figura 3.4	Distribución de los datos del modelo SRTM-DTED.....	12
Figura 3.5	Coordenadas geográficas de Costa Rica.....	12
Figura 3.6	Modelo Longley – Rice, atenuación vrs distancia	16
Figura.3.7	Configuración de una antena Yagi-Uda	19
Figura.3.8	Diagrama de radiación de una antena Yagi-Uda	20
Figura.3.9	Antena Omni-Direccional	21
Figura.3.10	Diagrama de radiación de una antena Omni-Direccional.....	22
Figura 3.11	Primera Zona de Fresnel	23
Figura 5.1	Foto satelital del enlace entre el CCO y Pozo de Brasil.....	33
Figura 5.2	Perfil topográfico del enlace entre el CCO y Pozo de Brasil	33
Figura 5.3	Topología propuesta	34
Figura 5.4	Foto satelital del sector Suroeste del acueducto metropolitano	36
Figura 5.5	Mapa digital del sector Suroeste del acueducto metropolitano	36
Figura 5.6	Foto satelital del sector Sur del acueducto metropolitano.....	38
Figura 5.7	Mapa digital del sector Sur del acueducto metropolitano.....	38
Figura 5.8	Foto satelital del sector Norte del acueducto metropolitano.....	40
Figura 5.9	Mapa digital del sector Norte del acueducto metropolitano.....	41
Figura 5.10	Foto satelital del sector Noreste del acueducto metropolitano	43
Figura 5.11	Mapa digital del sector Noreste del acueducto metropolitano	44
Figura 5.12	Foto satelital del sector central del acueducto metropolitano.....	45
Figura 5.13	Mapa digital del sector central del acueducto metropolitano.....	46
Figura 5.14	Foto satelital del sector este del acueducto metropolitano.....	47
Figura 5.15	Mapa digital del sector este del acueducto metropolitano.....	48
Figura 5.16	Foto satelital del CCO y sus centros de control secundarios	49
Figura 5.17	Topología de la red del acueducto metropolitano	49

Figura A.4.1	Propiedades del mapa del área metropolitana	71
Figura A.4.2	Mapa digital del área metropolitana.....	72
Figura A.4.3	Parámetros para el modelo Longley - Rice.....	72
Figura A.4.4	Propiedades de las Redes – Parámetros para	73
Figura A.4.5	Ventana de configuración de las estaciones remotas.....	73
Figura A.4.6	Parámetros de los equipos	74
Figura A.4.7	Enlace de Radio con Radio Mobile.....	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Estación remota La Meseta.....	6
Tabla 3.2	Estaciones remotas del cantón de San José	10
Tabla 3.3	Valor de la refractividad en función del clima	14
Tabla.3.4	Valores típicos de la conductividad y permitividad en función del tipo de suelo	15
Tabla 3.5	Características de las antenas Yagi	20
Tabla 3.6	Niveles de referencia para la exposición de la población.....	28
Tabla 3.7	Potencia máxima permitida para emisiones no esenciales	28
Tabla 3.8	Tolerancia de frecuencia y atenuación de emisiones no esenciales	29
Tabla 5.1	Estaciones Remotas del Acueducto Metropolitano	32
Tabla 5.2	Datos de los radio enlaces del sector suroeste	37
Tabla 5.3	Datos de los radio enlaces del sector sur.....	39
Tabla 5.4	Datos de los radio enlaces del sector Norte.....	41
Tabla 5.5	Datos de los radio enlaces del sector noreste.....	44
Tabla 5.6	Datos de los radio enlaces del sector central.....	46
Tabla 5.7	Datos de los radio enlaces sector este.....	48
Tabla 5.8	Datos de los radio enlaces secundarios con el centro de control.....	49
Tabla 6.1	Cálculo de los radio enlaces del acueducto metropolitano.....	52
Tabla A.3.1	Estaciones Remotas del Acueducto Metropolitano.....	63
Tabla A.3.2	Ubicación y altitud de las estaciones remotas del acueducto metropolitano	66
Tabla A.3.3	Telemandos y variables a monitorizar en las estaciones remotas	68
Tabla A.4.1	Parámetros de los equipos	74
Tabla A.4.2	Parámetros utilizados por Radio Mobile	75
Tabla B.1.1	Límites básicos de la ICNIRP	77
Tabla B.1.2	Niveles de referencia ICNIRP (valores eficaces sin perturbaciones) ...	78
Tabla B.1.3	Condiciones de conformidad normal de las instalaciones basadas en los límites ICNIRP para la gama de frecuencias 100 - 400 MHz.....	80

Tabla B.1.4	Condiciones de conformidad normal de las instalaciones basadas en los límites	81
Tabla B.1.5	Tolerancia de frecuencia y atenuación de emisiones no esenciales....	81

Capítulo 1: Introducción

El presente proyecto, se realizó, en el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (en adelante AyA), institución pública cuya misión es suplir y normar todos los aspectos relacionados con los servicios públicos de agua potable y alcantarillado sanitario para toda la población dentro del territorio nacional [1]. A continuación, se dará una breve descripción del acueducto metropolitano y su sistema de control, además, describiremos la solución proyectada del problema existente en las estaciones de telemetría del acueducto.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

El AyA cuenta con el Departamento de Operación y Control en su plantel de la Uruca, el cual se encarga de la operación del Acueducto Metropolitano en funciones como: control de los niveles de los tanques de almacenamiento, interconexiones entre los sectores de abastecimiento, regulación de la producción de las plantas potabilizadoras y las estaciones de bombeo, control de las válvulas, entre otras.

El departamento de Operación y Control, ha dividido el acueducto metropolitano en estaciones remotas, en donde cada estación se encuentra formada por un zona de operación (área de servicio con una densidad de población y consumo promedio), su fuente de abastecimiento principal, fuentes de abastecimiento secundarias y componentes tales como tanques de almacenamiento, medidores de caudal, estaciones de bombeo, tuberías, entre otros, que permitan la distribución del agua en la población.

Con el fin de supervisar el correcto funcionamiento del acueducto el departamento de Operación y Control, implemento un sistema SCADA para monitorizar cada una de las zonas de operación, esto para permitir a los operadores:

1. Visualizar el estado del acueducto
2. Visualizar las alarmas e históricos de operación.
3. Controlar los pozos, válvulas, motores y las bombas.
4. Operar remota o automáticamente los elementos
5. Monitorizar los niveles de los tanques, caudales, variables eléctricas, entre otros.
6. Registrar los datos de operación para estudio e información.

En la actualidad, se da la monitorización únicamente de los niveles de los tanques y de los caudales, solamente treinta zonas se encuentran incorporadas al sistema, en las restantes se realiza un control local por medio de operadores, lo cual representa un gasto muy grande para la institución.

El problema existente es que el Centro de Control Operacional no cuenta con un estándar del diseño del control remoto para las estaciones del Acueducto del gran área Metropolitana, no se tienen datos exactos de la ubicación geográfica de las estaciones, no existe una topología definida de la red de telemetría ni un estudio de radiación de onda. Esto debido a que al ser el AyA una institución pública con un presupuesto fijo por año asignado por el gobierno de turno, se ha ido agregando paulatinamente al SCADA las estaciones remotas según sean las necesidades y los recursos disponibles, en donde el diseño de las estaciones ha sido implementado por diferentes compañías que han ganado las licitaciones, por lo cual no se cuenta con ningún tipo de estándar.

El funcionamiento no se encuentra documentado, ni se cuenta con un protocolo para la reparación del sistema de control de las estaciones o para su implementación en futuras estaciones remotas, por lo que ante alguna eventual falla o daño permanente de alguno de los componentes de la estación, se pondría en peligro la estabilidad del sistema.

El departamento de Control Operacional planea continuar con el proceso de integración de las diferentes estaciones remotas al Centro de Control Operacional, por lo que es importante contar con un diseño modelo que sea utilizado en las futuras implementaciones.

En síntesis, el Centro de Control Operacional del AyA no cuenta con un estándar para la instalación, configuración y puesta en funcionamiento del sistema de control de las estaciones remotas del acueducto Metropolitano.

1.2 Solución seleccionada

Como primera parte de este proyecto, se visitó las estaciones remotas del acueducto metropolitano con el fin de obtener las coordenadas exactas de cada una de ellas y poder analizar su situación particular.

El departamento de control operacional propuso rediseñar la topología de los enlaces de las estaciones remotas con el centro de control operacional, entendiéndose por rediseñar, abandonar el esquema actual de funcionamiento con el objetivo de mejorar el rendimiento de la red.

Actualmente existe una topología de redes punto a multipunto, en donde el centro de control operacional es el nodo central que se conecta con todos los puntos remotos, se sugirió, localizar diferentes puntos claves en el área metropolitana que funcionen como centros de control secundarios y que éstos se comuniquen con el centro de control operacional ubicado en la Uruca.

El departamento de control operacional propuso realizar un estudio de propagación de onda de las estaciones remotas del acueducto metropolitano, con el objetivo de realizar un presupuesto de los enlaces, que garanticen la calidad en la transmisión de la información. Además, en algunas estaciones existe una infraestructura de equipo de Telemetría en la banda de UHF, 450-470 MHz con su respectiva antena y cable, lo cual se pretende utilizar en la implementación de las estaciones remotas. Por tal motivo, lo recomendable es realizar el estudio con dichos parámetros, que servirán como un mínimo a cumplir en futuras implementaciones.

Se debe contar con un sistema de transmisión de datos y recepción de telemandos en la frecuencia de 458.8 MHz, asignada para tal efecto al AyA por la Oficina Nacional de Control de Radio.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

La finalidad del proyecto es lograr que el Centro de Control Operacional pueda integrar las estaciones remotas del acueducto metropolitano a su sistema de SCADA.

2.2 Objetivo General

Rediseñar los enlaces de radiofrecuencia de la red de telemetría del Acueducto Metropolitano.

2.3 Objetivos Específicos

- Evaluar la situación actual de la red de telemetría del Acueducto Metropolitano.
- Ubicar geográficamente cada una de las estaciones remotas del acueducto metropolitano.
- Rediseñar la topología de la Red de los enlaces. Incluyendo posibles repetidoras.
- Realizar el cálculo de los radio enlaces mediante la utilización de un *software* especializado.

Capítulo 3: Marco Teórico

En el siguiente capítulo se presenta una descripción detallada del acueducto metropolitano y todos sus componentes, además, se describen modelos digitales del terreno, el modelo de propagación utilizado por el software de simulación, los principios básicos de las antenas a utilizar y las pérdidas de la señal.

3.1 Descripción del Acueducto Metropolitano

Con el objetivo de suministrar agua potable para consumo humano, el Aya cuenta con el acueducto metropolitano. En el plantel de la Uruca, se encuentra el Centro de Control Operacional, el cual cuenta con un sistema SCADA que permite supervisar y controlar las estaciones remotas del acueducto por medio de telemetría y la realización de telemandos.

El acueducto ha sido dividido en estaciones remotas, por ejemplo la estación remota la Meseta, la resumimos en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Estación remota La Meseta

Estación Remota	La Meseta
Cantón	San Pablo
Ubicación	Latitud : 10°0'16 Norte Longitud : 84° 5'38 Oeste
Fuente de abastecimiento principal	Pozos San Pablo
Fuente de abastecimiento secundaria	Pozo la Meseta
Componentes	Tanque la Meseta Capacidad: 501 m ³
	Bombeo San Pablo Cantidad de Bombas : Dos
Zona de operación	San Pablo Alta

A continuación se muestra un diagrama esquemático de la estación y una foto satelital de la misma tomada de Google Earth.



Figura 3.1 Diagrama esquemático de la Estación Remota La Meseta



Figura 3.2 Foto Satelital de la Estación Remota La Meseta

3.1.1 Área del proyecto

El acueducto metropolitano se encuentra ubicado en la gran área metropolitana, que incluye cantones de la provincia de San José, Cartago y Heredia.

El área, limita al este con Vázquez de Coronado, al sur con Aserrí, al norte con San Pablo de Heredia y al oeste con el cantón de Mora.

A continuación, mostramos los cantones en los cuales opera el acueducto:

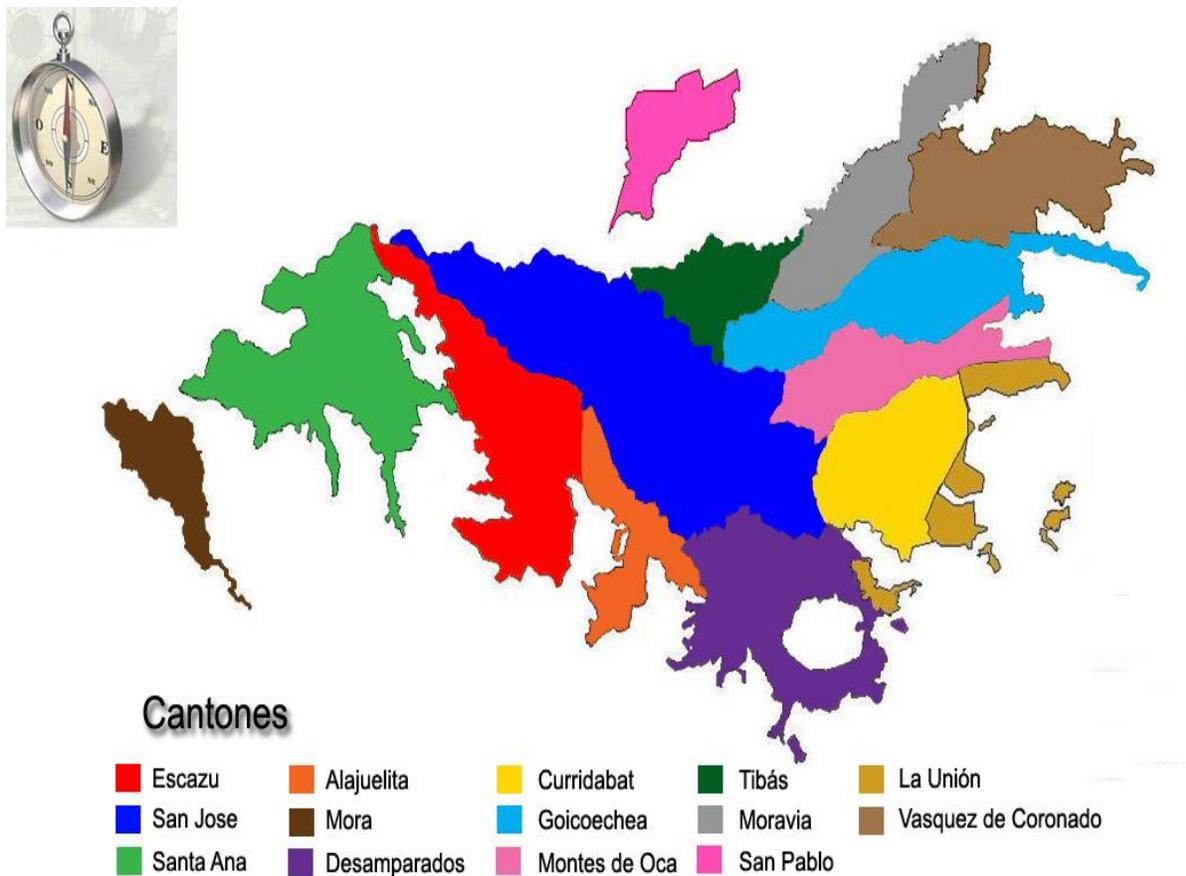


Figura 3.3 Cantones del Acueducto Metropolitano

Clima del Área Metropolitana

Al estar ubicado nuestro país entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, se caracteriza por su clima tropical, específicamente en nuestra área del proyecto (el área metropolitana) se experimenta un clima templado con una temperatura promedio de 23 grados Celsius. En las montañas la temperatura promedio son los 13 grados.

3.1.2 Estaciones Remotas

El acueducto metropolitano, actualmente se encuentra formado por 66 estaciones remotas. Los componentes básicos que componen a las estaciones son los siguientes:

1. Fuentes de abastecimiento

Son las que producen el agua potable, estas son de tres tipos:

- a) Pozo: Túnel perforado en la tierra hasta alcanzar una reserva de agua.
- b) Manantial: Es una naciente de agua que brota de la tierra o de las rocas.
- c) Plantas potabilizadoras: Procesa el agua superficial de un río para hacerla segura para el consumo humano.

2. Bombeo

Los sistemas de bombeo se utilizan para dirigir el caudal de las fuentes de abastecimiento a los tanques y a las zonas de operación altas en donde el agua no pueda viajar por la gravedad.

3. Tanques

Ayudan al abastecimiento de las zonas de operación y sirven como una reserva para cuando la demanda de agua es alta, en donde el caudal de entrada es menor que el caudal de salida.

4. Electroválvulas

Ubicadas en puntos estratégicos, regula el paso del caudal para obtener una presión de salida adecuada.

En el anexo número tres enumeramos cada una de las estaciones remotas, su ubicación y sus principales componentes. Por ejemplo, observemos las tres estaciones ubicadas en el cantón de San José.

