

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA

DISEÑO DE LA RED DE TELECOMUNICACIONES DE LA ESPE
PARA EL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y ALERTA TEMPRANA
FRENTE A UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI

DIANA NATALI APOLO CÁRDENAS

SANGOLQUÍ – ECUADOR

ENERO 2011

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado "DISEÑO DE LA RED DE TELECOMUNICACIONES DE LA ESPE PARA EL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y ALERTA TEMPRANA FRENTE A UNA EVENTUAL ERUPCIÓN DEL VOLCÁN COTOPAXI", ha sido desarrollado en su totalidad por la señorita DIANA NATALI APOLO CÁRDENAS con CC: 1718393679, bajo nuestra dirección.

Atentamente,

Ing. Rodolfo Gordillo

DIRECTOR

Ing. Román Lara

CODIRECTOR

RESUMEN

El principal objetivo del presente proyecto es el diseño y simulación de la Red de Telecomunicaciones para el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi utilizando redes de sensores inalámbricos para la ESPE, ya que los resultados de una efectiva monitorización y supervisión reducirían las consecuencias económicas y sociales de dicho fenómeno y sobre todo salvaguardaría vidas humanas.

En el primer capítulo se realiza la presentación del proyecto donde se indican sus objetivos, alcance, entre otros elementos. Mientras que, en el segundo capítulo se analizan las diferentes tecnologías de telecomunicaciones que permitirán comunicar la estación de monitorización y el laboratorio de vigilancia a ser ubicado en un lugar remoto, realizando una recomendación de la tecnología más óptima a ser empleada; y se investiga el estado del arte de los sensores inalámbricos.

En el tercer capítulo se expone el fundamento teórico, ya que es importante para el diseño considerar diferentes requerimientos y parámetros del enlace inalámbrico para garantizar su comportamiento y confiabilidad.

El cuarto capítulo muestra el estudio de las características topográficas y la determinación de los puntos estratégicos para el diseño de dicho enlace tanto en el campus politécnico de la ESPE, en el IASA y en el Volcán Cotopaxi. Además, se establecen los parámetros de diseño, los requerimientos y la estructura de la red de transporte y de la red de sensores. Dicha información permitirá el desarrollo de la simulación usando el *Software Sirenet 3.0* y *Network Simulator 2.33* para determinar el desempeño y viabilidad de dichas redes.

Finalmente, en el quinto capítulo se despliegan las conclusiones y recomendaciones sobre el desarrollo y análisis del presente proyecto.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado y toda mi carrera universitaria a Dios porque sin Él nada es posible; a mis padres, Dandy y Mary, por su amor, paciencia y apoyo incondicional; a mis hermanas, Tatiana y Camila, que son la razón de mi vida; y a todas las personas que me han brindado su amistad, comprensión y ayuda.

Diana Natali

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia por estar presente incondicionalmente y por convertirse en mi fuerza para seguir a delante.

A los directores de tesis: Ing. Rodolfo Gordillo e Ing. Román Lara, ya que con sus conocimientos y orientación me permitieron formarme como investigadora y gracias a sus aportes he logrado la finalización del presente proyecto.

Al Ing. Gonzalo Olmedo por ser un excelente profesional y maestro, que se ha ganado mi respeto y admiración.

Y de manera especial agradezco al futuro ingeniero, Jorge Brito, quien durante mi carrera universitaria me brindó su apoyo y comprensión.

PRÓLOGO

La presente investigación se la va realizar debido a que la Red de Telecomunicaciones de la ESPE para el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi tiene gran importancia, ya que dicha erupción podría producir un impacto socioeconómico de gran magnitud, y además, el campus politécnico se encuentra en una zona de alto riesgo. Dicho proyecto permitirá a la Escuela Politécnica del Ejército un monitorio de la actividad del volcán Cotopaxi con tecnología de punta y sistemas más robustos en comparación con los tradicionales para la generación de una alerta temprana.

Los resultados de una efectiva supervisión, monitorización y alerta temprana beneficiarían al país, a las empresas públicas, empresas privadas, al turismo pero principalmente salvaguardaría vidas humanas e infraestructuras de gran importancia que podrían causar enormes estragos a la situación económica y al ambiente como el polducto y la carretera Panamericana.

La Escuela Politécnica del Ejército se convertiría en una de las universidades del Ecuador pioneras en tecnología *Wireless Sensor Network* para generar una alerta temprana frente a una potencial erupción del volcán Cotopaxi. Y este proyecto serviría como piloto debido a la importancia que tiene y podría ser implementado a nivel nacional en los volcanes activos de la Cordillera de los Andes en el Ecuador.

La capacitación del personal en el diseño y administración de la tecnología *Wireless Sensor Network* permitirá desarrollar otros tipos de aplicaciones en situaciones de catástrofes o la evolución de ámbitos tan diversos como la medicina, la agricultura, el sector militar, la geofísica, entre otros.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación del Proyecto.....	19
1.2 Alcance.....	20
1.3 Objetivos.....	20
1.3.1 Objetivo General.....	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.4 Trabajos Relacionados.....	21
1.5 Organización del Documento.....	23

CAPÍTULO 2 SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

2.1 Sistemas de Alerta Temprana.....	25
2.2 Sistemas Inalámbricos para la Conexión ESPE – Volcán Cotopaxi.....	26
2.2.1 WiMAX.....	26
2.2.2 Wi-Fi.....	29
2.2.3 Enlace de Microondas.....	32
2.3 <i>Wireless Sensor Network (WSN)</i>	34
2.3.1 Normalización 802.15.4 y ZigBee.....	36
2.3.2 Sistema Operativo TinyOS.....	38
2.3.3 Tipos de Sensores para la Monitorización Volcánica.....	38

CAPÍTULO 3 FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 Estructura de la Red.....	39
3.1.1 Consideraciones del Enlace Volcán Cotopaxi – ESPE.....	40
3.1.2 Consideraciones del Sistema WSN para los Nodos del Volcán.....	41
3.2 Estudio de Requerimientos del Enlace.....	42

3.2.1	<i>Throughput</i> de la Red.....	42
3.2.2	Retardo de Extremo a Extremo.....	45
3.2.3	Relación de Entrega.....	45
3.3	Establecimiento de Parámetros Técnicos para la Cobertura.....	45
3.3.1	Modelos de Propagación en <i>Network Simulator 2 (NS-2)</i>	45
3.3.2	Protocolos de Enrutamiento en NS-2 para WSN.....	50
3.4	Diseño de la Red Wi-Fi.....	53
3.4.1	Pérdidas de Propagación.....	54
3.4.2	Balance de Potencia.....	59
3.5	Propagación por Difracción.....	60
3.6	Desvanecimientos.....	65
3.6.1	Mecanismos de Desvanecimientos.....	70
3.6.2	Cálculo de la Interrupción Total por Desvanecimientos.....	77
3.6.3	Técnicas de Diversidad.....	78
3.7	Diseño de la Red de Sensores.....	83