Tabla 3.2 Estaciones remotas del cantón de San José

Ubicación		Estación Remota	Componentes	
Cantón	Distrito		#	Elemento
San José	Pavas	1.Pavas	1	Tanque
			1	Válvula
		2.Psiquiátrico	1	Tanque
	Hospital	3.Tanques del Sur	2	Tanque
	La Uruca	4.Chautelle	1	Válvula de corte

3.2 Descripción de los parámetros y componentes electrónicos utilizados por el software de simulación de los radio enlaces

3.2.1 Modelos Digitales del terreno

Para los cálculos de cobertura del presente proyecto, se creó un perfil geográfico de la zona de trabajo con la utilización de los modelos digitales del terreno.

Los modelos digitales del terreno son un conjunto de datos que describen la distribución espacial del terreno en un formato accesible para las computadoras. Se detalla la topografía del terreno por medio de su latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar.

El modelo utilizado en nuestra zona de trabajo fue el SRTM-DTED (*Shuttle Radar Topography Mission – Digital Terrain Elevation Data*) [2], el cual fue desarrollado por la NASA en el año 2000 y es de utilización totalmente libre. Dicha misión permitió generar mapas topográficos digitales de la tierra por medio de antenas de radar, cuya resolución es de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 metros) para nuestro país.

El modelo SRTM-DTED distribuye sus datos en ficheros que se ven representados por medio de cuadrículas. Dicho ordenamiento se presenta en la figura 3.4

Para facilitar la localización de los datos, las cuadrículas se dividieron en áreas de trabajo, siendo para nuestro país el área número 44. Los ficheros son de extensión .hgt y utilizan la nomenclatura “NxxWyyy.hgt”, en donde cada una de las variables representan lo siguiente:

N : norte
xx : latitud
W: oeste
yyy: Longitud

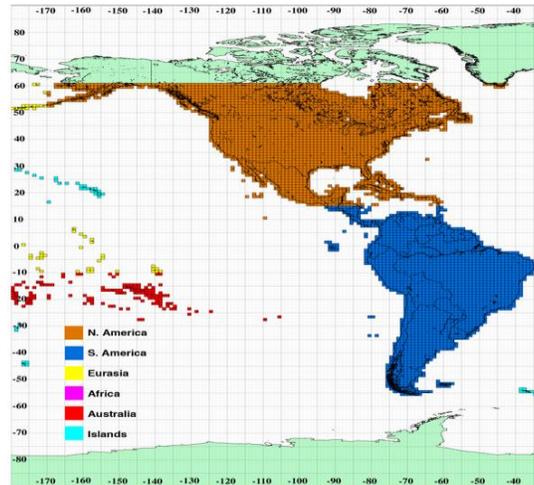


Figura 3.4 Distribución de los datos del modelo SRTM-DTED

Los ficheros correspondientes a nuestro país son N08W083.hgt, N08W084.hgt, N09W083.hgt, N09W084.hgt, N09W085.hgt, N09W086.hgt, N10W084.hgt, N10W085.hgt, N10W086.hgt, N11W084.hgt, N11W085.hgt y N11W086.hgt.

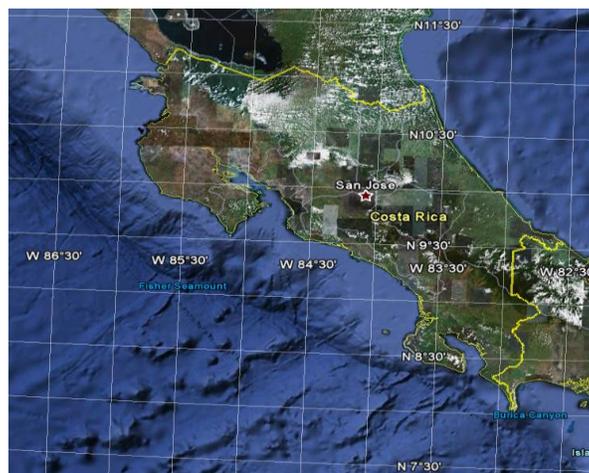


Figura 3.5 Coordenadas geográficas de Costa Rica

3.2.2 Modelo de Propagación Longley-Rice

El objetivo de un modelo de propagación electromagnética es el predecir las pérdidas de la onda electromagnética en el viaje desde el transmisor al receptor, esto con el objetivo de determinar un nivel de recepción óptimo que garantice la calidad del servicio en el enlace.

El modelo de Longley-Rice es un método probabilística de propósito general utilizado para sistemas punto a punto en un rango de frecuencias de 20MHz a 20GHz y distancias de 1 km a 2000 km, considera diferentes tipos de terrenos como zonas rurales, urbanas, montañosas, espacios libres, entre otras.

Como resultado, obtenemos el valor medio de la atenuación de la señal emitida en función de la distancia y el cambio de la señal en el tiempo y el espacio.

3.2.2.1 Parámetros del modelo

a) Frecuencia

Frecuencia de la portadora de la señal transmitida, generalmente se define un ancho de banda. El rango de las frecuencias de trabajo se encuentra en el intervalo de 20 MHz a 20 GHz

b) Distancia

Distancia entre dos terminales.

c) Altura

Altura de las antenas sobre el nivel del terreno

d) Clima:

Se trabaja con siete diferentes tipos de clima que actualmente son los reconocidos, con el tipo de clima y la refractividad de la superficie se puede caracterizar la atmósfera y sus cambios en el tiempo. Los diferentes tipos de climas se indican en la tabla 3.3

e) Refractividad

La refractividad determina la curvatura de las ondas de radio conforme viajan del transmisor al receptor, esta curvatura varia de acuerdo a diferentes parámetros tales como la presión, humedad, altura, temperatura, entre otros. En general, el promedio de la refractividad, decrece con la altitud, por lo que su valor máximo será a nivel del mar.

La refractividad puede cuantificarse con la curvatura específica de la tierra, típicamente $4/3$ (1.333) bajo una atmósfera en condiciones estándar, 1.23 en áreas elevadas y 1.77 nivel del mar. El valor de la refractividad, típicamente se encuentra en el intervalo de 250 a 400 unidades de n. En condiciones estándar la refractividad tiene un valor aproximado de 301 n-unidades (partes por millón).

Los valores de refractividad sugeridos en función del clima, se resumen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valor de la refractividad en función del clima

Clima	Refractividad (n-unidades)
Desierto	280
Continental templado	301
Continente subtropical	320
Marítimo templado, sobre la tierra	320
Marítimo templado, sobre el mar	350
Ecuatorial	360
Marítimo subtropical	370

El efecto de curvatura en las ondas, las hacen alejarse de la superficie terrestre permitiendo los enlaces con línea de vista.

f) Permitividad

Es la medida de la capacidad de un material a ser polarizado por un campo eléctrico. Es un número adimensional y característico del medio.

g) Conductividad

La conductividad, eléctrica para nuestro caso, es la capacidad de un cuerpo o medio de conducir la corriente eléctrica. Las unidades de la conductividad son S/m (Siemens por metro) y ésta es función del tipo de terreno y de la frecuencia de trabajo. Los valores típicos se presentan a continuación:

Tabla.3.4 Valores típicos de la conductividad y permitividad en función del tipo de suelo

Tipo de suelo	Conductividad (S/m)	Permitividad
Tierra pobre	0.001	4
Tierra media	0.005	15
Tierra rica	0.020	25
Agua dulce	0.010	81
Agua de mar	5	81

h) Irregularidad del terreno (Δh)

Es una variable aleatoria y caracteriza la irregularidad del terreno entre en el receptor y transmisor, específicamente la altura promedio de las irregularidades del terreno.

i) Polarización:

Puede ser horizontal o vertical, los enlaces de radio UHF, generalmente utilizan la polarización vertical sobre la horizontal, esto a que generalmente se presenta una menor atenuación en los enlaces sobre la superficie terrestre.

3.2.2.2 Funcionamiento del modelo

El modelo realiza estimaciones geométricas sobre el camino de la propagación con los parámetros de entrada definidos, determinando así una atenuación media en el espacio libre como función de la distancia.

Básicamente, la onda se propaga en tres regiones, línea de vista, dispersión y propagación. En la región línea de vista se da una propagación directa de las ondas entre las terminales, la señal no se ve afectada por la curvatura de la tierra, es atenuada por obstáculos como edificios, montañas, etc.

La atenuación media es una función lineal y logarítmica de las distancia. En la región de difracción se da una atenuación más pronunciada mientras que en la región de dispersión es poca la pérdida.

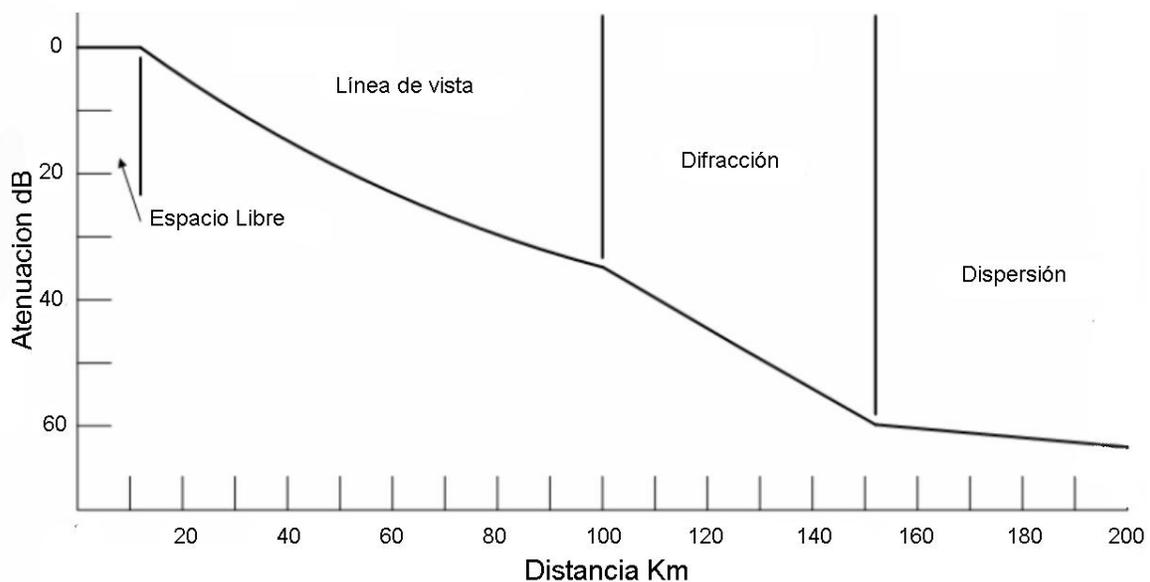


Figura 3.6 Modelo Longley – Rice, atenuación vrs distancia

3.2.3 Antenas

Dispositivo conductor metálico utilizado para transmitir o recibir ondas electromagnéticas. En la comunicación las antenas transforman la energía eléctrica en ondas electromagnéticas y viceversa, lo cual permite la transmisión en el espacio libre.

3.2.3.1 Parámetros de las antenas

a) Diagrama de Radiación

Es una representación gráfica de la potencia de la señal transmitida en función de los ángulos de azimut y elevación. De acuerdo al diagrama de radiación, podemos clasificar a las antenas; por ejemplo una antena omnidireccional o isotrópica es una antena que irradia energía en todas las direcciones por igual, las antenas que transmiten en una sola dirección se les denomina antenas direccionales.

b) Ganancia

Es la intensidad de radiación producida por una antena en una determinada dirección en relación a la radiación producida por una antena isotrópica.

Sus unidades son dBd o dBi, dependiendo si se utiliza como patrón un dipolo de media onda o un dipolo isotrópico.

c) Polarización

Es la orientación del campo eléctrico emitido por la antena en el tiempo, por lo general, en un enlace las antenas utilizan la misma polarización. Una antena

puede polarizarse en forma lineal, por lo general horizontal y vertical, en forma elíptica o en forma circular.

d) Eficiencia

Es la relación de la potencia radiada y la potencia entregada a la antena. Es un parámetro adimensional.

$$\varepsilon = \frac{P_{radiada}}{P_{entrada}} \quad (3.1)$$

e) Impedancia

Es la relación entre la tensión y la corriente en las terminales de entrada. Es un número complejo, la parte real es la resistencia y la imaginaria la reactancia.

$$Z = \frac{V_i}{I_i} = R_a + jX_a \quad (3.2)$$

f) Directividad

Es la relación de la intensidad de radiación en una dirección y la intensidad de radiación de una antena isotrópica con la misma potencia y a la misma distancia.

3.2.3.2 Antena Yagi

La antena Yagi es una antena direccional, que lleva su nombre en honor de los científicos japoneses que la inventaron, el Dr. Hidetsugu Yagi y el Dr. Shintaro Uda.

Básicamente consiste en un conjunto de elementos lineales paralelos. Un dipolo es alimentado por la línea de transmisión combinado con elementos parásitos llamados director y uno o varios reflectores.

En la figura 3.7 se muestra la configuración de la antena Yagi, que consta de un elemento excitado que es un dipolo de media onda, otro llamado reflector un poco más largo que media longitud de onda (5 % mayor que el dipolo) y uno o más directores, cuya longitud es menor a la del elemento energizado. La longitud de los directores por lo general son distintas, la separación entre estos también por lo general es diferente, suelen ser 0.1 a 0.2 longitudes de onda.

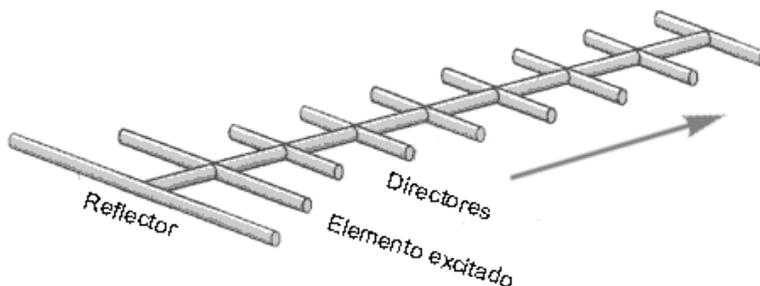


Figura.3.7 Configuración de una antena Yagi-Uda

La figura 3.8 muestra la gráfica de radiación de una antena Yagi, su directividad típica es de 6 a 9 dB y su impedancia es de 75 Ω .

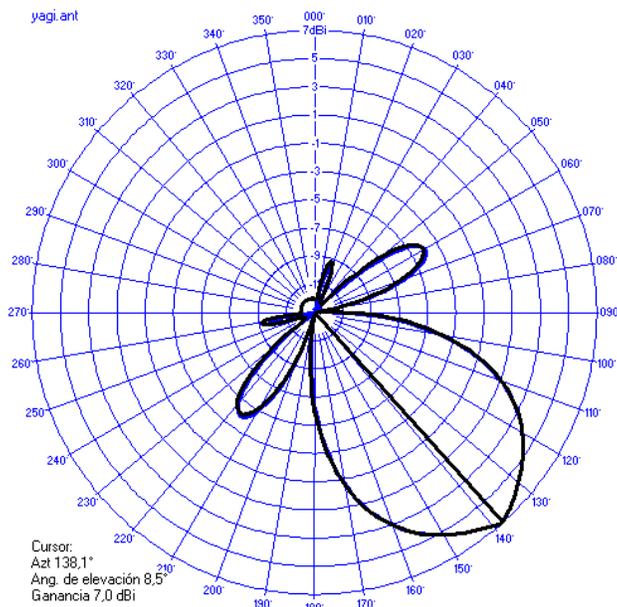


Figura.3.8 Diagrama de radiación de una antena Yagi-Uda

Una antena Yagi aumenta su ganancia con la incorporación de elementos parásitos. En la actualidad existen muchos modelos en el mercado gracias a los fabricantes, a continuación resumimos en la siguiente tabla algunos modelos:

Tabla 3.5 Características de las antenas Yagi

Tipo de Antena	Ganancia [dB]
Dipolo + Reflector + 1 director	5.5
Dipolo + Reflector + 2 director	6
Dipolo + Reflector + 4 director	8.5

3.2.3.3 Antena Omnidireccional

Una antena omnidireccional o isotrópica es una antena que irradia energía en todas las direcciones por igual por lo que su gráfica de radiación sería una esfera. En la realidad, una antena omnidireccional irradia energía por igual en el plano de interés, por lo general el plano horizontal.

Dicha antenas son muy utilizadas en estaciones bases donde se requiere una cobertura en todas las direcciones. Por ejemplo, en los enlaces punto a multipunto se suele utilizar una antena omnidireccional en combinación con antenas direccional.



Figura.3.9 Antena Omni-Direccional

Las antenas de este tipo más populares son la del dipolo de media onda y la de Marconi. En las implementaciones se prefieren los arreglos de dipolos.