CAPÍTULO 4

PLANIFICACIÓN DE LA RED

4.1	Enlace Inalámbrico ESPE – Volcán Cotopaxi.....	84
4.1.1	Reconocimiento Topográfico del Campus de la ESPE – Sangolquí..	84
4.1.2	Reconocimiento Topográfico del IASA.....	86
4.1.3	Reconocimiento Topográfico del Volcán Cotopaxi.....	88
4.1.4	Determinación de los Parámetros Topográficos para el Enlace ESPE – Volcán Cotopaxi.....	92
4.2	Enlace WSN en el Volcán Cotopaxi.....	93
4.2.1	Reconocimiento Topográfico y Ubicación de Puntos Estratégicos en el Volcán Cotopaxi.....	94
4.3	Determinación de Equipos.....	96
4.3.1	Equipos para la Red Cotopaxi – ESPE.....	96
4.3.2	Equipos para la Red de WSN.....	97
4.4	Simulación en SIRENET.....	98
4.4.1	Simulación y Cálculo de la Red de Transporte.....	99

4.4.2 Definición de Puntos o Nodos de la Red.....	100
4.4.3 Parámetros del Transmisor.....	103
4.4.4 Parámetros del Receptor.....	106
4.4.5 Características de los Equipos.....	109
4.4.6 Simulación y Cálculos.....	111
4.4.7 Análisis Adicional.....	199
4.4.8 Comparación del Modelo de Cálculo Teórico y el Modelo de Cálculo de un Radioenlace Utilizando los Softwares Sirenet y Radio Mobile.....	206
4.5 <i>Network Simulator 2</i> y <i>TraceGraph</i>	208
4.5.1 Funcionamiento de NS-2.....	208
4.5.2 Simulación y Cálculos.....	209
4.5.3 Herramientas y Procedimiento para la Ejecutar la Simulación.....	210
4.5.4 Red de Sensamiento.....	215

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	258
5.2 Recomendaciones.....	260

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 3.1. Valores Típicos para Exponente de Pérdidas de Propagación β	49
Tabla. 3.2. Valores Típicos de la Desviación Estándar σ_{dB}	49
Tabla. 3.3. Factor Climático.....	72
Tabla. 3.4. Valor de la Constante de la Firma Digital para $BER = 10^{-3}$	77
Tabla. 3.5. Equipos de Respaldo	82
Tabla. 3.6. Características de la Red WSN.....	83
Tabla. 4.1. Alturas y Coordenadas de las Dependencias de la ESPE	85
Tabla. 4.2. Alturas y Coordenadas de Puntos Estratégicos del IASA	86
Tabla. 4.3. Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el Volcán Cotopaxi	91
Tabla. 4.4. Coordenadas del Enlace Wi-Fi Volcán Cotopaxi - ESPE.	92
Tabla. 4.5 Alternativas de Puntos Estratégicos para el Enlace de Transporte ...	100
Tabla. 4.6. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Bloque D)	101
Tabla. 4.7. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo).....	101
Tabla. 4.8. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – IASA	101
Tabla. 4.9. Coordenadas Enlace IASA - Bloque D	102
Tabla. 4.10. Coordenadas Sistema IASA – ESPE (Edificio Administrativo)	102
Tabla. 4.11. Parámetros Radio.....	104
Tabla. 4.12. Parámetros de la Antena Transmisora	105
Tabla. 4.13. Parámetros del Transmisor Servicio Fijo.....	106
Tabla. 4.14. Parámetros del Receptor.....	107
Tabla. 4.15. Parámetros de la Antena Receptora	108
Tabla. 4.16. Parámetros del Receptor Servicio Fijo	108
Tabla. 4.17. Especificaciones Técnicas del Equipo de Transmisión y Recepción	109
Tabla. 4.18. Especificaciones Técnicas de la Antena	109
Tabla. 4.19. Especificaciones Técnicas del Cable Coaxial	110
Tabla. 4.20. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Bloque D)	119
Tabla. 4.21. Perfil Cotopaxi 1 – Bloque D	119

Tabla. 4.22. Características del Enlace.....	123
Tabla. 4.23. Características del Perfil.....	123
Tabla. 4.24. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha= 2$	130
Tabla. 4.25. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha= 1.5$	131
Tabla. 4.26. Altura de Estaciones.....	132
Tabla. 4.27. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo).....	143
Tabla. 4.28. Perfil Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo	143
Tabla. 4.29. Características del Enlace	148
Tabla. 4.30. Características del Perfil.....	148
Tabla. 4.31. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha= 2$	155
Tabla. 4.32. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha= 1.5$	156
Tabla. 4.33. Altura de Estaciones.....	157
Tabla. 4.34. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 2	170
Tabla. 4.35. Características del Perfil.....	175
Tabla. 4.36. Resultado de Cálculos del Enlace Cotopaxi 1 – IASA 2.....	175
Tabla. 4.37. Perfil IASA 2 – Bloque D	184
Tabla. 4.38. Características del Perfil.....	187
Tabla. 4.39. Resultado de Cálculos del Enlace IASA 2 – ESPE (Bloque D)	187
Tabla. 4.40. Perfil IASA 2 – Edificio Administrativo	196
Tabla. 4.41. Características del Perfil.....	199
Tabla. 4.42. Resultado de Cálculos del Enlace IASA 2 – ESPE (Edificio Administrativo).....	199
Tabla. 4.43. Correspondencia Entre los Niveles de Señal Según S y el Margen de Umbral (Mu)	202
Tabla. 4.44. Comparación Entre el Modelo de Cálculo Teórico y el Modelo de Cálculo con los Software Utilizados	206
Tabla. 4.45. Resultados de Simulación	207
Tabla. 4.46. Características de la Red de Sensores para el Caso I	220
Tabla. 4.47. Características de la Simulación	221
Tabla. 4.48. Resultados Obtenidos	224
Tabla. 4.49. Información del <i>Delay End-To-End</i> para el Caso I	231
Tabla. 4.50. Información del <i>Delivery Ratio</i> para el Caso I	232
Tabla. 4.51. Número de Paquetes para el Caso I	233

Tabla. 4.52. Comportamiento de Cada Nodo WSN para una Potencia de Transmisión de 60 [mW]	235
Tabla. 4.53. Características de la Red de Sensores para el Caso II	236
Tabla. 4.54. Características de la Simulación	237
Tabla. 4.55. Resultados Obtenidos para el Caso II	239
Tabla. 4.56. Información del <i>Delay End-To-End</i> para el Caso II	246
Tabla. 4.57. Información del <i>Delivery Ratio</i> para el Caso II	247
Tabla. 4.58. Número de Paquetes para el Caso II	248
Tabla. 4.59. Comportamiento de Cada Nodo WSN para una Potencia de Transmisión de 1 [mW]	250
Tabla. 4.60. Análisis del Desempeño de los Escenarios de Simulación	257

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 3.1. Diagrama de la Red de Transporte	40
Figura. 3.2. Elementos de un Radio Enlace	54
Figura. 3.3. Diagrama Explicativo de las Zonas de Fresnel	55
Figura. 3.4. Despeje	58
Figura. 3.5. Modelo de Filo de Cuchillo para un Obstáculo.....	61
Figura. 3.6. Obstáculo Redondeado.....	63
Figura. 3.7. Ducto de Superficie	65
Figura. 3.8. Ducto Elevado	65
Figura. 3.9. Margen de Desvanecimiento.....	66
Figura. 3.10. Margen de Desvanecimiento.....	67
Figura. 3.11. Mecanismos de Desvanecimientos	70
Figura. 3.12. Determinación de Alturas para el Cálculo del Coeficiente de Rugosidad.	73
Figura. 3.13. Simulador del Canal de Dos Rayos.....	74
Figura. 3.14. Firma Digital	75
Figura. 3.15. Diversidad de Espacio.....	78
Figura. 3.16. Diversidad de Frecuencia.....	81
Figura. 3.17. Diversidad de Espacio y Frecuencia	82
Figura. 4.1. Ubicación de las Diferentes Dependencias de la ESPE.....	85
Figura. 4.2. Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el IASA	87
Figura. 4.3. Ubicación Geográfica del Parque Nacional Cotopaxi.....	88
Figura. 4.4. Refugio José Rivas – Parque Nacional Cotopaxi.....	90
Figura. 4.5. Ubicación del Refugio José Rivas – Volcán Cotopaxi	90
Figura. 4.6. Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el Volcán Cotopaxi	91
Figura. 4.7. Enlace ESPE – Refugio José Rivas.....	92
Figura. 4.8. Ubicación de las Estaciones del Enlace Wi-Fi Volcán Cotopaxi - ESPE.....	93
Figura. 4.9. Sirenet 3.0.....	99
Figura. 4.10. Parámetros de Identificación del Transmisor SIRENET.....	103

Figura. 4.11. Parámetros del Radio Transmisor SIRENET	104
Figura. 4.12. Parámetros de la Antena SIRENET	104
Figura. 4.13. Parámetros de Servicio Fijo	105
Figura. 4.14. Parámetros de Identificación del Receptor SIRENET	106
Figura. 4.15. Parámetros del Radio del Receptor SIRENET	107
Figura. 4.16. Parámetros de la Antena SIRENET	107
Figura. 4.17. Parámetros de Servicio Fijo	108
Figura. 4.18. Cable Coaxial	110
Figura. 4.19. Enlace Cotopaxi – ESPE (Bloque D).....	112
Figura. 4.20. Enlace Cotopaxi – ESPE (Bloque D) en el Software SIRENET	112
Figura. 4.21. Perfil Cotopaxi 1 – Bloque D	113
Figura. 4.22. Perfil Cotopaxi 2 – Bloque D	114
Figura. 4.23. Parámetros de Análisis del Vano	115
Figura. 4.24. Análisis del Vano Cotopaxi – Bloque D	116
Figura. 4.25. Pérdidas del Enlace	116
Figura. 4.26. Indisponibilidad del Enlace.....	117
Figura. 4.27. Calidad del Enlace	117
Figura. 4.28. Reflexión del Enlace.....	117
Figura. 4.29. Precipitación del Enlace	118
Figura. 4.30. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	118
Figura. 4.31. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	119
Figura. 4.32. Perfil de enlace Cotopaxi – ESPE (Bloque D).....	122
Figura. 4.33. Ángulo de Elevación Cotopaxi – ESPE	132
Figura. 4.34. Ángulo de apuntamiento y Azimut.....	133
Figura. 4.35. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)	136
Figura. 4.36. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo) en el Software SIRENET.....	136
Figura. 4.37. Perfil Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo	137
Figura. 4.38. Perfil Cotopaxi 2 – Edificio Administrativo	138
Figura. 4.39. Parámetros de Análisis del Vano	139
Figura. 4.40. Análisis del Vano Cotopaxi – Edificio Administrativo.....	140
Figura. 4.41. Pérdidas del Enlace	140

Figura. 4.42. Disponibilidad del Enlace.....	141
Figura. 4.43. Calidad del Enlace	141
Figura. 4.44. Reflexión del Enlace.....	141
Figura. 4.45. Precipitación del Enlace	142
Figura. 4.46. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	142
Figura. 4.47. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	143
Figura. 4.48. Perfil de Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)	147
Figura. 4.49. Enlace Cotopaxi – IASA	159
Figura. 4.50. Enlace Cotopaxi – IASA en el Software SIRENET	160
Figura. 4.51. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 1 con una Altura de Rx de 12 [m].....	161
Figura. 4.52. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 1 con una Altura de Rx de 20 [m].....	162
Figura. 4.53. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 2 con una Altura de Rx de 12 [m].....	163
Figura. 4.54. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 2 con una Altura de Rx de 20 [m].....	164
Figura. 4.55. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 3 con una Altura de Rx de 12 [m].....	165
Figura. 4.56. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 3 con una Altura de Rx de 20 [m].....	166
Figura. 4.57. Parámetros de Análisis del Vano	166
Figura. 4.58. Análisis del Vano Cotopaxi – IASA.....	167
Figura. 4.59. Pérdidas del Enlace	168
Figura. 4.60. Disponibilidad del Enlace.....	168
Figura. 4.61. Calidad del Enlace	168
Figura. 4.62. Reflexión del Enlace.....	169
Figura. 4.63. Precipitación del Enlace	169
Figura. 4.64. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	170
Figura. 4.65. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	170
Figura. 4.66. Perfil de Enlace Cotopaxi – IASA.....	174
Figura. 4.67. Enlace IASA – Bloque D	176
Figura. 4.68. Enlace IASA – ESPE (Bloque D) en el Software SIRENET	176
Figura. 4.69. Perfil IASA 1 – Bloque D, con una Altura de Tx de 20 [m]	177
Figura. 4.70. Perfil IASA 2 – Bloque D, con una Altura de Tx de 20 [m]	178
Figura. 4.71. Perfil IASA 3 – Bloque D, con una Altura de Tx de 20 [m]	179

Figura. 4.72. Parámetros de Análisis del Vano	180
Figura. 4.73. Análisis del Vano IASA – Bloque D	180
Figura. 4.74. Pérdidas del Enlace	181
Figura. 4.75. Indisponibilidad del Enlace.....	181
Figura. 4.76. Calidad del Enlace	182
Figura. 4.77. Reflexión del Enlace.....	182
Figura. 4.78. Precipitación del Enlace	182
Figura. 4.79. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	183
Figura. 4.80. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	183
Figura. 4.81. Perfil del Enlace IASA – ESPE (Bloque D).....	186
Figura. 4.82. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)	188
Figura. 4.83. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo) en el Software Sirenet.....	188
Figura. 4.84. Perfil IASA 1 – Edificio Administrativo, con una Altura de Tx de 20 [m]	189
Figura. 4.85. Perfil IASA 2 – Edificio Administrativo, con una Altura de Tx de 20 [m]	190
Figura. 4.86. Perfil IASA 3 – Edificio Administrativo, con una Altura de Tx de 20 [m]	191
Figura. 4.87. Parámetros de Análisis del Vano	192
Figura. 4.88. Análisis del Vano IASA – Edificio Administrativo.....	193
Figura. 4.89. Pérdidas del Enlace	193
Figura. 4.90. Indisponibilidad del Enlace.....	194
Figura. 4.91. Calidad del Enlace	194
Figura. 4.92. Reflexión del Enlace.....	194
Figura. 4.93. Precipitación del Enlace	195
Figura. 4.94. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	195
Figura. 4.95. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel.....	196
Figura. 4.96. Perfil del Enlace IASA – ESPE (Edificio Administrativo)	198
Figura. 4.97. Perfil y Resultados del Enlace Cotopaxi – Bloque D	200