La ganancia típica de este tipo de antenas es de 8 dBi a 12 dBi y son muy utilizadas en coberturas de hasta 5 kilómetros. Este tipo de antenas no logran un enlace con los clientes que estén sobre o por debajo de ésta.

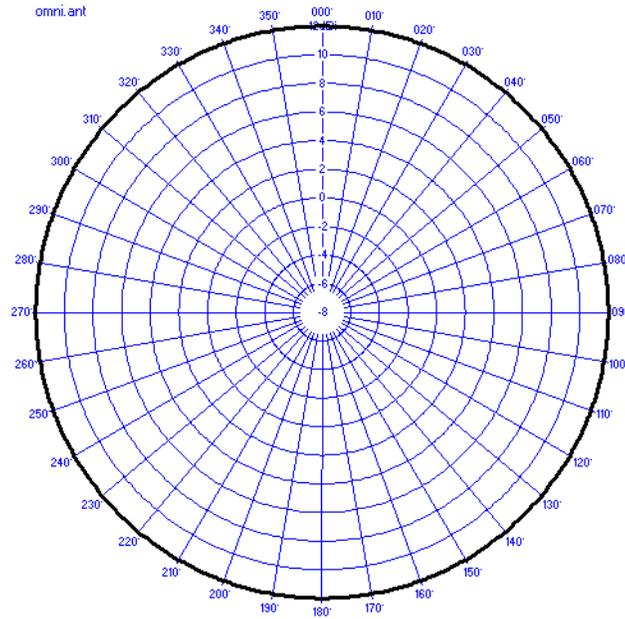


Figura.3.10 Diagrama de radiación de una antena Omni-Direccional

3.2.4 Zonas de Fresnel

Las zonas de Fresnel son elipsoides que rodean la trayectoria entre el enlace del transmisor y el receptor, comúnmente se busca que la línea de vista entre estos dos no este bloqueada por ningún tipo de obstáculo. Además, debido a la expansión de las ondas al viajar en el espacio libre, la zona de Fresnel, es una zona de despeje adicional que hay que tener en consideración en este tipo de enlaces. Como mínimo se debe de garantizar el 60 % de despeje de la primera zona de Fresnel para evitar que la señal sea atenuada por algún tipo de obstáculo, esto debido a que esta contiene la mayor cantidad de potencia destinada para el receptor.

La ecuación para calcular la primera zona de Fresnel, se muestra a continuación:

$$r_f1 = 17,32 \sqrt{\frac{(d1 \times d2)}{fxd}} \quad (3.3)$$

donde:

r_{f1} : radio de la primera zona de Fresnel en kilómetros

d_1 : distancia desde el transmisor al obstáculo en kilómetros

d_2 : distancia desde el obstáculo al receptor en kilómetros

f : frecuencia de operación en MHz

d : distancia total del enlace en kilómetros

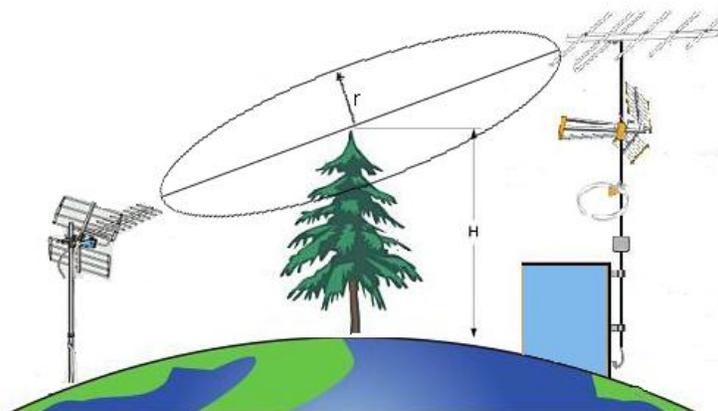


Figura 3.11 Primera Zona de Fresnel

3.2.5 Pérdidas

Perdidas por el espacio libre

Se define como las pérdidas cuando una onda electromagnética es transmitida en el espacio libre. Es una dispersión de la señal conforme se aleja del transmisor, por cual muchas veces es llamada pérdidas por dispersión.

Esta atenuación puede definirse como la relación entre la potencia isotrópica recibida y la potencia isotrópica radiada.

$$\alpha_{FSL} = \frac{P_{ISO}}{P_{RAD}} = \frac{1}{r^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (3.4)$$

Si expresamos la ecuación en decibeles:

$$20\log(r) + 20\log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \text{ [dB]} \quad (3.5)$$

Sustituyendo $\lambda = \frac{c}{f}$ y sabiendo que $c=3 \times 10^8$ m/s y que f es la frecuencia, podemos despejar la siguiente ecuación:

$$L_{FSL} = 92.45 + 20\log(r) + 20\log(f) \quad (3.6)$$

en donde:

L_{FSL} = Pérdidas en el espacio libre

r = Distancia desde la antena transmisora en kilómetros

f = Frecuencia de transmisión en GigaHertz

Pérdidas producidas por la lluvia

Las comunicaciones se pueden ver afectadas por la lluvia, esto debido a que cuando una señal atraviesa una zona con lluvia se da una absorción de energía por parte de las gotas, reduciendo la potencia de la señal. Este efecto depende de la intensidad de la precipitación y la banda de frecuencia en la que nos encontremos trabajando.

Según las recomendaciones de la UIT-R (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sección Radiocomunicaciones) las pérdidas debido a la lluvia pueden despreciarse para frecuencia menores a los 5 GHz. [3]

Pérdidas de la línea

Las pérdidas en la línea de transmisión son las introducidas por los cables, filtros, osciladores, conectores, entre otros. Independientemente de lo bueno que sea nuestro equipo, siempre introducirán algún tipo de pérdida.

La pérdida de la potencia de la señal en los cables no es un valor lineal, ya que crece proporcionalmente a la frecuencia. Suele venir expresado en dB/m. Por ejemplo, en un cable coaxial las pérdidas típicas se encuentran entre 0,1 dB/m a 1 dB/m. Los fabricantes en la hoja de datos suelen proporcionar una gráfica de la atenuación versus la frecuencia.

En cuanto a los conectores, depende mucho de la calidad, pero por lo general varían de 0,1 dB a 0,5 dB.

3.2.6 Margen de desvanecimiento

Al propagarse una onda electromagnética, va a tener pérdidas debido a diferentes factores como por ejemplo meteorológicos, irregularidades del terreno que provoca reflexiones de la señal, falla parcial de los equipos, entre otros. El desvanecimiento es la reducción de la intensidad de la señal.

Cualquier radio enlace, debe tomar en cuenta el desvanecimiento, y por lo general, en la ecuación de ganancia del sistema se incluye un ganancia adicional llamada margen de desvanecimiento, lo cual permite una mayor confiabilidad en el sistema.

El margen de desvanecimiento se calcula mediante la ecuación de confiabilidad de Barnett – Vignat:

$$M = 30 \log(d) - 10 \log(abf) - 10 \log(1 - r) - 70 \quad (3.7)$$

d: distancia en kilómetros

f: frecuencia en Gigahertz

a: factor de rugosidad

4 sobre agua o llanuras

1 sobre terreno promedio

0.25 terreno montañoso

B: factor del clima

0.5 áreas calientes o húmedas

0.25 áreas continental promedio

0.125 áreas secas o montañosas

R: confiabilidad porcentual

El margen de desvanecimiento se puede obtener aumentando la ganancia de la antena, mejorando la sensibilidad del receptor o incrementado la potencia del transmisor.

3.2.7 EIRP

EIRP, “*equivalent isotropically radiated power*”, traducido como potencia radiada isótropa equivalente. La EIRP es la suma de la potencia suministrada a la antena y la máxima ganancia de la antena con relación a una antena isotrópica menos la pérdida en los cables y los conectores.

EIRP es equivalente a PIRE (Potencia Isotrópica Irradiada Efectiva). El EIRP describe la capacidad de radiación de potencia del transmisor y su antena.

El límite legal de la energía irradiada (EIRP) dependerá de la legislación de cada país. En el apéndice número 1, se detalla la normativa costarricense en cuanto a los límites permitidos.

3.2.8 Torres para telecomunicaciones

Con el fin de facilitar el montaje de las antenas, estas son instaladas sobre mástiles o torres que permiten asegurar la orientación y su estabilidad. Su instalación se da sobre una base horizontal, generalmente el suelo o el techo de algún edificio.

Las torres por lo general son de acero galvanizado con alturas de unos cuantos metros hasta más de 55. Suelen pintarse de color blanco y rojo. Las torres con una altura superior a los 45 metros deberán contar con una señalización luminosa nocturna.

Para lograr fijar las torres y minimizar los efectos del viento y otros agentes meteorológicos, se utiliza elementos como garras, bases y los anclajes

Los anclajes son cables de acero que sujetan a la torre evitando alguna caída por el efecto del viento. La instalación de los anclajes dependerá de la altura de la torre, para alturas inferiores a los 35 metros se colocan 3 separados por 120° , para superiores a los 35 metros lo recomendable es colocar 6 anclajes separados por 60° .

3.2.9 Normativa Costarricense

El gobierno de la república de Costa Rica, regula el uso del espectro radioeléctrico por medio de decretos, los dos más importantes son:

- 1) Decreto N° 36324-S: “Reglamento para regular la exposición a campos electromagnéticos de radiaciones no ionizantes, emitidos por sistemas inalámbricos con frecuencias de hasta 300 GHz”.

2) Decreto N° 35257-MINAET Modificado por decreto N° 35866-MINAET “Plan nacional de atribución de frecuencias”.

Los objetivos de cada decreto y sus principales artículos se encuentran en el Anexo 1. Los reglamentos son de aplicación obligatoria en el territorio nacional incluido su mar territorial y su espacio aéreo.

Para nuestro caso de estudio (458.8 MHz), en las tablas 3.6, 3.7 y 3.8 se resumen los límites permitidos a exposición de la población, potencia de emisión y frecuencia y atenuación.

Tabla 3.6 Niveles de referencia para la exposición de la población

Frecuencia (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm ⁻¹)	Intensidad de campo magnético (Am ⁻¹)	Densidad de potencia (Wm ⁻²)
458.8	29.452	0,156363	2.294

Tabla 3.7 Potencia máxima permitida para emisiones no esenciales

Banda de frecuencias	Niveles aplicados a los transmisores
235 MHz a 960 MHz	40 dB
Potencia media superior a 25 W	0.025 mW

Tabla 3.8 Tolerancia de frecuencia y atenuación de emisiones no esenciales

Banda: 100 MHz a 470 MHz	
Estaciones fijas	
- potencia de 50 W o menor	20 ppm
- potencia superior a 50 W	10 ppm
Estaciones base	
- en la banda 100 MHz – 235 MHz	15 ppm
- en la banda 236 MHz – 401 MHz	7 ppm
- en la banda 402 MHz – 470 MHz	5 ppm

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para el reconocimiento del problema, se procedió a visitar las estaciones remotas del acueducto metropolitano con el fin de obtener la información en particular de cada lugar.

El problema se delimito con las indicaciones del asesor de la empresa, en este caso, el director del Centro de Control Operacional. Dicha información se detalla en la sección 1.2 del presente documento, titulada: Solución seleccionada.

4.2 Obtención y análisis de información

La principal fuente de información fueron los trabajadores del Centro de Control Operacional, se realizaron entrevistas a los encargados del control del acueducto, lo cual permitió orientar la finalidad de la investigación. Hubo retroalimentación debido al contacto con los operadores del SCADA y con las personas encargadas del mantenimiento. Además, el encargado de las licitaciones de los trabajos por contratación del centro de control nos brindo información muy útil de las estaciones remotas, como manuales, diseños, licitaciones, programas, prevención, mantenimiento, entre otros.

Para la obtención de la información del marco teórico, se realizaron búsquedas en Internet y se consultaron los libros citados en la bibliografía.

Se realizo una búsqueda de programas especializados en el calculo de los radio enlaces, con el fin de realizar un análisis teórico de los mismos, bajo la premisa, de que en ningún momento tenga el AyA que hacer el pago de algún tipo de licencia.

4.3 Implementación de la Solución

En cuanto a la implementación de la solución, se rediseño teóricamente la red de telemetría del acueducto metropolitano, lo cual permitirá en un futuro, que el acueducto tenga un sistema de control escalable, que independientemente de la empresa que gane el concurso de alguna licitación, se pueda desarrollar los proyectos bajo parámetros ya establecidos.

Los cálculos teóricos de los presupuestos de los enlaces se realizaron con el *software* de simulación de radio enlaces **Radio Mobile**. Este software utiliza perfiles geográficos junto con la información de los equipos. Los cálculos hechos se apegan a la legislación costarricense vigente.

Durante la realización del presente proyecto, se modifico la solución o meta que originalmente se planteo, esto debido al no conocimiento pleno del problema, en general, lo que se realizo fue una delimitación del trabajo, dando como resultado los objetivos planteados en la sección 2.3.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Ubicación de las estaciones

El primer paso del presente proyecto consiste en la ubicación geográfica de cada una de las estaciones remotas existentes del acueducto metropolitano por medio de GPS, determinando sus coordenadas geográficas de latitud y longitud. Posteriormente con los datos de las coordenadas se determinó la altitud en metros por medio de los mapas digitales del terreno, dicha información se encuentra en la tabla A.3.2 del apéndice 3.

Como ejemplo tenemos las siguientes estaciones en la tabla 5.1

Tabla 5.1 Estaciones Remotas del Acueducto Metropolitano

Estación Remota	Ubicación	Coordenadas		Altitud(m)
	Cantón	Latitud	Longitud	
1.Bebedero	Escazú	9°56'23.6	-84°9'44	1610.6
2.Llano Grande	Cartago	9°59'44	-83°54'50	2248,4

5.2 Topología de la red

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados en la actualidad cuenta con un sistema SCADA en su centro de control operacional ubicado en el plantel de la Uruca. Dicho sistema fue desarrollado mediante FactorySuite de Wonderware.

Actualmente, solamente se encuentran incorporadas al sistema treinta estaciones remotas de la red de telemetría, en las restantes se realiza un control y monitoreo local por medio de operadores.

La topología de la red es punto a multipunto, en donde el Centro de Control Operacional es el nodo central que se conecta con todas la estaciones remotas.

Bajo esta topología actual, hay estaciones remotas que se encuentra a gran distancia del centro de control y hay otras estaciones que no tienen línea visual debido al relieve de nuestra área metropolitana, que presenta muchos obstáculos como las montañas y árboles.

Por ejemplo, la estación remota pozo de Brasil ubicada en Piedades de Santa Ana, se encuentra a 14.15 Km del Centro de Control Operacional de la Uruca y debido a las elevaciones del terreno no hay línea de vista en el enlace; por lo que bajo la base de la topología actual el enlace no sería posible. A continuación mostramos una foto satelital del enlace y su perfil topográfico.



Figura 5.1 Foto satelital del enlace entre el CCO y Pozo de Brasil

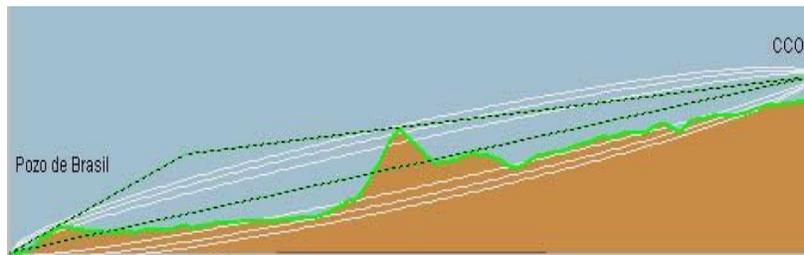


Figura 5.2 Perfil topográfico del enlace entre el CCO y Pozo de Brasil

En nuestro diseño, la red será de punto a multipunto, en donde existirá un nodo central, que en nuestro caso el centro de control operacional, que se conectará con varios centros de control secundarios, estos centros de control secundarios se conectaran con las estaciones remotas y viceversa con antenas altamente direccionales en las estaciones remotas y antenas omnidireccionales en los centros de control.

La selección de los nodos secundarios, será un paso importante para dar inicio a la planificación de la red de telemetría del acueducto por parte del centro de control.

Para la selección de los nodos secundarios es necesario tomar en cuenta datos como la infraestructura del lugar, la elevación del terreno y la ruta del agua desde sus fuentes de abastecimiento principal y secundarias pasando por elementos secundarios hasta la distribución en la población.

Los nodos secundarios tendrán enlace con estaciones remotas cercanas y que en algunos casos podrían compartir una misma fuente de abastecimiento principal o que lleven el agua a zonas de operación en común. Por lo que ante alguna eventual falla del Centro de Control Operacional o el desabastecimiento de algunas de las zonas, se podrían realizar maniobras operativas en los centros de control secundarios.