Figura. 4.98. Características del Radioenlace Cotopaxi 1 – Bloque D	201
Figura. 4.99. Características del Radioenlace Bloque D - Cotopaxi 1.....	201
Figura. 4.100. Umbral de Recepción.....	201
Figura. 4.101. Despeje de la Zona de Fresnel del Enlace Cotopaxi – Bloque D	202
Figura. 4.102. Nivel de la Señal del Enlace Cotopaxi 1 – Bloque D	203
Figura. 4.103. Distribución Estadística del Margen de Umbral.....	203
Figura. 4.104. Perfil y Resultados del Enlace Cotopaxi – Edificio Administrativo	204
Figura. 4.105. Características del Radioenlace Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo	204
Figura. 4.106. Características del Radioenlace Edificio Administrativo – Cotopaxi 1	204
Figura. 4.107. Umbral de Recepción.....	205
Figura. 4.108. Despeje de la Zona de Fresnel del Enlace Cotopaxi – Edificio Administrativo.....	205
Figura. 4.109. Nivel de la Señal del Enlace Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo	205
Figura. 4.110. Distribución Estadística del Margen de Umbral.....	206
Figura. 4.111. Procedimiento de Simulación.....	208
Figura. 4.112. Herramientas Utilizadas	210
Figura. 4.113. Iniciando Cygwin	211
Figura. 4.114. Corrida del Programa NS	211
Figura. 4.115. Visualización Gráfica de la Simulación.....	212
Figura. 4.116. Conversión del Archivo .TR en .TG.....	213
Figura. 4.117. Análisis en Trgraph de Matlab.....	213
Figura. 4.118. Abriendo el Archivo .Tg	214
Figura. 4.119. a) Visualización en 3D; b) Visualización en 2D; c) Visualización Mediante Histograma	215
Figura. 4.120. <i>Throughput</i> Real de la Red vs. Número de Nodos.....	216
Figura. 4.121. Escenario de Simulación para la Red de Sensores	217
Figura. 4.122. Escenario del Nodo 1	218
Figura. 4.123. Escenario del Nodo 0	218
Figura. 4.124. Escenario del Nodo 2	219
Figura. 4.125. Escenario del Nodo 3	219
Figura. 4.126. Información de NS.....	222
Figura. 4.127. Propagación de Ondas e Intercambio de Paquetes	223

Figura. 4.128. <i>Network Information</i>	223
Figura. 4.129. Suma Acumulada del Número de Paquetes	225
Figura. 4.130. Suma Acumulada del Número de Bytes para Diferentes Eventos	225
Figura. 4.131. <i>Throughput</i> de los Bits Generados.....	228
Figura. 4.132. <i>Throughput</i> de los Bits Enviados.....	229
Figura. 4.133. <i>Throughput</i> de los Bits Recibidos.....	229
Figura. 4.134. <i>Throughput</i> de los Bits Reenviados.....	230
Figura. 4.135. <i>Throughput</i> de los Bits Caídos	230
Figura. 4.136. Distribución de Frecuencia de <i>Delay End-To-End</i>	231
Figura. 4.137. Análisis de los Paquetes para el Caso I	233
Figura. 4.138. Información de NS.....	238
Figura. 4.139. <i>Network Information</i>	238
Figura. 4.140. Suma Acumulada del Número de Paquetes	240
Figura. 4.141. Suma Acumulada del Número de Bytes para Diferentes Eventos	240
Figura. 4.142. <i>Throughput</i> de los Bits Generados.....	243
Figura. 4.143. <i>Throughput</i> de los Bits Enviados.....	244
Figura. 4.144. <i>Throughput</i> de los Bits Recibidos.....	244
Figura. 4.145. <i>Throughput</i> de los Bits Reenviados.....	245
Figura. 4.146. <i>Throughput</i> de los Bits Caídos	245
Figura. 4.147. Distribución de Frecuencia de <i>Delay End-To-End</i>	246
Figura. 4.148. Análisis de los Paquetes para el Caso II	248
Figura. 4.149. Número de Paquetes Generados.....	251
Figura. 4.150. Número de Paquetes Enviados.....	252
Figura. 4.151. Número de Bytes Enviados.....	252
Figura. 4.152. Número de Paquetes Recibidos.....	253
Figura. 4.153. Número de Bytes Recibidos.....	254
Figura. 4.154. Número de Paquetes Caídos	254
Figura. 4.155. Número de Bytes Caídos	255
Figura. 4.156. Tamaño Mínimo del Paquete	255
Figura. 4.157. Tamaño Máximo del Paquete.....	256
Figura. 4.158. Promedio del Tamaño del Paquete	256

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación del Proyecto

Ecuador es considerado como uno de los países con mayor actividad volcánica, siendo el Cotopaxi el volcán activo más alto (5897 msnm) y uno de los más peligrosos debido a que su erupción se caracteriza por la generación de grandes y destructivos lahares, y por caídas de piroclastos y ceniza.

Este fenómeno produce un impacto socioeconómico de gran magnitud, ya que se han presentado numerosas erupciones que han destruido los valles cercanos y es muy probable que su actividad futura sea de magnitud moderada a grande debido a que el volcán Cotopaxi hace varios siglos se encuentra en una fase de erupciones andesítica (erupciones leves a moderadas)[1]. Los estudios de alerta temprana en caso de una erupción del volcán Cotopaxi, por parte del Ecuador, son escasos y no cuentan con tecnología de punta para una rápida respuesta, sin embargo, se han presentado investigaciones a cargo de universidades extranjeras como las realizadas por la Universidad de Harvard, New Hampshire, North Carolina y por el Instituto Geofísico, donde se impulsa la tecnología inalámbrica para generar una alerta temprana que permite reducir la vulnerabilidad tanto humana como económica. Basados en este sistema se desea desarrollar una Red de Transporte y una Red de Sensores Inalámbricos que permitan a la Escuela Politécnica del Ejército una monitorización de la actividad del volcán Cotopaxi y la generación de una alerta temprana, ya que el campus politécnico se encuentra en una zona de alto riesgo. El diseño con llevaría una red con tecnología de punta y sistemas más robustos y confiables con

sensores y nodos de menor tamaño y peso, y que consumen menos energía en comparación con los nodos tradicionales, por lo tanto, la Red de Sensores Inalámbricos permitirá mayor efectividad y capacidad, menor vulnerabilidad a fallas del sistema y una mejor monitorización en condiciones ambientales adversas. Y mediante la elección de la mejor tecnología de comunicaciones se diseñará el enlace Volcán Cotopaxi – ESPE que permitirá el transporte de la información otorgada por la red de sensores.

Los resultados de una efectiva supervisión, monitorización y alerta temprana beneficiarían al país, a las empresas públicas, empresas privadas, al turismo pero principalmente salvaguardaría vidas humanas e infraestructuras de gran importancia que podrían causar enormes estragos a la situación económica y al ambiente.

1.2 Alcance

Mediante la elección de la mejor tecnología de comunicaciones se diseñará el enlace ESPE – Volcán Cotopaxi que permitirá el transporte de la información otorgada por la red de sensores. Se realizará la simulación de dicha red empleando la herramienta de Sirenet.

La red *Wireless Sensor Network* (WSN) a ser desplegada en el Volcán Cotopaxi será diseñada en base al conocimiento del espacio en el que se desarrollará el proyecto y será simulada utilizando el software *Network Simulator* (NS) o *Toolbox* de Matlab.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y simular una Red de Telecomunicaciones para el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi utilizando redes de sensores inalámbricos para la ESPE.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Establecer las principales ventajas de las redes de sensores inalámbricos en la implementación de un sistema de alerta temprana.
- Definir características del terreno y topográficas para establecer la red de transporte y la red de sensores.
- Diseñar una red de sensores que permitan registrar la actividad volcánica.
- Diseñar un enlace que permita establecer una monitorización del volcán Cotopaxi desde un punto de vigilancia en la ESPE.
- Simular el enlace ESPE – Volcán Cotopaxi empleando la herramienta de Sirenet.
- Simular la estructura de la red de sensores utilizando NS-2 o *Toolbook* de Matlab.

1.4 Trabajos Relacionados

Este proyecto con el objetivo de monitorizar la actividad del Volcán Cotopaxi y transmitir dichos datos de una manera fiable a los laboratorios de vigilancia se ha basado en el desarrollo de diferentes investigaciones y estudios de los sensores inalámbricos en aplicaciones de monitorización volcánica realizadas por universidades extranjeras.

En julio de 2004 [2] miembros de las Universidades de Harvard, New Hampshire y North Carolina implementaron la tecnología WSN en el Volcán Tungurahua, la cual estaba compuesta por sensores acústicos de baja frecuencia (102 [Hz]) y por una estación remota ubicada a 9 [km] de distancia respecto de la estación transmisora. Durante tres días los nodos equipados con micrófonos recogieron datos continuos de la actividad del Volcán Tungurahua, dichos nodos fueron sincronizados en el tiempo utilizando receptores GPS. Además, se desarrollaron detectores de eventos que permitieron la evaluación de la utilización de la energía y ancho de banda de manera eficiente.

Un segundo estudio desarrollado por el mismo grupo de investigadores anteriormente mencionados, implementó una red de mayor capacidad en el Volcán Reventador en el año 2005 [3]. Dicha red estaba compuesta por dieciséis nodos equipados con sensores semiacústidos, sismómetros y micrófonos, los cuales fueron desplegados en más de 3 [km]. La información recolectada fue transmitida mediante equipos de radio a la estación remota ubicada a unos 10 [km] de la estación transmisora. Los resultados de los eventos capturados pudieron ser estudiados a detalle gracias a una herramienta GUI utilizada para desplegar dichos datos.

Los estudios realizados en [2] y [3], han impulsado la tecnología WSN basada en el estándar IEEE 802.15 para la implementación de sistemas de monitorización vulcanológico, ya que se presenta como una solución viable con sistemas dinámicos más robustos y confiables con sensores y nodos de menor tamaño y peso, y que consumen menos energía en comparación con los nodos tradicionales, lo que implica reducción de costos. Además, permite mayor efectividad y capacidad, menor vulnerabilidad a fallas del sistema y una mejor monitorización de variables de distinta índole en condiciones ambientales adversas.

Las redes inalámbricas de sensores también permiten utilizar gran cantidad de nodos inclusive en el orden de miles cubriendo un amplio espacio de cientos de metros. Sin embargo, es necesario establecer la cantidad de nodos requerida para obtener información suficiente que ayude a realizar la supervisión y monitorización de un volcán; por ello basados en los resultados obtenidos de la simulación de la transmisión de información variando el número de nodos activos [4], que indican que el *Throughput* real de la red es directamente proporcional al incremento del número de nodos, y del análisis de las investigaciones desarrolladas en [2] y [3], se deduce que se requieren al menos entre diez y dieciséis nodos en promedio para obtener información suficiente que ayude a realizar la monitorización de un volcán.

Para establecer la tecnología de telecomunicaciones más adecuada para la transmisión de los datos adquiridos desde la estación de monitorización a la

estación de vigilancia, se basó en diferentes estudios donde indican que actualmente el estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi) para largas distancias con MAC alternativo se presenta como una solución madura, gestionable y estable, mientras que WiMAX se la considera una solución viable pero a un futuro mediano debido a las complicaciones existentes en el desarrollo de las radiobases y terminales de usuarios en las bandas no licenciadas de 5 [GHz], sumado a su alto costo [25] [26]. Por lo que, para la red de transporte se ha considerado el estándar IEEE 802.11 con MAC alternativo en la banda de 2.4 [GHz] como la alternativa más óptima y para la reducción de costos se pretende utilizar un nodo Wi-Fi de exteriores de larga distancia autoconstruido basándose en los estudios realizados en [59].

1.5 Organización del Documento

Capítulo 1

En el primer capítulo se realiza la presentación del proyecto donde se indican sus objetivos, alcance, entre otros elementos.

Capítulo 2

En el segundo capítulo se analizan las diferentes tecnologías de telecomunicaciones que permitirán comunicar la estación de monitorización y el laboratorio de vigilancia a ser ubicado en un lugar remoto, realizando una recomendación de la tecnología más óptima a ser empleada; y se investiga el estado del arte de los sensores inalámbricos.

Capítulo 3

En el tercer capítulo se expone el fundamento teórico, ya que es importante para el diseño considerar diferentes requerimientos y parámetros del enlace inalámbrico para garantizar su comportamiento y confiabilidad.

Capítulo 4

El cuarto capítulo muestra el estudio de las características topográficas y la determinación de los puntos estratégicos para el diseño de dicho enlace tanto en el campus politécnico de la ESPE, en el IASA y en el Volcán Cotopaxi. Además, se establecen los parámetros de diseño, los requerimientos y la estructura de la red de transporte y de la red de sensores. Dicha información permitirá el desarrollo de la simulación usando el *Software Sirenet 3.0* y *Network Simulator 2.33* para determinar el desempeño y viabilidad de dichas redes.

Capítulo 5

En el quinto capítulo se despliegan las conclusiones y recomendaciones sobre el desarrollo y análisis del presente proyecto.