Para tener una adecuada visualización de la topología de red propuesta, observemos la figura 5.3

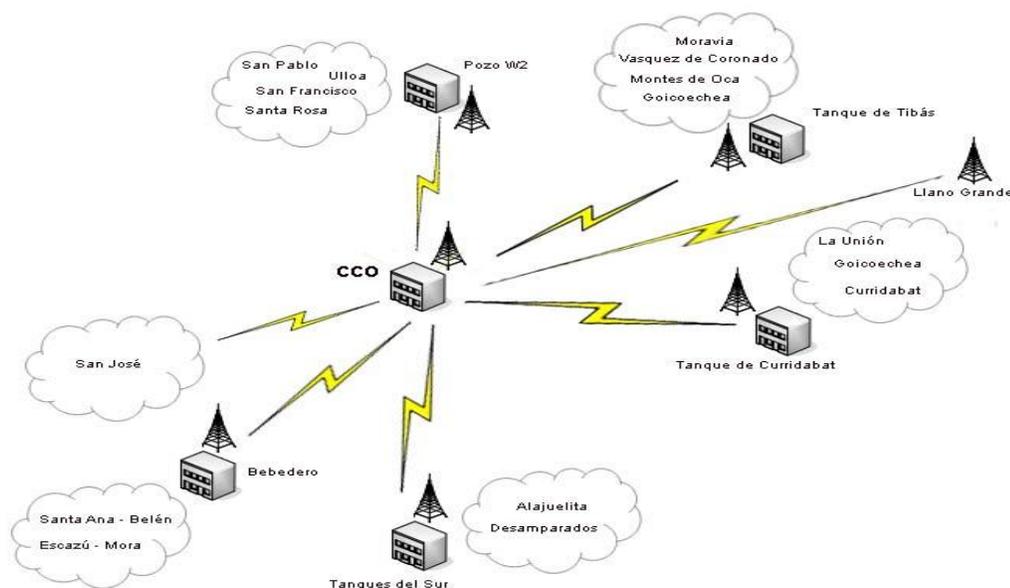


Figura 5.3 Topología propuesta

5.2.1 Sector Suroeste

El sector suroeste se encuentra comprendido por los cantones de Santa Ana, Escazú, Belén y Mora. Las estaciones remotas dentro de este sector son 11, las cuales son las siguientes:

1. Pozo Brasil
2. Piedades
3. Zoológico
4. Booster Matra
5. Bombeo Potrerillos
6. Guachipelín
7. Tanque Bello horizonte
8. Bombeo Escazú
9. Plantel Salitral
10. Tanque Honduras
11. Bombeo Puente de Mulas

La geomorfología de estos cantones son montañas con fuertes pendientes, por ejemplo el límite entre Santa Ana y Escazú, formado por el Macizo de Escazú y el Alto de las Palomas. Dichas montañas, son obstáculos que pueden bloquear la señal.

Dichos obstáculos los podemos usar como un activo y colocaremos nuestro nodo de control secundario en el cerro de Bebedero ubicado a más de 1600 metros sobre el nivel del mar en el cantón de Escazú al pie del Monte Tapezco. Sus coordenadas geográficas son latitud $9^{\circ}54'23.6$ y longitud $-84^{\circ} 9'44$.

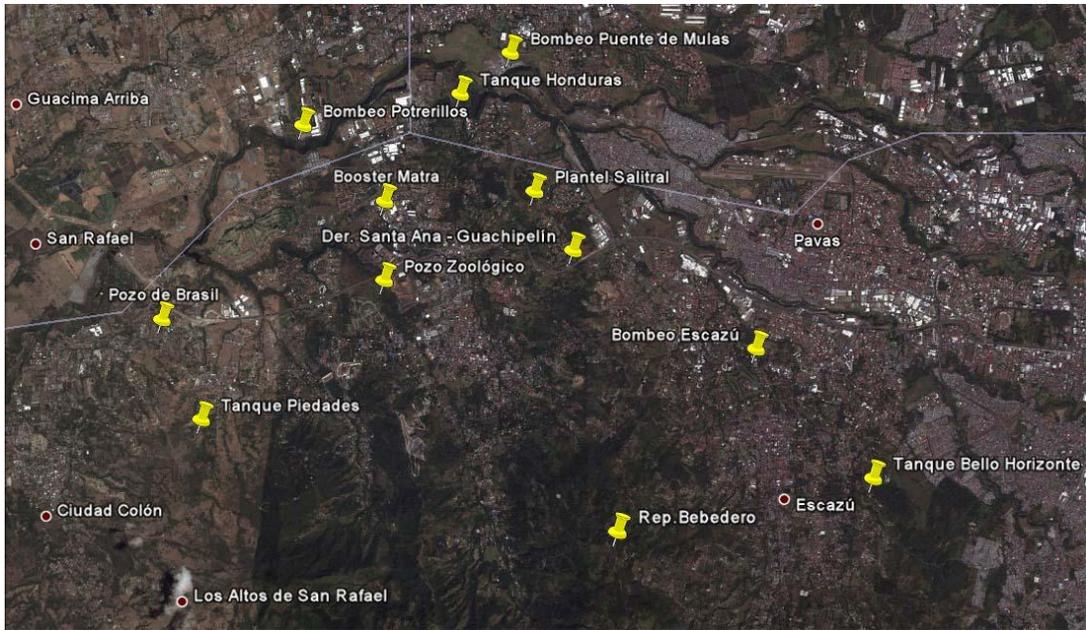


Figura 5.4 Foto satelital del sector Suroeste del acueducto metropolitano

Mediante el siguiente mapa digital observemos los datos de elevación del terreno, que se representan por medio de un código de colores cuya escala se indica en la parte superior izquierda del mapa

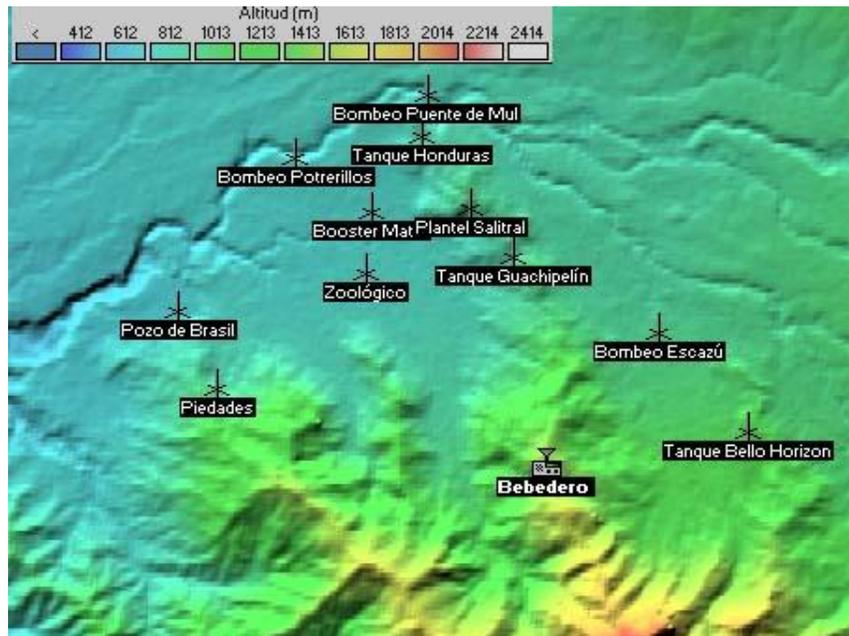


Figura 5.5 Mapa digital del sector Suroeste del acueducto metropolitano

Tabla 5.2 Datos de los radio enlaces del sector suroeste

Enlace		Distancia (km)	Azimet(°)	Elevación(°)
Pozo Brasil	Bebedero	7.55	113.8	6.110
Piedades		6.52	104.1	5.975
Zoológico		5.22	138.1	8.490
Booster Matra		6.09	146.4	7.402
Bombeo Potrerillos		7.83	141.8	6.205
Tanque Guachipelín		4.61	171.3	8.629
Tanque Bello horizonte		3.91	259.5	6.005
Bombeo Escazú		3.43	218.3	9.909
Plantel Salitral		5.38	164	6.455
Tanque Honduras		7.03	160.1	5.670
Bombeo Puente de Mulas		7.75	162.7	5.529

5.2.2 Sector Sur

El sector sur se encuentra comprendido por los cantones de Alajuelita y Desamparados. Las estaciones remotas dentro de este sector son 7, las cuales son las siguientes:

1. Planta de Alajuelita
2. Calle Nueva
3. Tanque de Higuito
4. Tanque San Miguel
5. Tanque la Pelota
6. Planta San Juan de Dios
7. Tanques del Sur

En cuanto a la geomorfología de estos cantones, podemos acotar lo siguiente, el cantón de Alajuelita presenta lomas de pendientes muy suaves y laderas con mayor pendiente hacia el este del cantón. Muy pocos espacios planos en el cantón. Las elevaciones van desde los 1100 metros hasta los 1400 en el distrito de San Antonio.

El cantón de Desamparados en su mayor parte es una superficie plana ondulada, presenta laderas con fuertes pendientes al sur del cantón y al suroeste del cantón se presentan grandes espacios de terreno plano. Las elevación van

desde los 1160 metros del centro de Desamparados hasta los 1700 metros del distrito San Cristóbal Norte. En la figura 5.7 se detallan los datos de elevación del terreno.

Nuestro nodo de control secundario de la zona sur se ubicará en la estación remota llamada Tanques del Sur. En la figura 5.6 una foto satelital para observar la topología del sector sur del acueducto.



Figura 5.6 Foto satelital del sector Sur del acueducto metropolitano

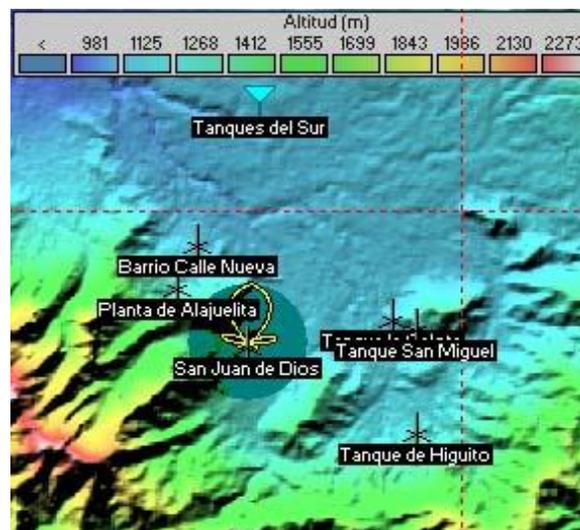


Figura 5.7 Mapa digital del sector Sur del acueducto metropolitano

Tabla 5.3 Datos de los radio enlaces del sector sur

Enlace		Distancia (km)	Azimut(°)	Elevación(°)
Planta de Alajuelita	Tanques del Sur	5,11	23,81	-1,264
Calle Nueva		3,92	23,34	0,195
Tanque de Higuito		9,28	335,01	-0,668
Tanque San Miguel		6,96	325,70	-1,271
Tanque la Pelota		6,40	328,83	-0,414
Planta San Juan de Dios		6,20	2,78	-1,126

5.2.3 Sector Norte

El sector norte se encuentra comprendido por los cantones de San Pablo, Ulloa, San Francisco y Santa Rosa. Las estaciones remotas dentro de este sector son 18, las cuales son las siguientes:

1. Tanque San Pablo
2. Pozo Rincón Ricardo 1
3. Pozo Rincón Ricardo 2
4. Tanque la Meseta
5. Pozo W1
6. Pozo W2
7. Pozo W7
8. Pozo W9
9. Pozo W14
10. Pozo W3
11. Pozo W15
12. Pozo W8
13. Pozo W13
14. Pozo W4
15. Pozo W5
16. Pozo W6
17. Pozo W10
18. Pozo W12

La geomorfología de estos cantones es un relieve plano ondulado, con alturas superiores a los 1000 metros sobre el nivel del mar. En el cantón de San Pablo las alturas son cercanas a los 1200 metros. En la figura 5.9 se observan las elevaciones del terreno.

Nuestro nodo de control secundario de la zona norte se ubicará en la estación remota llamada Pozo W2. En la figura 5.8 una foto satelital que nos muestra la topología del sector norte.



Figura 5.8 Foto satelital del sector Norte del acueducto metropolitano

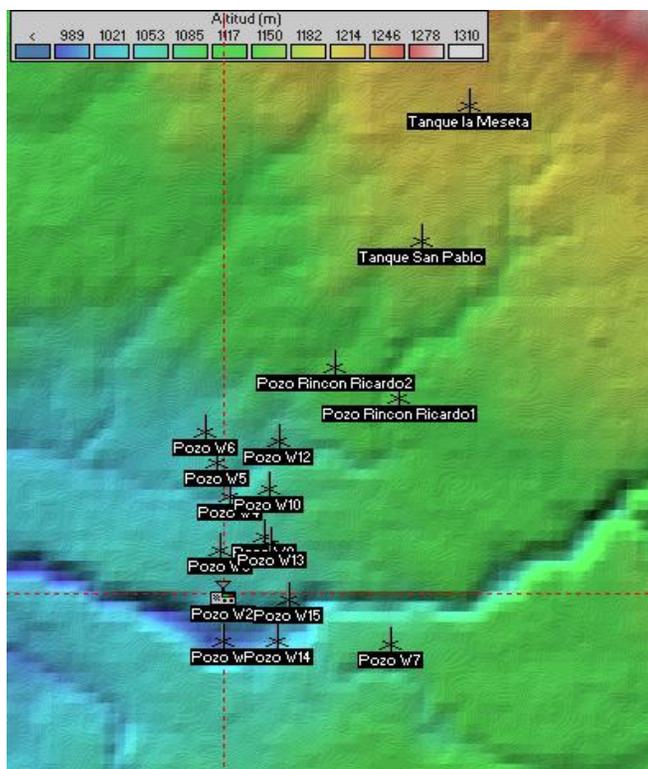


Figura 5.9 Mapa digital del sector Norte del acueducto metropolitano

Tabla 5.4 Datos de los radio enlaces del sector Norte

Enlace		Distancia (km)	Azimut(°)	Elevación(°)
Tanque San Pablo	Pozo W2	3,67	207,6	-1,788
Pozo Rincón Ricardo 1		2,36	219,4	-1,432
Pozo Rincón Ricardo 2		2,31	204,2	-1,181
Tanque la Meseta		4,96	205	-1,829
Pozo W1		0,66	316,7	3,627
Pozo W7		1,49	286,3	0,883
Pozo W9		0,39	0,4	10,816
Pozo W14		0,60	309,8	5,303
Pozo W3		0,44	175,3	1,83
Pozo W15		0,55	271,6	1,874
Pozo W8		0,66	211,5	0,383
Pozo W13		0,64	219,9	0,389
Pozo W4		0,93	183,2	1,054
Pozo W5		1,24	177,1	0,582
Pozo W6		1,52	174,1	0,539
Pozo W10		1,08	201,4	-0,065
Pozo W12	1,51	198	0,001	

5.2.4 Sector Noreste

El sector noreste se encuentra comprendido por los cantones de Moravia, Goicoechea, Montes de Oca y Vázquez de Coronado. Las estaciones remotas dentro de este sector son 16, las cuales son las siguientes:

1. Tanque de Tibás
2. Tanque de San Blas
3. Bombeo la Trinidad
4. Planta los Sitios
5. La Máquina
6. Bombeo Coronado
7. La finca
8. Chiverral
9. Fuente de Coronado
10. Planta de Guadalupe
11. Planta Mata de Plátano
12. Planta los Cuadros
13. Sabanilla
14. Bombeo las Mansiones
15. Fuente Pizotes
16. B. Ipís

En cuanto a la geomorfología de estos cantones, resumimos lo siguiente, la mayor parte del cantón de coronado presenta laderas con todo tipo de pendientes, inclusive superiores a los 30°, la elevación en metros va desde los 1385 hasta los 1510.

El cantón de Moravia, en la zona norte presenta laderas muy variadas, el centro del cantón corresponde a una superficie plana ondulada, las altitudes van desde los 1200 metros hasta cerca de los 1400 metros.

El cantón de Montes de Oca es una superficie plana ondulada, con laderas de todo tipo de pendientes hacia el distrito de Sabanilla, las altitudes rondan desde los 1200 metros hasta los 1350 metros.

El cantón de Goicoechea es muy similar a sus cantones vecinos, en su parte este presenta laderas con todo tipo de pendientes, muy similares a las de coronado y la parte oeste presenta una superficie plana ondulada. Sus altitudes van desde los 1200 metros hasta los 2000 metros que encontramos en el distrito de Rancho Redondo.

Nuestro nodo de control secundario de la zona noreste se ubicará en la estación remota llamada Tanque de Tibás. En la figura 5.10 tenemos una foto satelital que nos permite ver la topología del sector noreste del acueducto.

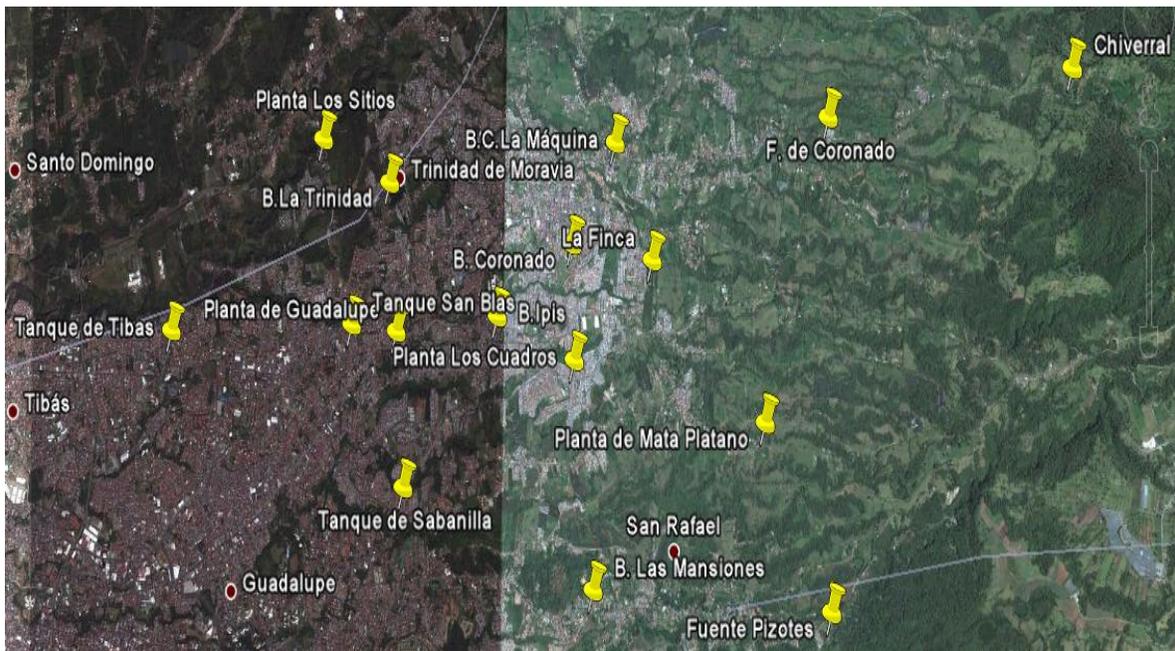


Figura 5.10 Foto satelital del sector Noreste del acueducto metropolitano

Los datos de elevación del terreno, se pueden observar en la figura 5.11

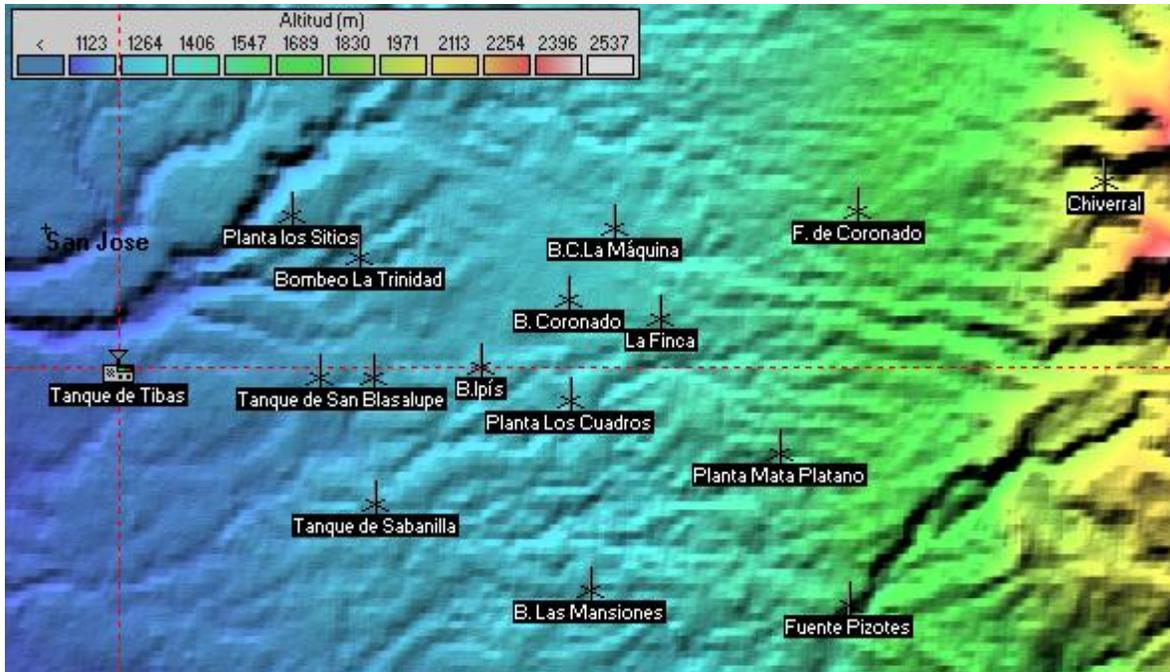


Figura 5.11 Mapa digital del sector Noreste del acueducto metropolitano

Tabla 5.5 Datos de los radio enlaces del sector noreste

Enlace		Distancia (km)	Azimet(°)	Elevación(°)
Tanque de San Blas	Tanque de Tibás	2,65	270,7	-0,801
Bombeo la Trinidad		3,51	245,6	-0,747
Planta los Sitios		3,02	229,1	-1,435
La Máquina		6,79	254,4	-1,622
Bombeo Coronado		6	261,1	-1,655
La Finca		7,18	264,6	-2,05
Chiverral		13,20	259,5	-3,721
Fuente de Coronado		9,94	258,18	-2,539
Planta de Guadalupe		3,37	270,53	-1,102
B. Ipís		4,77	268,89	-1,456
Planta Mata de Plátano		8,77	276,39	-2,431
Planta Los Cuadros		5,97	273,27	-1,726
Sabanilla		3,76	295,25	-0,995
Bombeo Las Mansiones		6,78	293,30	-1,392
Fuente Pizotes		10,06	286,59	-2,436

5.2.5 Sector Central

El sector este se encuentra comprendido por los distritos de Pavas y la Uruca del cantón central de San José. Las estaciones remotas dentro de este sector son 4, las cuales son las siguientes:

1. Centro de Control
2. Pavas
3. Psiquiátrico
4. Chautelle

La geomorfología de dichos distritos es una superficie plana ondulada, con alturas de 1050 metros en Pavas y 1115 en la Uruca. Las estaciones del nodo central se comunicarán directamente con el centro de control operacional ubicado en la Uruca.

La figura 5.12 presenta un mapa digital del sector central y la figura 5.13 presenta los datos de elevación del terreno de las .



Figura 5.12 Foto satelital del sector central del acueducto metropolitano

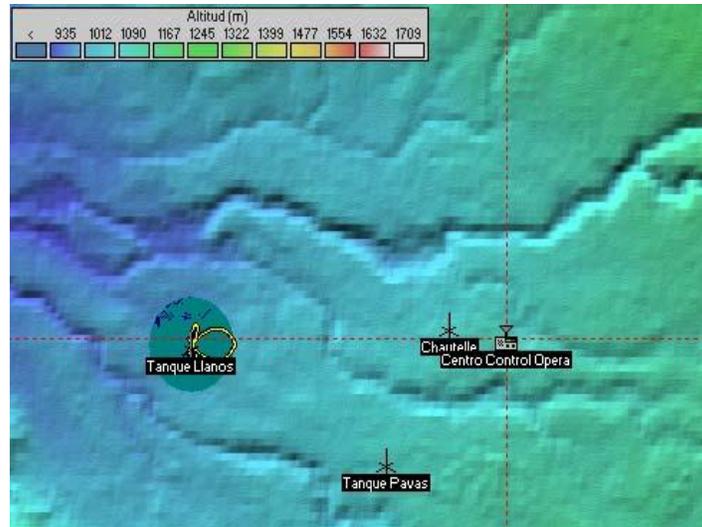


Figura 5.13 Mapa digital del sector central del acueducto metropolitano

Tabla 5.6 Datos de los radio enlaces del sector central

Enlace		Distancia (km)	Azimet(°)	Elevación(°)
Pavas	Centro de Control	2,30	47,30	0,743
Psiquiátrico		4,40	88,79	1,437
Chautelle		0,80	101,06	3,125

5.2.6 Sector Este

El sector este se encuentra comprendido por los cantones de La Unión, Curridabat y Goicoechea. Las estaciones remotas dentro de este sector son 9, las cuales son las siguientes:

1. Pozo Macgregor 1
2. Pozo Macgregor 2
3. Tanque Guayabos
4. Tanque Granadilla
5. Tanque de Curridabat
6. Pozos las monjas
7. C. La Lía
8. Montufar

9. Planta de Tres Ríos

La geomorfología del cantón de la Unión en muestra en la figura 5.15, se caracteriza por ser un terreno plano ondulado, con algunas laderas de todo tipo de pendiente hacia el norte del cantón. Sus alturas van desde los 1270 metros hasta los 1450 en Dulce Nombre.

El cantón de Curridabat presenta cambios de relieve dentro del área del cantón. Al oeste del cantón es una superficie plana ondulada, el resto del cantón presenta pendientes suaves. Las alturas van desde 1200 metros en el centro de Curridabat hasta los 1340 metros como en el distrito de Granadilla

Nuestro nodo de control secundario de la zona noreste se ubicará en la estación remota llamada Tanque de Curridabat, en la figura 5.14 se detalla la ubicación de las estaciones.

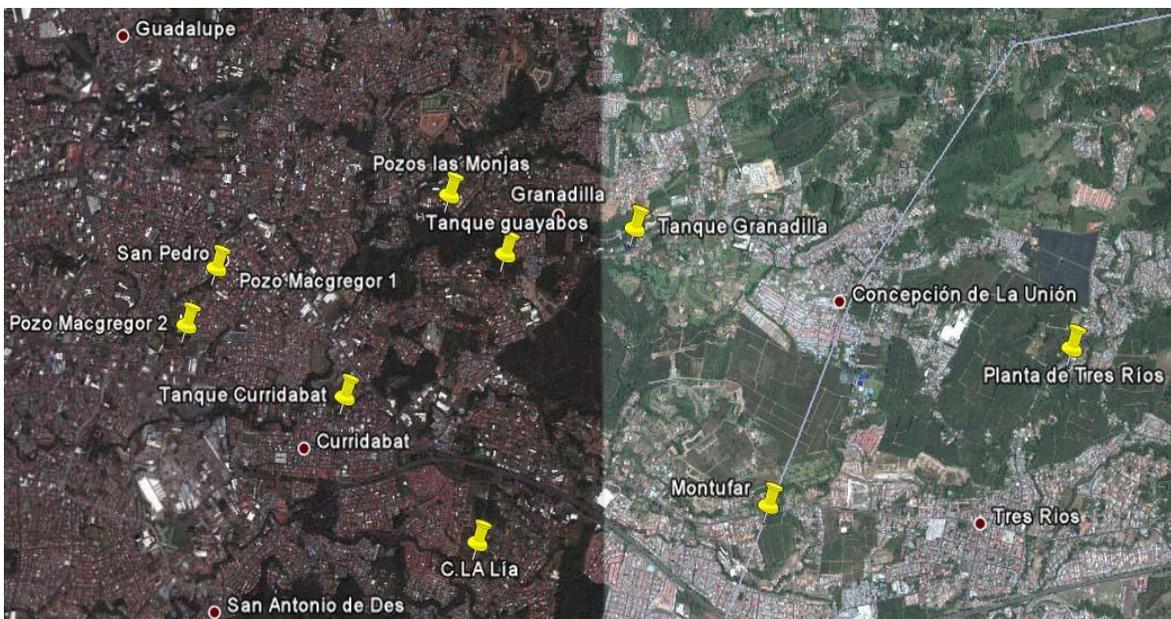


Figura 5.14 Foto satelital del sector este del acueducto metropolitano

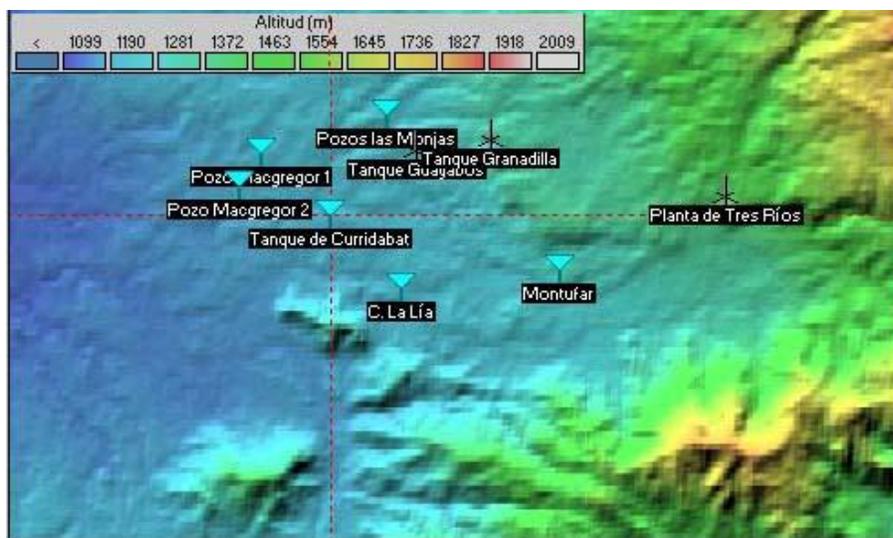


Figura 5.15 Mapa digital del sector este del acueducto metropolitano

Tabla 5.7 Datos de los radio enlaces sector este

Enlace		Distancia (km)	Azimut(°)	Elevación(°)
Pozo Macgregor 1	Tanque de Curridabat	1,42	131,87	1,447
Pozo Macgregor 2		1,48	107,59	2,040
Tanque Guayabos		1,69	230,49	-1,156
Tanque Granadilla		2,76	243,06	-2,098
Pozos las monjas		1,79	209,37	-0,168
C. La Lía		1,57	315,91	-0,087
Montufar		3,62	283,12	-1,109
Planta de Tres Ríos		6,09	266,59	-1,836

5.2.7 Enlace entre el Centro de Control Operacional y los centros de control secundarios

Como se detallo anteriormente, el nodo central de nuestra red se ubica en el centro de control operacional y este se conectará con los centros de control secundarios, dichos enlaces se detallan en la foto satelital de la figura 5.16 y en la figura 5.17 se detallan los datos de elevación del CCO y los centros de control secundarios.

Tabla 5.8 Datos de los radio enlaces secundarios con el centro de control

Enlace		Distancia (km)	Azimut(°)	Elevación(°)
Bebedero	Centro de Control Operacional	8,54	54,29	-3,43
Tanques del Sur		2,79	337,62	-1,146
W2		2,09	132,23	1,739
Tanque de Curridabat		7,92	299,86	-0,818
Tanque de Tibás		4,38	250,67	-1,069

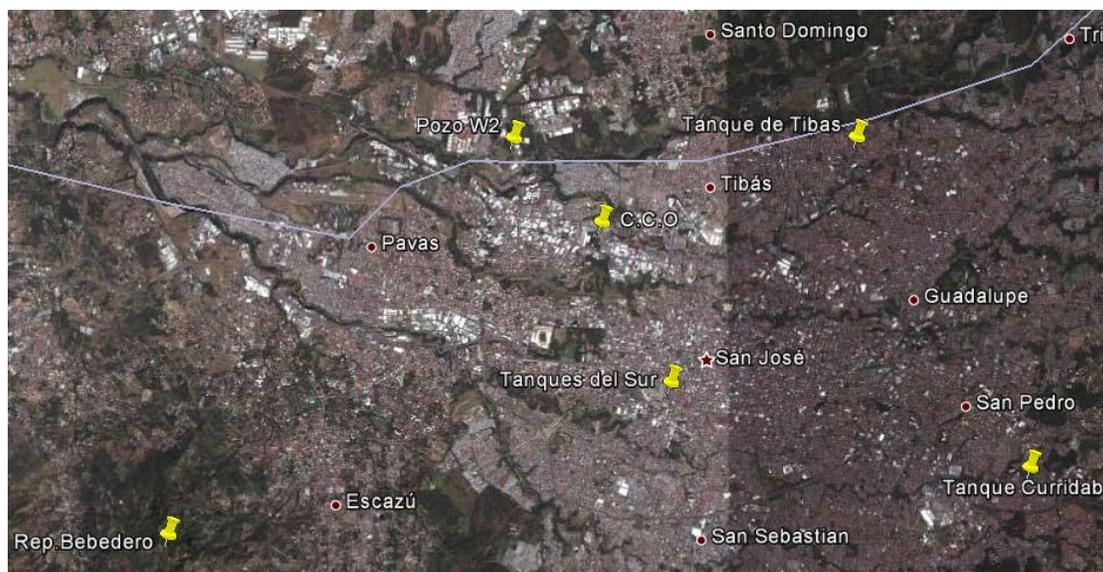


Figura 5.16 Foto satelital del CCO y sus centros de control secundarios

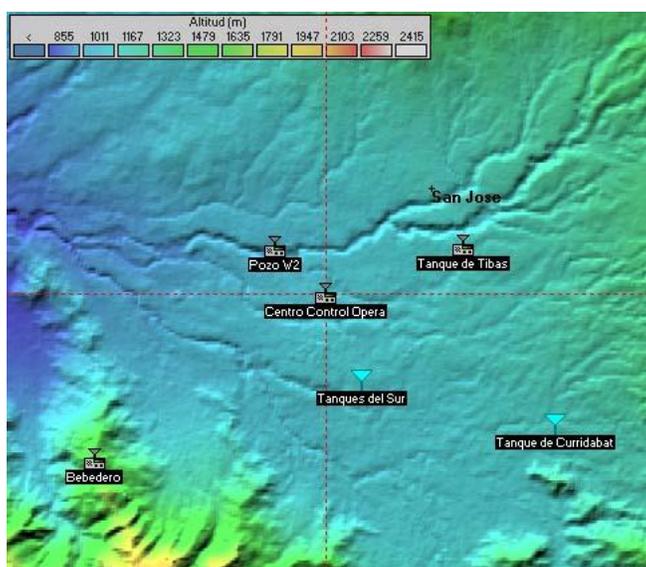


Figura 5.17 Topología de la red del acueducto metropolitano

Capítulo 6: Resultados

Para comprobar la factibilidad de los enlaces de cada una de las estaciones con su centro de control, se utilizó el *software* de simulación de radio enlaces **Radio Mobile**, el cual es un programa de libre distribución que utiliza datos digitales del terreno para generar un perfil del enlace entre el receptor y transmisor, combinados con la información de los equipos tales como: sensibilidad del receptor, potencia de transmisión, parámetros de la antena, pérdidas, entre otros.