CAPÍTULO 2

2. SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

2.1. Sistemas de Alerta Temprana [5]

Los sistemas de alerta temprana permiten desarrollar la capacidad de respuesta a todo tipo de catástrofes naturales, ya sean estas erupciones volcánicas, huracanes, incendios forestales, inundaciones, terremotos, tsunamis, entre otros. Estos sistemas demandan una rápida transmisión de datos, información de alta fidelidad y capacitación adecuada de la población ubicada en la zona de riesgos.

Debido a los avances científicos y a la evolución de las telecomunicaciones, estas toman un papel de gran importancia en la prevención, coordinación y monitorización de catástrofes reduciendo sus consecuencias negativas con un plan de emergencia a tiempo.

El seguimiento de variables permite el estudio y análisis de fenómenos naturales para generar un sistema de prevención y alerta temprana, que gracias a las telecomunicaciones se puede disminuir el impacto socioeconómico.

La tecnología inalámbrica transporta la información remota a estaciones bases y se aplica principalmente en zonas de difícil acceso o donde la comunicación por cable es limitada. Además, ahora es posible establecer matrices compuestas por nodos de sensores inalámbricos que permiten el desarrollo de estudios científicos que no son viables con los instrumentos tradicionales.

Por lo tanto, el diseño de redes de telecomunicaciones en combinación con sistemas de alerta temprana frente a catástrofes naturales ofrece un tiempo de respuesta de vital importancia para salvaguardar vidas humanas e infraestructuras que podrían causar enormes estragos a la situación económica y al ambiente.

2.2. Sistemas Inalámbricos para La Conexión ESPE – Volcán Cotopaxi

2.2.1. WiMAX [6]

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es una tecnología inalámbrica de última milla basada en el estándar IEEE 802.16 que permite un alto nivel de interoperabilidad entre dispositivos y acceso por banda ancha en grandes áreas.

En la Tabla. 2.1 se muestran las características de la familia de estándares WiMAX.

Tabla. 2.1 Familia de Estándares de WiMAX

ESTÁNDAR	802.16	802.16d	802.16e
Ancho de banda [MHz]	20, 25 y 28	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75.	1.75, 3.5, 7, 14, 1.25, 5, 10, 15, 8.75.
Banda de Frecuencias [GHz]	10 a 66 (Sin licencia).	2 a 66 (Con o sin licencia).	2 a 11 (Para fijo), 2 a 6 (Para móvil).
Interferencia	Sin licencia: diferentes sistemas de RF, redes rivales de WiMAX, puntos de acceso de Wi-Fi.		
Tasa de bit	32 -134.4 Mbps con canales de 28 MHz.	1 - 75 Mbps con canales de 20 MHz	1- 75 Mbps con canales de 5 MHz.
Sistemas de modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM.	QPSK, 16 QAM, 64 QAM.	QPSK, 16 QAM, 64 QAM.
Sistemas de Multiplexación	TDM, TDMA	TDM, TDMA, OFDMA	TDM, TDMA, OFDMA
Sistemas de Duplexación	TDD, FDD	TDD, FDD	TDD, FDD
Sistemas de Transmisión	Single Carrier.	Single Carrier, 256 OFDM o 2.048 OFDM.	Single Carrier, 256 OFDM o SFDMA con 128, 512, 1.024 o 2.048 portadoras.
Distancia máxima [km]	2 a 5	6 a 10	7 a 8
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Arquitectura MAC	PMP, mesh.	PMP, mesh.	PMP, mesh.
Requerimientos	LOS.	10 a 66 GHz requiere LOS. 11 GHz soporta NLOS.	NLOS.
Compatibilidad	Compatibilidad con WiMAX MAN (acceso) y Wi-Fi LAN (distribución).	Compatibilidad con WiMAX MAN (acceso), Wi-Fi (distribución), Ethernet y Token Ring.	No compatible con IEEE 802.16d

Características

WiMAX es una tecnología para sistemas de acceso inalámbrico de banda ancha que ofrece distintos servicios como IP, VoIP, voz tradicional, video, datos, servicios conmutados, interconexiones ATM y *Frame Relay*, e incorpora QoS. Además, puede utilizar espectros con o sin licencia.

Permite el acceso a largas distancias principalmente a zonas rurales y geoméricamente inaccesibles y puede establecer conexiones punto-punto, punto-multipunto y malla con un alcance de 20 [km] sin línea de vista y de 4 a 6 [km] en áreas de alta densidad demográfica, es decir, su cobertura abarca redes WMAN.

Soporta sistemas de duplexación TDD y FDD y utiliza la modulación OFDM, ya que genera más altos *Throughput* por medio de la subcanalización y puede eliminar la interferencia intersimbólica (ISI).

Seguridad [7]

La gestión de seguridad para redes WiMAX abarca autenticación, encriptación con certificación x.509 y cifrado de datos basados en los estándares 3DES (128 bits), AES (192 bits) y RSA (1024 bits).

El estándar x.509 emite certificados digitales a usuarios finales específicos para el uso de llaves públicas, para la validación de rutas y para identificar y autorizar a los usuarios de la red.

Los protocolos 3DES, AES y RSA mediante el cifrado y autenticación de datos evita la introducción de usuarios no autorizados. Además, la capa MAC basada en el protocolo *Privacy Key Management* permite un acceso seguro y privacidad.

Ventajas

- WiMAX posee mayor ancho de banda, eficiencia espectral y cobertura que las redes Wi-Fi debido a que soporta “antenas inteligentes”. Además, la tasa de transmisión de un sistema WiMAX es mayor que la de un ADSL.
- Al utilizar espectros con o exentos de licencia permite mayor capacidad de la red y escalabilidad, ya que las frecuencias de radios se caracterizan por ser flexibles y a medida que aumente el número de abonados por medio de la sectorización se puede reasignar el espectro.
- Este sistema es menos costoso que la implementación de tecnologías ADSL, ya que no se requiere de la instalación de cableado y todos los costos que eso implica. Y se lo puede aplicar en zonas donde la comunicación por cable no es posible.
- La seguridad de la tecnología WiMAX es mucho más robusta que otras tecnologías inalámbricas como Wi-Fi.

Desventajas

- La aplicación de espectros sin licencia tiene mayores interferencias con otros sistemas RF y pueden presentar mayores niveles de latencia.
- Existen limitaciones en la potencia de transmisión por parte de organismos reguladores del gobierno para evitar interferencias entre sistemas, por lo que no se podría aplicar el recurso de que a una mayor potencia de transmisión se puede compensar las pérdidas de propagación de la señal.
- Otra desventaja es el alto consumo de energía de los dispositivos.

2.2.2. Wi-Fi [8]

Wi-Fi proviene de la abreviatura de “*Wireless Fidelity*” y hace referencia a la tecnología de comunicación inalámbrica mediante ondas de radio, que nace con el fin de conseguir una comunicación por RF a velocidades de datos más altas basada en el estándar IEEE 802.11.