El algoritmo para los cálculos de propagación utilizado por Radio Mobile es el de Longley – Rice, el cual es el utilizado por Instituto de Ciencias de Telecomunicación, El Departamento del Comercio y el ejército de los Estados Unidos.

En el apéndice 3 se detalla la utilización del *software* y en la tabla 6.2 se resume la información de los radio enlaces.

Algunos parámetros son genéricos para las estaciones remotas y los centros de control, los cuales detallamos a continuación:

Centros de Control:

- Potencia de transmisión: 10 W (40 dBm)
- Frecuencia: 450 – 470 MHz
- Sensibilidad de recepción: 0,35 uV (-116,1 dBm)
- Tipo de Antena: omnidireccional
- Ganancia de la antena: 12 dBi
- Altura de la antena: 30 metros

- Pérdida de la línea: 3 dB
- Pérdida adicional por cable: 0,1 dB/m
- PIRE: 79,43 W

Estaciones Remotas:

- Potencia de transmisión: 5 W (37 dBm)
- Frecuencia: 450 – 470 MHz
- Sensibilidad de recepción: 0,35 uV (-116,1 dBm)
- Tipo de Antena: Yagi
- Ganancia de la antena: 7 dBi
- Altura de la antena: 3 metros
- Pérdida de la línea: 3 dB
- Pérdida adicional por cable: 0,1 dB/m
- PIRE: 12,56 W

Tabla 6.1 Cálculo de los radio enlaces del acueducto metropolitano

Enlace		Distancia (km)	L _{FSL} (dB)	Altura Total (m)		Primer obstáculo(km)	Peor Fresnel	Pérdidas totales (dB)	Nivel Rx (dBm)	Margen (dB)
Tx	Rx			Tx	Rx					
Pozo Brasil	Bebedero	7,55	103,5	811,8	1635,7	0,64	0	118,4	-68,4	47,7
Piedades	Bebedero	6,52	102	993,1	1635,7	1,13	-3,2	150,5	-100,5	15,6
Zoológico	Bebedero	5,22	100,1	866,6	1635,7	5,06	0,6	101,9	-51,9	64,2
Booster Matra	Bebedero	6,09	101,4	853,9	1635,7	5,85	1,1	102,4	-52,4	63,7
Bombeo Potrerillos	Bebedero	7,83	103,6	814,1	1635,7	0,24	-0,3	126,2	-76,2	39,9
Tanque Guachipelín	Bebedero	4,61	98,3	1002,3	1635,7	4	1,8	99,3	-49,3	66,8
Tanque Bello horizonte	Bebedero	3,91	97,6	1231,3	1635,7	---	3,2	108,8	-58,9	57,3
Bombeo Escazú	Bebedero	3,43	96,5	1045,7	1635,7	---	2,1	96,4	-46,4	69,7
Plantel Salitral	Bebedero	5,38	100,3	138,6	1635,7	5,21	2,1	102,3	-52,3	63,8
Tanque Honduras	Bebedero	7,03	102,6	946,2	1635,7	---	1,6	102,2	-52,2	63,9
Bombeo Puente de Mulas	Bebedero	7,75	103,5	879,9	1635,7	2	1,2	103,6	-53,6	62,5
Planta de Alajuelita	Tanques del Sur	5,11	99,8	1301,1	1195,5	---	1,5	103,3	-53,3	62,8
Calle Nueva	Tanques del Sur	3,92	97,5	1176,8	1195,5	---	1,2	99,8	-49,8	66,3
Tanque de Higuito	Tanques del Sur	9,28	105	1287,5	1195,5	---	1,1	106,9	-56,9	59,2
Tanque San Miguel	Tanques del Sur	6,96	102,5	1339,8	1195,5	---	0,1	115,8	-65,8	50,3

Enlace		Distancia (km)	L _{FSL} (dB)	Altura Total (m)		Primer obstáculo(km)	Peor Fresnel	Pérdidas totales (dB)	Nivel Rx (dBm)	Margen (dB)
Tx	Rx			Tx	Rx					
Tanque la Pelota	Tanques del Sur	6,40	101,8	1232,4	1195,5	2,88	1,9	102,8	-52,9	63,3
Planta San Juan de Dios	Tanques del Sur	6,20	101,5	1306,6	1195,5	0,24	-2,1	149,9	-99,9	16,2
Tanque San Pablo	Pozo W2	3,67	97	1196,3	1080,3	---	0,5	99,3	-49,3	66,8
Pozo Rincón Ricardo 1	Pozo W2	2,36	93,1	1139,4	1080,3	0,49	0,6	95	-45,1	71,1
Pozo Rincón Ricardo 2	Pozo W2	2,31	92,9	1130,1	1080,3	---	0,2	98,8	-48,8	67,3
Tanque la Meseta	Pozo W2	4,96	99,6	1242,8	1080,3	0,72	0,2	105,3	-55,3	60,8
Pozo W1	Pozo W2	0,63	82	1039,3	1080,3	---	3,1	83,7	-33,7	82,4
Pozo W7	Pozo W2	1,49	89,1	1006,2	1080,3	0,16	0,1	95,8	-45,8	70,3
Pozo W9	Pozo W2	0,39	77,6	1004,4	1080,3	0,16	1,7	78,4	-28,5	87,7
Pozo W14	Pozo W2	0,60	81,3	1024,5	1080,3	---	1,9	83,2	-33,2	82,9
Pozo W3	Pozo W2	0,44	78,5	1065	1080,3	0,09	1	79,3	-29,3	86,8
Pozo W15	Pozo W2	0,55	80,5	1062,6	1080,3	---	0,1	87,6	-37,6	78,5
Pozo W8	Pozo W2	0,66	82	1076,8	1080,3	---	0,7	83,6	-33,6	82,5
Pozo W13	Pozo W2	0,64	81,7	1076,5	1080,3	---	0,7	83,1	-33,2	83
Pozo W4	Pozo W2	0,93	85	1057,2	1080,3	0,23	0,4	88,9	-38,9	77,2
Pozo W5	Pozo W2	1,24	87,5	1068,7	1080,3	---	0,7	89	-39	77,1

Enlace		Distancia (km)	L _{FSL} (dB)	Altura Total (m)		Primer obstáculo(km)	Peor Fresnel	Pérdidas totales (dB)	Nivel Rx (dBm)	Margen (dB)
Tx	Rx			Tx	Rx					
Pozo W6	Pozo W2	1,52	89,3	1067	1080,3	0,32	0,4	92,6	-42,6	73,5
Pozo W10	Pozo W2	1,08	86,3	1083,1	1080,3	---	0,3	90,9	-40,9	75,2
Pozo W12	Pozo W2	1,51	89,2	1079,1	1080,3	0,40	0,3	94,6	-44,6	71,5
Tanque de San Blas	Tanque de Tibás	2,65	94,1	1260,2	1225,2	1,52	0,5	97,3	-47,3	68,8
Bombeo la Trinidad	Tanque de Tibás	3,51	96,6	1273	1225,2	1,51	0,1	105,2	-55,2	60,9
Planta los Sitios	Tanque de Tibás	3,02	95,3	1302,5	1225,2	---	0,4	98,9	-48,9	67,2
La Máquina	Tanque de Tibás	6,79	102,3	1416,2	1225,2	2,71	0,1	110,1	-60,1	56,1
Bombeo Coronado	Tanque de Tibás	6	101,2	1397,1	1225,2	---	0,4	105,2	-55,2	60,9
La Finca	Tanque de Tibás	7,18	102,8	1479,6	1225,2	---	1,2	103,8	-53,8	62,3
Chiverral	Tanque de Tibás	13,20	108,1	2074,4	1225,2	0,25	0,9	109,1	-59,1	57
Fuente de Coronado	Tanque de Tibás	9,94	105,6	1661,3	1225,2	0,32	1,2	107,2	-57,2	58,9
Planta de Guadalupe	Tanque de Tibás	3,37	96,2	1289,3	1225,2	---	0,1	102,9	-52,9	63,2
B. Ipís	Tanque de Tibás	4,77	99,2	1345,1	1225,2	---	0,5	101,7	-51,7	64,4
Planta Mata de Plátano	Tanque de Tibás	8,77	104,5	1589	1225,2	0,16	0,2	110,5	-60,5	55,6
Planta Los Cuadros	Tanque de Tibás	5,97	101,2	1402,2	1225,2	---	0,5	103,4	-53,5	62,7
Sabanilla	Tanque de Tibás	3,76	97,2	1288,1	1225,2	2,64	0,6	98,5	-48,5	67,6

Enlace		Distancia (km)	L _{FSL} (dB)	Altura Total (m)		Primer obstáculo(km)	Peor Fresnel	Pérdidas totales (dB)	Nivel Rx (dBm)	Margen (dB)
Tx	Rx			Tx	Rx					
Bombeo Las Mansiones	Tanque de Tibás	6,78	102,3	1383,6	1225,2	0,08	-0,6	136	-86	30,1
Fuente Pizotes	Tanque de Tibás	10,06	105,7	1649	1225,2	---	0,2	112,2	-62,2	54
Pavas	Centro de Control	2,30	92,9	1111,8	1046,5	0,24	-0,1	104,9	-54,9	61,2
Psiquiátrico	Centro de Control	4,40	98,5	1032	1046,5	1,60	0,3	107,4	-57,4	58,7
Chautelle	Centro de Control	0,80	83,8	1100,1	1046,5	0,16	0,3	90,2	-40,3	75,9
Pozo Macgregor 1	Tanque de Curridabat	1,42	88,7	1211,9	1247	---	0,7	90,1	-40,1	76
Pozo Macgregor 2	Tanque de Curridabat	1,48	89,1	1193,4	1247	0,16	0,7	90,7	-40,7	75,4
Tanque Guayabos	Tanque de Curridabat	1,69	90,2	1282,2	1247	0,08	0,4	94,1	-44,1	72
Tanque Granadilla	Tanque de Curridabat	2,76	94,5	2074,4	1247	---	0,5	96,7	-46,8	69,4
Pozos las monjas	Tanque de Curridabat	1,79	90,7	1253,8	1247	0,07	-0,4	107,7	-57,8	58,4
C. La Lía	Tanque de Curridabat	1,57	89,6	1220	1247	0,86	1,8	90,4	-32,4	83,7
Montufar	Tanque de Curridabat	3,62	96,8	1313,6	1247	0,16	0,6	98,5	-48,6	67,6
Planta de Tres Ríos	Tanque de Curridabat	6,09	101,4	1440,2	1247	2,89	-0,7	124,8	-74,8	41,3

Enlace		Distancia (km)	L _{FSL} (dB)	Altura Total (m)		Primer obstáculo(km)	Peor Fresnel	Pérdidas totales (dB)	Nivel Rx (dBm)	Margen (dB)
Tx	Rx			Tx	Rx					
Bebedero	Centro de Control Operacional	8,54	104,3	1635,7	1046,5	---	3,2	118,2	-60,2	55,9
Tanques del Sur	Centro de Control Operacional	2,79	94,6	1195,5	1046,5	1,28	1,5	98,2	-40,2	75,9
W2	Centro de Control Operacional	2,09	92,1	1080,3	1046,5	1,45	1,4	95,6	-37,6	78,5
Tanque de Curridabat	Centro de Control Operacional	7,94	103,6	1247	1046,5	4,32	0,2	114,2	-56,2	60
Tanque de Tibás	Centro de Control Operacional	4,38	98,5	1225,2	1046,5	2,55	1	99	-41	75,1

Capítulo 7: Conclusiones

- Se ubicó geográficamente cada una de las estaciones remotas del acueducto metropolitano.
- La topología propuesta nos indica que existe línea de vista entre todos los enlaces.
- Con topología propuesta la distancia entre la mayoría de los radio enlaces no supera los 10 km, lo cual mejora la calidad de los enlaces.
- En todos los enlaces se cumplen con los requerimientos de sensibilidad del receptor.
- Se puede comprobar la factibilidad de los enlaces a pesar de las pérdidas de propagación, la distancia de las estaciones, el nivel de recepción y las irregularidades del terreno
- En todos los enlaces el nivel de potencia recibido se encuentra dentro de los márgenes de la normativa costarricense
- En todos los enlaces las pérdidas debido a la lluvia pueden despreciarse. Se modelo un promedio estadístico de atenuación en referencia al tipo de clima de nuestro país.

Bibliografía

[1] 2010, “Reseña histórica del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados”, Artículo.

Disponible en:

<http://www.aya.go.cr/Administracion/DocumentosBoletines/Docs/230910011929RESENAHISTORICADEAYA.pdf>

[2] SRTM-The mission to map the world

Disponible en:

<http://srtm.usgs.gov/>

[3] Unión Internacional de Telecomunicaciones

Disponible en:

<http://www.itu.int>

[4] Hayt W.: Teoría Electromagnética, Mc Graw-Hill, Séptima Edición, 2007.

[5] Ruiz F. , Guías para instaladores de antenas, Grupo editorial Ceac S.A, Tercera Edición, Barcelona, 1999

[6] Durney H., Castro C., y Ortiz R. Diseño e implementación de radio enlaces y estaciones repetidoras Wi-Fi para conectividad de escuelas rurales en zona sur de Chile. UHTU.

Disponible en:

<http://www.haps.cl/documentos/04.pdf>

[7] Hufford G., Longley A. y Kissick W. (1982). A Guide to the use of ITS Irregular Terrain Model in the area prediction mode. EEUU.

Disponible en:

<http://www.its.bldrdoc.gov/pub/ntia-rpt/82-100/82-100.pdf>

http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/images/bibliography/SRTM_Fig13.jpg

[8] Stremmler, F., Introducción a los Sistemas de Comunicación. Addison-Wesley, tercera edición, México, 1993. Iberoamericana, México, 1997.

[9] <http://www.guiascostarica.com>

[10] Decreto N° 36324-S, “Regulación a la exposición a campos electromagnéticos de radiaciones no ionizantes, emitidos por sistemas inalámbricos con frecuencias de hasta 300 GHZ”, 04 de febrero del 2011.

Apéndices y Anexos

Apéndice A.1 Glosario de términos y abreviaturas

A.1.1 Glosario de términos

Telemetría: Medición remota de magnitudes físicas para su posterior envío al operador del sistema.

Telemando: Transmisión a distancia de señales que controlan el funcionamiento de un mecanismo.

FactorySuite: Es un conjunto de herramientas bajo Microsoft Windows. Que permiten crear aplicaciones industriales tales como Monitorización, Control de Procesos, Sistemas de control, entre otros.

Wonderware: Proveedor independiente de programas para automatización industrial.

Google Herat: Herramienta de software que permite ubicar cualquier lugar de la Tierra para ver imágenes de satélite, mapas, imágenes del relieve, edificios 3D, el océano e, incluso, las galaxias más lejanas.

A.1.2 Glosario de Abreviaturas

A_{s1}: Máxima amplitud del lóbulo lateral con respecto a la amplitud máxima.

AyA: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

CCO: Centro de control operacional

EIRP: Equivalent isotropically radiated power, traducido como potencia radiada isótropa equivalente.

PIRE: Potencia Isotrópica Irradiada Efectiva es equivalente a EIRP.

EMF: Campo electromagnético.