En la Tabla. 2.2 se muestran los diversos tipos de comunicación Wi-Fi:

Tabla. 2.2. Familia de Estándares de Wi-Fi

ESTÁNDAR	802.11	802.11b	802.11g	802.11a	802.11n
Ancho de banda [Mbps]	2	11	54	54	300
Banda de Frecuencias [GHz]	2.4 (Sin licencia).	2.4 (Sin licencia).	2.4 (Sin licencia).	5 (Sin licencia).	2.4 y 5 (Sin licencia).
Sistemas de modulación	FHSS, DSSS.	DSSS.	DSSS, OFDM.	OFDM.	BPSK, QPSK y QAM.
Distancia máxima [m]	150	150	50	50	500
Interferencia	Hornos microonda, dispositivos Bluetooth, teléfonos DECT.				Otras redes Wi-Fi.
Compatibilidad		Compatible con quipos DSSS del estándar 802.11.	Compatible con 802.11b.	No compatible con 802.11b y 802.11g.	Compatible con dispositivos basados en todas las ediciones anteriores de Wi-Fi.

Características

Los sistemas Wi-Fi no requieren de cables para su implementación y tiene como objetivo la interoperabilidad en conexiones de área local. Además, el estándar 802.11 involucra varias técnicas de transmisión como: Modulación por Saltos de Frecuencia (FHSS), Espectro de Extensión de Secuencia Directa (DSSS), Multiplexación por División en Frecuencias Octogonales (OFDM) [9].

Esta tecnología inalámbrica posee dos tipos de topología: Red Ad-Hoc y Red Modo Infraestructura. La primera se aplica a un grupo de ordenadores que carece de un punto de acceso y que se comunican entre sí a través de señales de radio. Mientras que la Red Modo de Infraestructura se gestiona y administra el envío de paquetes mediante un AP [10].

Permite únicamente la transmisión de datos y la velocidad de conexión puede ser de 11 [Mbps] o superior en ambientes cerrados cuyo radio de cobertura es de 20 a 50 [m] mientras que para exterior abarca cientos de metros, por lo que está orientada a redes WLAN. Sin embargo, debido a los últimos avances que ha logrado esta tecnología para largas distancias y con MAC modificable, permite desarrollar enlaces mayores a 100 [km] en zonas rurales con una buena transmisión.

A causa de las interferencias y de la congestión que se producen en la banda 2.4 [GHz] se incluyó la banda de 5 [GHz] para aumentar la capacidad del canal y el ancho de banda [11].

Seguridad

La vulnerabilidad que presenta este tipo de redes es alta; por ello es necesario establecer medidas de seguridad que permitan la protección y privacidad de datos.

Es recomendable la habilitación de la encriptación de los datos de transmisión haciéndolos ininteligible para otros usuarios de la red, el filtrado de direcciones MAC, desconexión de la difusión de nombres de redes (SSID), cambio periódico de la claves de encriptación, lo cual es posible debido a las especificaciones del estándar 802.11i y sistemas más robustos como el WAP y WAP2.

Además, la tecnología VPN, autenticación *Radius* y 802.1x ofrecen seguridades más robustas para el control y bloque de usuarios no autorizados [12].

Ventajas [13]

- La tecnología Wi-Fi hace uso de espectros exentos de licencia lo que permite mayor facilidad de despliegue y expansión de la red.

- La red permite a sus suscriptores movilidad y comodidad de conectarse en cualquier lugar dentro del área de cobertura sin ser dependientes de las limitaciones del cableado.
- Los dispositivos Wi-Fi se encuentran altamente disponibles en el mercado y se caracterizan por ser interoperables.
- Su costo de implementación disminuye gracias a que no requiere de la instalación de cableado

Desventajas [13]

- Al utilizar una banda sin licencia, esta tecnología tiene mayor vulnerabilidad ante las interferencias, ya que varios dispositivos hacen uso de la misma frecuencia como: hornos microonda, Bluetooth, teléfonos DECT y otras redes Wi-Fi. Además, presenta una limitante de 10 [mW] de potencia de transmisión.
- Su velocidad es menor en comparación con redes cableadas. Además, la capacidad y transferencia de datos es directamente proporcional a la cercanía al punto de acceso, es decir, mientras más cerca esté el usuario del punto de acceso mayor capacidad tendrá.
- En la práctica los rangos de cobertura para las redes Wi-Fi con los estándares 802.11b o 802.11g alcanza los 45 [m] en interiores y 90 [m] en exteriores.
- Los dispositivos Wi-Fi tienen un alto consumo de energía y no son compatibles con UMTS, GPRS, Bluetooth, etc.
- El estándar de seguridad WEP no ha sido lo suficientemente robusto para impedir la desencapsulación de claves y el ingreso de intrusos a la

red. Sin embargo, esta tecnología ha tratado de fortalecer su seguridad mediante el uso de WAP.

2.2.3. Enlace de Microondas

El radio enlace de microondas permite la conexión extremo a extremo en línea de vista dentro del espectro SHF pudiendo ser la onda transmitida analógica o digital [14].

En la Tabla. 2.3 se muestran las principales características de las bandas en comunicaciones no guiadas:

Tabla. 2.3. Características de las Bandas en Comunicaciones No Guiadas [15]

Banda de Frecuencia	Nombre	Datos Analógicos		Datos Digitales		Aplicaciones Principales
		Modulación	Ancho de Banda	Modulación	Velocidad de Transmisión	
30 – 300 kHz	LF (Frecuencia Baja)	Normalmente no se usa.		ASK, FSK, MSK.	0.1 para 100 bps.	Navegación.
300 – 3000 kHz	MF (Frecuencia Media)	AM.	Para 4 kHz.	ASK, FSK, MSK.	10 para 1000 bps.	Radio AM comercial.
3 – 30 MHz	HF (Frecuencia Alta)	AM, SSB.	Para 4 kHz.	ASK, FSK, MSK.	10 para 3000 bps.	Radio de onda corta.
30 – 300 MHz	VHF (Frecuencia Muy Alta)	AM, SSB, FM.	5 kHz para 5MHz.	FSK, PSK.	Para 100 kbps.	Televisión VHF, radio FM comercial.
300 – 3000 MHz	UHF (Frecuencia Ultra Alta)	FM, SSB.	Para 20 MHz.	PSK.	Para 10 Mbps.	Televisión VHF, microondas terrestres.
3 – 30 GHz	SHF (Frecuencia Súper Alta)	FM.	Para 500 MHz.	PSK.	Para 100 Mbps.	Microondas Terrestres, microondas por satélite.
30 – 300 GHz	EHF (Frecuencia Extremadamente Alta)	FM.	Para 1 GHz.	PSK.	Para 750 Mbps.	Enlaces punto a punto cercanos experimentales.