S: Densidad de potencia

SA: Absorción específica

SAR: Tasa de absorción específica

SCADA: Acrónimo de *Supervisory Control and Data Acquisition*, en español, registro de datos y control de supervisión.

Apéndice A.2 Información sobre la institución

En el año de 1953 el estado costarricense emitió la Ley General de Agua Potable con el fin de regular y garantizar la potabilidad del agua. Estos esfuerzos culminaron en la emisión de la Ley N° 2726 del 14 de abril de 1961 en la administración del presidente Mario Echandi, que creó el Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados, al cual se le asigna la función de proveer un servicio a los habitantes de la república de agua potable, recolección y evacuación de aguas negras y pluviales, velar por la conservación de las cuencas hidrográficas, controlar la contaminación de las aguas y la protección ecológica.

El Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados se transforma en el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, con la ley N° 5915 del 12 de julio de 1976.

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados es una institución pública cuya misión es suplir y normar todos los aspectos relacionados con los servicios públicos de agua potable y alcantarillado sanitario para toda la población dentro del territorio nacional

Apéndice A.3 Estaciones Remotas del Acueducto Metropolitano

En la tabla A.3.1 observamos las estaciones remotas del acueducto metropolitano con su ubicación y sus principales componentes:

Tabla A.3.1 Estaciones Remotas del Acueducto Metropolitano

Ubicación		Estación Remota	Componentes	
Cantón	Distrito		#	Elemento
San José	Pavas	1.Pavas	1	Tanque
			1	Válvula
		2.Psiquiátrico	1	Tanque
	Hospital	3.Tanques del Sur	2	Tanque
	La Uruca	4.Chautelle	1	Válvula de corte
Montes de Oca	Sabanilla	5.Sabanilla	1	Tanque
			1	Válvula
			1	Macromedidor
	San Rafael	6. Bombeo Las Mansiones	2	Bombas
		7. Fuente Pizotes	1	Manantial
1	Tanque			
Curridabat	Curridabat	8. Tanque de Curridabat	3	Tanques
		9. Pozo Macgregor 1	1	Pozo
		10. Pozo Macgregor 2	1	Pozo
		11. Tanque guayabos	1	Tanque
	Granadilla	12. Tanque Granadilla	1	Tanque
		13. Pozos las monjas	1	Pozo
	Sánchez	14. C. La Lía	1	Válvula
La Unión	San Juan	15. Montufar	1	Tanque
	Tres Ríos	16. Planta de Tres Ríos	1	Planta de Potabilizadora
	San Rafael	17. Fuente Carazo	1	Manantial
Vázquez de Coronado	San Isidro	18. La Máquina	2	Bombas
		19. Bombeo Coronado	2	Bombas
			2	Tanques
			1	Macromedidor de Caudal

		20. La Finca	1	Tanque
	San Rafael	21. Chiverral	1	Manantial
			1	Tanque
	Las Nubes	22. Fuente Coronado	1	Manantial
Alajuelita	Concepción	23. Calle Nueva	1	Tanque
			2	bombas
	San Josesito	24. Planta de Alajuelita	1	Planta potabilizadora
			2	Bomba
		1	Tanque	
Escazú	Bello Horizonte	25. Tanque Bello horizonte	1	Tanque
	San Rafael	26. Bombeo Escazú	2	Bombas
	Escazú	27. Plantel Salitral	1	Planta Potabilizadora
			1	Tanque Salitral
			1	Bombeo Salitral
		28. Tanque Guachipelín	1	Tanque
Santa Ana	Piedades	29. Pozo Brasil	1	Pozo
			1	Bomba
	Piedades	30. Piedades	1	Tanque
	Río Oro	31. Zoológico	1	Tanque
		32. Matra	3	Bombas
	33. Bombeo Potrerillos	3	Bomba	
Moravia	San Francisco	34. Tanque Tibás	1	Tanque
	San Vicente	35. Tanque San Blas	1	Tanque
	La Trinidad	36. Bombeo La Trinidad	2	Bomba
	Los Sitios	37. Planta Los Sitios	1	Tanque
			1	Planta Potabilizadora
			5	Bomba
	San Jerónimo	.38 Plantel San Jerónimo	1	Planta Potabilizadora
1			Tanque	
Belén	San Antonio	39. Tanque Honduras	1	Tanque
		40. Bombeo Puente de Mulas	3	Bombas
Desamparados	San Miguel	41. Tanque Higuito	1	Tanque
		42. Tanque San Miguel	1	Tanque
	Desamparados	43. Tanque La Pelota	1	Tanque
			1	Macromedidor de Caudal

			2	Bombas
	San Juan de Dios	44. Planta San Juan de Dios	1	Planta Potabilizadora
Goicoechea	Guadalupe	45. Planta de Guadalupe	1	Planta potabilizadora
	Ipis	46. Bombeo Ipis	3	Bombas
	Mata de Plátano	47. Planta Mata de Plátano	1	Planta Potabilizadora
			1	Tanque
		48. Planta Los Cuadros	1	Tanque
			1	Planta de Potabilizadora
2	Bombas			
San Pablo	San Pablo	49. Tanque San Pablo	1	Tanque
			1	Bomba
			1	Válvula
		50. Pozo Rincón Ricardo1	1	Pozo
		51. Pozo Rincón Ricardo2	1	Pozo
		52. Tanque La Meseta	1	Pozo
			1	Tanque
			1	Bomba
Heredia	Ulloa	53. Pozo W1	1	Pozo
		54. Pozo W2	1	Pozo
		55. Pozo W7	1	Pozo
		56. Pozo W9	1	Pozo
		57. Pozo W14	1	Pozo
Santo Domingo	Santa Rosa	58. Pozo W3	1	Pozo
		59. Pozo W15	1	Pozo
		60. Pozo W8	1	Pozo
		61. Pozo W13	1	Pozo
Heredia	San Francisco	62. Pozo W4	1	Pozo
		63. Pozo W5	1	Pozo
		64. Pozo W6	1	Pozo
		65. Pozo W10	1	Pozo
		66. Pozo W12	1	Pozo

En la tabla A.3.2 se detalla la ubicación geográfica y la altitud de las estaciones remotas del acueducto metropolitano.

Tabla A.3.2 Ubicación y altitud de las estaciones remotas del acueducto metropolitano

Estación Remota	Ubicación	Coordenadas		Altitud(m)
	Cantón	Latitud	Longitud	
Centro de Control Operacional	San José	9°57'5.74	-84°5'57.96	1016.5
1.Pavas		9°56'14.44	-84°6'51.63	1108.8
2.Psiquiátrico		9°57'2.01	-84°8'20.67	1029
3.Tanques del Sur		9°55'41.3	-84° 5'21	1165,5
4.Chautelle		9°57'10	-84° 6'22	1097,1
5.Sabanilla	Montes de Oca	9°56'58.47	-84°1'47.98	1285.1
6. Bombeo Las Mansiones		9°56'25.1	-84° 0'15.1	1380,6
7. Fuente Pizotes		9°56'15.68	-83°58'22.75	1646
8. Tanque de Curridabat	Curridabat	9°54'57.23	-84° 2'10.04	1217
9. Pozo Macgregor 1		9°55'2.8	-84° 2'44.9	1208,9
10. Pozo Macgregor 2		9°55'11.7	-84° 2'56.4	1190,4
11. Tanque Guayabos		9°55'32.1	-84° 1'27.1	1279.2
12. Tanque Granadilla		9°59'10	-83° 56'33	2071,4
13. Pozos las monjas		9°55'47.7	-84° 1'41.2	1250,8
14. C. La Lía		9°54'20.7	-84° 1'34.1	1217
15. Montufar	La Unión	9°54'30.6	-84° 00'14	1310.6
16. Planta de Tres Ríos		9°55'9	-83° 58'50	1437,2
17. Fuente Carazo		9°54'30	-83° 58'11	1423
18. La Máquina	Vázquez de Coronado	9°58'51	-84° 0'5	1413,2
19. Bombeo Coronado		9°58'22	-84° 0'25	1394,1
20. La Finca		9°58'14	-83° 59'45	1476,6
21. Chiverral		9°59'10	-83° 56'33	2071,4
22. Fuente de Coronado		9°58'58	-83° 58'20	1658,3
23. Calle Nueva	Alajuelita	9°53'44.7	-84° 6'12.1	1173.8
24. Planta de Alajuelita		9°53'9.8	-84° 6'28.9	1298.1

Estación Remota	Ubicación	Coordenadas		Altitud(m)
	Cantón	Latitud	Longitud	
25. Tanque Bello horizonte	Escazú	9°54'46.7	-84° 7'37.4	1228,3
26. Bombeo Escazú		9°55'50.9	-84° 8'34.1	1042,7
27. Plantel Salitral		9°54'11	-84° 10'32.7	1035,6
28. Tanque Guachipelín		9°56'39.5	-84° 10'05.24	999,3
29. Pozo Brasil	Santa Ana	9°56'4.8	-84° 13'37.3	808,8
30. Piedades		9°55'15	-84° 13'12	990,1
31. Zoológico		9°56'29.6	-84° 11'38.7	863,6
32. Booster MATRA		9°57'8	-84° 11'35	850,9
33. Bombeo Potrerillos		9°57'42.9	-84° 12'23.1	811,1
34. Tanque Tibás	Moravia	9°57'52	-84° 3'40	1195,2
35. Tanque San Blas		9°57'51	-84° 2'13	1257,2
36. Bombeo La Trinidad		9°58'39	-84° 1'55	1270
37. Planta Los Sitios		9°58'56	-84° 2'25	1299,5
38. Plantel San Jerónimo		10°0'55	-83° 59'50	1469,6
39. Tanque Honduras	Belén	9°57'57.7	-84° 11'2.8	943,2
40. Bombeo Puente de Mulas		9°58'23.3	-84° 11'0	876,9
41. Tanque de Higuito	Desamparados	9°51'8.7	-84° 3'2.9	1284,5
42. Tanque San Miguel		9°52'35	-84° 3'12	1336,8
43. Tanque La Pelota		9°52'43.8	-84° 3'32	1229,4
44. Planta San Juan de Dios		9°52'20.8	-84° 5'30.9	1303,6
45. Planta de Guadalupe	Goicoechea	9°57'51	-84° 1'49	1286,3
46. B. Ipís		9°57'55	-84° 1'3	1342,1
47. Planta Mata de Plátano		9°57'20.4	-83° 58'53.2	1586
48. Planta Los Cuadros		9°57'41	-84° 0'24	1399,2
49. Tanque San Pablo	San Pablo	9°59'36	-84° 5'51	1193,3
50. Pozo Rincón Ricardo1		9°58'49.6	-84° 5'57.6	1136,4

51. Pozo Rincón Ricardo2		9°58'58.7	-84° 6'15.8	1127,1
52. Tanque La Meseta		10°0'16	-84° 5'38	1239,8
53. Pozo W1	Ulloa	9°57'35	-84° 6'32.1	1036,3
54. Pozo W2		9°57'50.5	-84° 6'46.9	1050,5
55. Pozo W7		9°57'37	-84° 6'46.7	1003,2
56. Pozo W9		9°57'37.9	-84° 6'47	1001,4
57. Pozo W14		9°57'38	-84° 6'31.7	1021,5
58. Pozo W3	Santa Rosa	9°58'4.6	-84° 6'48.1	1062
59. Pozo W15		9°57'50	-84° 6'28.7	1059,6
60. Pozo W8		9°58'8.7	-84° 6'35.6	1073,8
61. Pozo W13		9°58'6.3	-84° 6'33.5	1073,5
62. Pozo W4	San Francisco	9°58'20.5	-84° 6'45.2	1054,2
63. Pozo W5		9°58'30.5	-84° 6'49	1065,7
64. Pozo W6		9°58'39.6	-84° 6'52.1	1064
65. Pozo W10		9°58'23	-84° 6'34	1080,1
66. Pozo W12		9°58'37	-84° 6'31.6	1076,1

En la tabla A.3.3 se detalla las variables a monitorear en los diferentes tipos de componentes de las estaciones, los telemandos y las acciones automatizadas.

Tabla A.3.3 Telemandos y variables a monitorizar en las estaciones remotas

Pozo Bomba Manantial	Monitoreo
	Presión de salida
	Caudal producido
	Volumen producido
	Estado de operación
	Corriente de línea
	Tensión de fase
	Automatización
	Arranque de Motor

	Paro de Motor
	Telemando
	Arranque de Motor
	Paro de Motor
	Selector
	Control Local/remoto
Tanque	Monitoreo
	Nivel
	Caudal de entrada
	Volumen de entrada
	Caudal de salida
	Volumen de salida
	Caudal aportado
	Presión de salida
	Telemando
	Apertura de válvula
	Cierre de válvula
	Booster
Nivel/disparo térmico	
Caudal producido	
Volumen producido	
Estado de operación	
Corriente de línea	
Tensión de fase	
Presión de succión/descarga	
Automatización	
Arranque de Motor	
Paro de Motor	
Telemando	
Arranque de Motor	

	Paro de Motor
	Apertura de válvula
	Cierre de válvula
	Selector
	Control Local/remoto

Apéndice A.4 Simulación de los enlaces inalámbricos terrestres

Para comprobar la factibilidad de los enlaces de cada una de las estaciones con su centro de control, se utilizó el software de simulación de radio enlaces **Radio Mobile**.

Este software utiliza perfiles geográficos junto con la información de los equipos, y con el modelo Longley – Rice se predice la factibilidad de los radio enlaces.

Para la creación del mapa de trabajo, fue necesario localizar la ubicación geográfica de cada una de las estaciones de telemetría, dichos datos se observan en la tabla 5.1, con estos datos se selecciono el centro del mapa, su ancho y su largo.

En el mapa de trabajo se dispone de los datos de elevación del terreno, que se representan por medio de un código de colores cuya escala se indica en la parte superior izquierda del mapa, a continuación mostramos como se definió el área y el mapa digital de la región metropolitana:



Figura A.4.1 Propiedades del mapa del área metropolitana

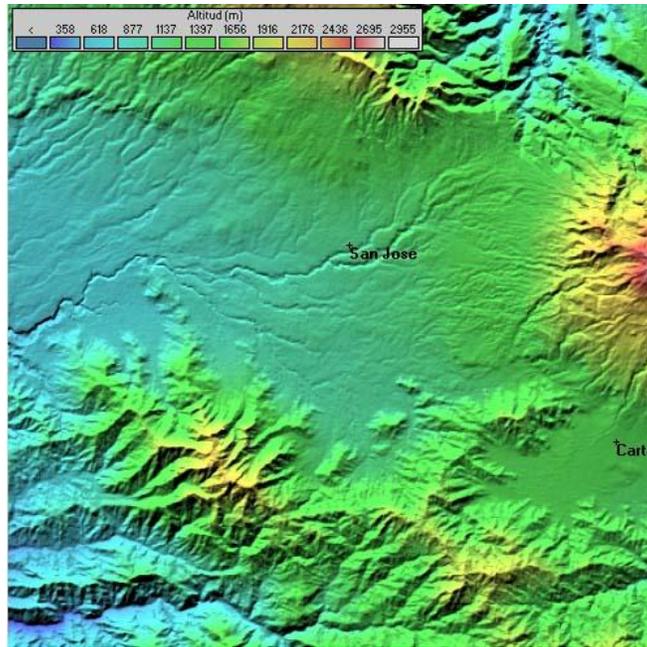


Figura A.4.2 Mapa digital del área metropolitana

Parámetros del modelo:

Para el cálculo de la propagación, la siguiente figura nos muestra los datos utilizados por el modelo Longley-Rice ingresados en el sistema

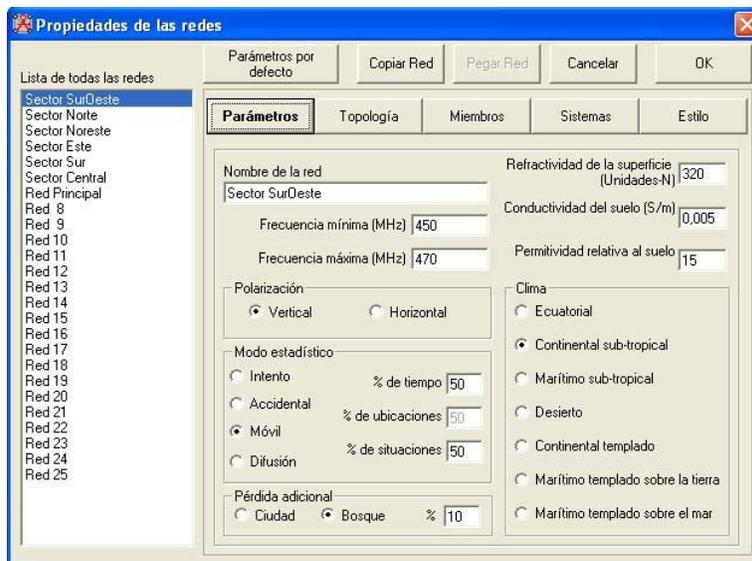


Figura A.4.3 Parámetros para el modelo Longley - Rice

Configuración de las estaciones

En la figuras A.6 y A.7 se muestran las ventanas donde se ingresaron cada una de las estaciones remotas y los centros de control. Las estaciones fueron cargadas en la lista de las unidades por medio de su nombre y del botón Ingresar LAT LON o QRA.

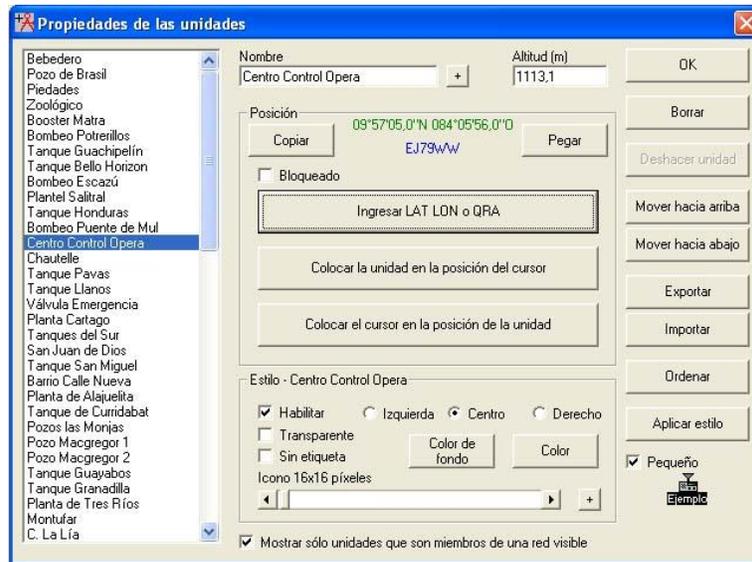


Figura A.4.4 Propiedades de las Redes – Parámetros para

El botón Ingresar LAT LON o QRA permite cargar las estaciones remotas por medio de latitud y longitud.

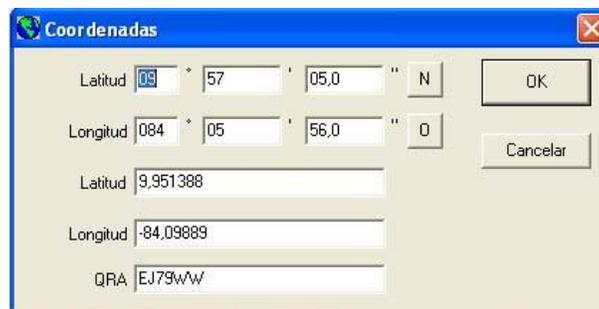


Figura A.4.5 Ventana de configuración de las estaciones remotas

Parámetros de los equipos:

Actualmente, en algunas de las estaciones remotas existe el equipo de telemetría en la banda UHF con su respectiva antena y cable, por lo que los cálculos se realizarán con los parámetros de dicha infraestructura. En la figura A.6 se observan los parámetros de las estaciones remotas y en la tabla A.1 se resumen los datos dependiendo del tipo sistema.

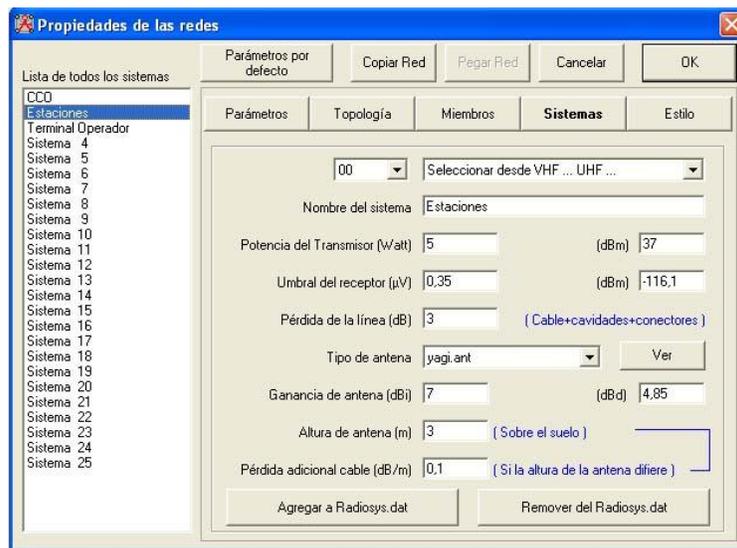


Figura A.4.6 Parámetros de los equipos

Tabla A.4.1 Parámetros de los equipos

Sistema	CCO	Estaciones	Control Secundarios
Potencia del transmisor (W)	10	5	10
Umbral del receptor (uV)	0,35	0,35	0,35
Pérdida de la línea (dB)	3	3	3
Tipo de antena	Omnidireccional	Yagi	Omnidireccional
Ganancia de antena (dBi)	12	7	12
Altura de Antena (m)	30	3	30
Pérdida adicional cable(dB/m)	0,1	0,1	0,1

Radio Mobile utiliza los parámetros de la tabla A.2 para calcular el presupuesto del enlace.

Tabla A.4.2 Parámetros utilizados por Radio Mobile

T _x	Potencia del transmisor (dBm)
L ₁	Pérdida de la línea en el transmisor (dB)
A ₁	Ganancia de la antena transmisora relativa a una antena isotrópica (dBi)
P	Pérdida de propagación utilizando el modelo Longley – Rice (dB)
A ₂	Ganancia de la antena receptora relativa a una antena isotrópica
L ₂	Pérdidas de la línea en el receptor (dB)
R	Sensibilidad del receptor (dBm)
M	Margen de desvanecimiento (dB)
$M(\text{dB}) = \text{señal recibida (dBm)} - R (\text{dBm})$ $M(\text{dB}) = (T_x - L_1 + A_1 - P + A_2 - L_2) - R$	

Radio Mobile posee una herramienta que permite el cálculo del radio enlace entre cada una de las estaciones y su centro de control. Se pueden observar resultados como la distancia, le azimut, la potencia radiada, peor Fresnel, primer obstáculo, entre otros.

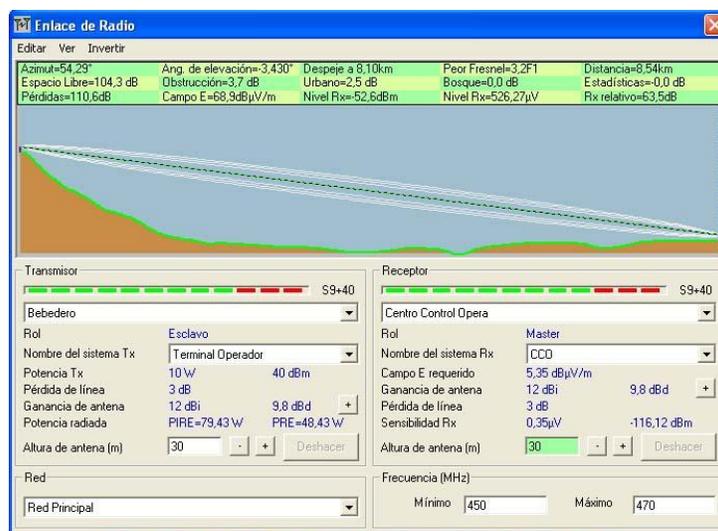


Figura A.4.7 Enlace de Radio con Radio Mobile

Anexo B.1 Normativa Costarricense

El gobierno de Costa Rica, regula el uso del espectro radioeléctrico por medio de decretos, a continuación cito a los dos más importantes con sus respectivos objetivos.

1. “Reglamento para regular la exposición a campos electromagnéticos de radiaciones no ionizantes, emitidos por sistemas inalámbricos con frecuencias de hasta 300 GHZ”: decreto N° 36324-S

Artículo 1. Objetivo

El presente reglamento tiene como objetivo establecer requisitos y criterios tendientes a proteger la salud del personal técnico y de la población en general, de los potenciales riesgos y efectos nocivos a la exposición de los campos electromagnéticos de radiaciones no ionizantes, que puedan derivarse de la explotación y uso de los sistemas inalámbricos.

2. “Plan nacional de atribución de frecuencias”: Decreto N° 35257-MINAET Modificado por decreto N° 35866-MINAET.

Artículo 1. Objetivo

El Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, en lo adelante PNAF, es un instrumento que permite la regulación nacional de manera óptima, racional, económica y eficiente del espectro radioeléctrico nacional, para satisfacer oportuna y adecuadamente las necesidades de frecuencias que se requieren, tanto para el desarrollo de las actuales redes de telecomunicaciones, como para responder eficientemente a la demanda de segmentos de frecuencias para las redes que hagan uso del espectro radioeléctrico; para tal efecto se promoverán el uso de tecnologías que optimicen el uso del espectro. Todo lo anterior, de

conformidad al marco legal y reglamentario vigente y de los acuerdos y convenios internacionales ratificados por Costa Rica.

Analicemos primero el reglamento que regula la exposición a campos electromagnéticos, se establece basado en la recomendación UIT-T K.52, emitido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

En el capítulo 5, artículo 9^o se establecen los límites máximos permisibles de exposición, basados en la Comisión Internacional de Protección Radiológica de las Radiaciones no ionizantes se resumen en las siguientes tablas:

Tabla B.1.1 Límites básicos de la ICNIRP

Rango de frecuencias	Densidad de corriente para cabeza y tronco (mA ^m - ²) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (Wkg ⁻¹)	SAR localizado cabeza y tronco (Wkg ⁻¹)	SAR localizado (extremidades) (Wkg ⁻¹)
Hasta 1 Hz	8	--	--	--
1 - 4 Hz	8/f	--	--	--
4 Hz - 1 kHz	2	--	--	--
1 - 100 kHz	F/500	--	--	--
100 kHz-10 MHz	F/500	0,08	2	2
10 MHz -10 GHz	--	0,08	4	4

1. f es la frecuencia en hertzios.
2. SAR es la tasa de absorción específica
3. Debido a la in homogeneidad eléctrica del cuerpo, las densidades de corriente deben promediarse en una sección de corte de 1 cm² perpendicular a la dirección de la corriente.
4. Todos los valores de SAR han de promediarse en cualquier periodo de 6 minutos.
5. La masa de promediación de la SAR localizada es cualesquiera 10 g de tejido contiguo; la máxima SAR así obtenida debe ser el valor utilizado para estimación de la exposición.

Tabla B.1.2 Niveles de referencia ICNIRP (valores eficaces sin perturbaciones)

Rango de frecuencias (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm^{-1})	Intensidad de campo magnético (Am^{-1})	Densidad de potencia (Wm^{-2})
Hasta 1 Hz	--	$3,2 \times 10^{-4}$	--
1 - 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^{-4} / f$	--
8 - 25 Hz	10 000	$4000 / f$	--
0,025 - 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	--
0,8 - 3 kHz	$250 / f$	5	--
3 - 150 kHz	87	5	--
0,15 - 1 MHz	87	$0,73 / f$	--
1 - 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0,73 / f$	--
10 - 400 MHz	28	0,073	2
400 - 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0073 f^{1/2}$	$f / 200$
2 - 300 GHz	61	0,16	10

1. f está en la frecuencia que se indica en la columna Rango de Frecuencias.
 2. Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, el tiempo de promediación debe ser de 6 minutos.
 3. Para frecuencias hasta 100 kHz los valores pico se pueden obtener multiplicando los valores rms por 1.414. Para pulsos de duración igual al tiempo de promediación t_p , la frecuencia equivalente a aplicar debe ser calculada como $f=1/(2 \times t_p)$.
 4. Para valores pico en frecuencias entre 100 kHz y 10 MHz los valores pico de las intensidades de campo son obtenidas de la interpolación desde 1,5 veces el valor pico a 100 MHz hasta 32 veces el valor pico a 10 MHz. Para frecuencias mayores a 10 MHz se sugiere que la densidad de potencia de onda plana equivalente pico, promediada sobre el ancho del pulso, no exceda por 1000 veces las restricciones de Seq., o que la intensidad de campo no exceda en 32 veces los niveles de exposición de intensidad de campo dados en esta tabla.
 5. Para frecuencias mayores a 10 GHz, el tiempo de promediaciones de $68 / f$ 1,05 minutos (f en GHz).

En cuanto a la potencia máxima permitida, en el capítulo 6, artículo 12, se establece que la potencia isotrópica radiada equivalente máxima para cualquier fuente emisora se calculará de acuerdo al artículo 7.3 y el apéndice II de la recomendación UIT K.52.

Para el procedimiento de evaluación del nivel de exposición, se consideran los siguientes parámetros:

1. La EIRP máxima del sistema de antena
2. La ganancia de la antena
3. La frecuencia de explotación
4. Características de la instalación, como la ubicación de la antena, la altura de la antena, dirección del haz, inclinación del haz, y la probabilidad de que una persona sea expuesta.

El EIRP umbral es el valor que corresponde al límite de exposición para la densidad de potencia o campo procedente de la antena de referencia, este será designado por $EIRP_{th}$.

Para la determinación del $EIRP_{th}$, la recomendación UIT K.52 establece el siguiente procedimiento:

1. Determinar el campo o la densidad de potencia para cada punto, en el que puede producirse exposición, para una antena concreta.
2. Determinar la densidad de potencia máxima $S_{m\acute{a}x}$ dentro de la zona de exposición correspondiente.
3. La condición $S_{m\acute{a}x} = S_{l\acute{i}m}$ es el límite pertinente que indica la norma de exposición al EMF a la frecuencia considerada.

Para la gama de frecuencias de los 400-2000 MHz $EIRP_{th}$ se calcula dependiendo de la directividad y la accesibilidad, lo cual se resume en la siguiente tabla:

Tabla B.1.3 Condiciones de conformidad normal de las instalaciones basadas en los límites ICNIRP para la gama de frecuencias 100 - 400 MHz

Tipo de directividad	Accesibilidad	$EIRP_{th}$ (W)
Omnidireccional	La altura de la antena es mayor de a 3 m y es inaccesible	$\frac{f\pi}{200A_{sl}} \left(\frac{h}{a} - 2 \right)^2$
	La altura de la antena es igual a los edificios adyacentes.	$\frac{f\pi}{200A_{sl}} \left(\frac{h}{a} - 2 \right)^2$
	La altura de la antena es mayor a los edificios adyacentes.	$\frac{f\pi}{200A_{sl}} \left(\frac{h}{a} - 2 \right)^2$
	La antena tiene una zona de exclusión, círculo con radio a que rodea la antena.	$\frac{f\pi}{200A_{sl}} \left[\frac{a^2 + \left(\frac{h}{a} - 2 \right)^2}{a} \right]^2$
Directiva	La altura de la antena es mayor de a 3 m y es inaccesible	$\frac{f\pi}{200A_{sl}} \left(\frac{h}{a} - 2 \right)^2$
	La altura de la antena es igual a los edificios adyacentes.	Se necesita línea de vista
	La altura de la antena es mayor a los edificios adyacentes.	$\frac{f\pi}{200A_{sl}} \left(\frac{h}{a} - 2 \right)^2$
	La antena tiene una zona de exclusión, círculo con radio a que rodea la antena.	$\frac{f\pi}{200A_{sl}} \left[\frac{a^2 + \left(\frac{h}{a} - 2 \right)^2}{a} \right]^2$

Por otra parte, el decreto N° 35257-MINAET modificado por decreto N° 35866-MINAET, regula el uso del espectro radioeléctrico nacional, seguidamente describiremos los artículos más importantes del documento limitados a nuestra banda de trabajo, la UHF.

En el artículo 5, se especifica la división del espectro electromagnético, la cual se muestra en la tabla 3.10.

Tabla B.1.4 Condiciones de conformidad normal de las instalaciones basadas en los límites

Número de la banda	Símbolo	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior)
4	VLF	3 a 30 KHz
5	LF	30 a 300 KHz
6	MF	300 a 3000 KHz
7	HF	3 a 30 MHz
8	VHF	30 a 300 MHz
9	UHF	300 a 3000 Hz
10	SHF	3 a 30 GHz
11	EHF	30 a 300 GHz
12	--	300 a 3000 GHz

En el adendum II se expresa la tolerancia de frecuencia y atenuación de emisiones no esenciales (espurias y armónicas), las cuales son las siguientes:

Tabla B.1.5 Tolerancia de frecuencia y atenuación de emisiones no esenciales

Banda: 100 MHz a 470 MHz	
Estaciones fijas	
- potencia de 50 W o menor	20 ppm
- potencia superior a 50 W	10 ppm
Estaciones base	
- en la banda 100 MHz – 235 MHz	15 ppm
- en la banda 236 MHz – 401 MHz	7 ppm
- en la banda 402 MHz – 470 MHz	5 ppm
Banda: 471 MHz a 2450 MHz	
Estaciones fijas	
- potencia de 100 W o menor	100 ppm
- potencia superior a 100 W	50 ppm
Estaciones terrestres	20 ppm