Características [16]

La conexión que operan en las frecuencias de 12, 18 y 23 [GHz] tiene un alcance 1 a 25 [km] de distancia. Mientras que, las que utilizan entre 2 y 6 [GHz]

pueden alcanzar una distancia de 30 y 50 [km]. Sin embargo, se puede utilizar repetidores intermedios que redireccionan y amplifican la señal para permitir mayor alcance y además, se puede aumentar la distancia entre estas incrementando la altura de las torres de las antenas. Transporta información de audio y video utilizando modulación FSK y QAM.

El equipo en interiores posee una guía de onda que transporta la señal RF a la antena. Estos permiten gran cobertura y utilizan multifrecuencias con una alta potencia. Mientras que los radio enlaces externos tienen tasas de línea E1 o T1 y constan un modem para interiores, circuitería RF, un cable coaxial. Este último transporta la señal de banda base, energía, señales de tareas rutinarias.

La antena receptora y la antena transmisora tienen que estar perfectamente alineadas y sus alturas deben ser apreciables sobre el nivel del mar para evitar obstáculos y obtener mayor separación entre ellas.

Una de las características de las antenas es que transmiten un haz estrecho cuyas velocidades están entre 1 y 10 [Mbps].

Ventajas

- Los enlaces microondas permiten la conexión en terrenos que son irregulares.
- La implementación es sencilla y sus costos son relativamente bajos.
- La distancia entre las antenas depende de la altura de las mismas.
- Estos sistemas requieren de un menor número de repetidoras y amplificadores en comparación a las tecnologías que utilizan cable coaxial.

Desventajas

- Los enlaces microondas necesitan de LOS y pueden presentar interferencias causadas por solapamiento entre señales de este tipo de sistema.
- Para la instalación de este tipo de enlaces es necesario la autorización de entidades reguladoras que evitan que exista interferencia entre enlaces existentes.
- Se puede presentar atenuación y distorsión de la señal debido a las condiciones atmosféricas y a que las pérdidas aumentan con la distancia, por lo que se requiere de equipos adicionales que permitan minimizar este problema.
- La capacidad de la red depende de las características de los equipos.

2.3. *Wireless Sensor Network (WSN)* [17]

La tecnología WSN tiene un gran potencial en ámbitos tan diversos, ya que es un conjunto de sensores autónomos que están distribuidos físicamente y permiten la monitorización de diferentes variables implicadas en los fenómenos físicos.

La función de los nodos es de recopilar los datos del sensor y enviarlos a la estación base; por ello deben ser capaces de adaptarse a cambios en la red, soportar comunicación en tiempo real sin afectar a la QoS y tener una capacidad de ordenamiento y almacenamiento temporal.

La red tiene una estructura Ad-Hoc que permite a cada uno de los nodos de sensores *multi-hop* la recolección y enrutamiento de datos a largas distancias. No requiere de una administración central ni una infraestructura física preestablecida.

El sistema operativo que utilizan dichos nodos se denomina TinyOS.

Características

Los nodos están ubicados en grandes regiones geográficas y pueden formar una red estacionaria o cuasi-estacionaria, dependiendo del tipo de aplicación para la que se esté utilizando WSN.

Son redes heterogéneas, es decir, cada nodo de comunicación posee las mismas propiedades. Y pueden estar compuestas por unas pocas decenas hasta miles de nodos que no requieren visión directa [18].

La redundancia de la red permite mantener la operabilidad de la misma a pesar de las fallas que puedan presentar los sensores [19].

Los nodos poseen tres estados: *sleep*, *wakeup* y *active* que permiten el ahorro energético. En el estado *active* se realiza la adquisición de datos pero la mayor parte del tiempo el nodo se presenta en estado *sleep* o inactivo [20].

Ventajas

- Las redes inalámbricas de sensores se caracterizan por ser más pequeños, más ligeros y consumir menos energía, por lo tanto, su tiempo de vida es mayor comparado con sistemas tradicionales. Su implementación tiene un bajo costo y es sencillo. Además, su distribución espacial tiene una mayor cobertura lo que facilita el desarrollo de grandes estudios científicos y diferentes aplicaciones [3].
- La red de sensores puede funcionar por largos períodos de tiempo sin mantenimiento.
- Mientras mayor es la cantidad de nodos mayor será el rendimiento de la red.

Desventajas

- A pesar de que el consumo de baterías de esta tecnología es menor en comparación con otras, debido al tamaño reducido de los nodos, requiere del mantenimiento y control del mismo, es decir, posee limitaciones energéticas.
- WSN se caracteriza por un bajo ancho de banda de los nodos y tiene restricciones de cobertura de la red, capacidad de cómputo y memoria [17].
- Debido a que los nodos operan en condiciones climáticas extremas y ambientes hostiles puede presentar fallas en la comunicación [18].
- Los rangos de comunicación entre sensores deben ser cortos y requiere de protocolos eficientes.
- El consumo de energía incrementa debido a la característica *multi-hop* de la red.

Seguridad [21]

WSN utiliza la criptografía bajo claves de acceso para mantener la seguridad de la transmisión.

Se garantiza la confiabilidad del usuario bajo firmas. Y además, se asegura la inviolabilidad de los mensajes bajo *Checksum*.

2.3.1. Normalización 802.15.4 y ZigBee

El estándar 802.15.4 (ZigBee) bajo la tecnología WSN está orientado a la monitorización inalámbrica de corto alcance y baja capacidad.

Características [22]

Esta normalización permite la conectividad inalámbrica entre dispositivos cuya velocidad alcanza de 20 a 250 [kbps] en un rango de 10 a 75 [m].

Opera en las bandas sin licencia de 2.4 [GHz] y 858 [MHz] para Europa, bajo una modulación DSSS, con una velocidad de transmisión de 250 [kbps], cuya potencia de 1 [mW] permite una cobertura de 13 [m] de radio. Mientras que para América le corresponde la banda sin licencia de 902 – 928 [MHz] con una tasa de bit de 40 [kbps], y para el resto del mundo se puede utilizar las bandas libres de 2405-5480 [MHz] cuya velocidad de transmisión es de 250 [kbps].

Utiliza TDMA (*Time Division Multiple Access*) y para el control de acceso al medio utiliza CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Además, permite el enrutamiento *multi-hop* a largas distancias.

Seguridad [22]

ZigBee utiliza encriptación, autenticación y cifrado por bloques AES de 128 [bits]. También utiliza dos tipos de claves de seguridad (enlace y red) dentro de un Centro de Validación (*Trust Center*).

Ventajas

- Este estándar ofrece fiabilidad, bajo costo, bajo consumo de energía, sencillez en la implementación y una amplia cobertura de 100 [m] y permite implementar 64770 nodos en diferentes topologías de red: *mesh, cluster tree, star*.
- Requiere menor potencia (desde 1 [mW] a 100 [mW]) y menor memoria (4 o 32 [kB]), en comparación con otras tecnologías como el Bluetooth o Wi-Fi cuyas capacidades de memorias necesarias son mayores a 1 [MB] [23].

- Presenta mejores tiempos de conexión que dispositivo con Bluetooth y ofrece aplicaciones de tasa binaria baja y escalabilidad. Ante la caída de un nodo busca rutas alternas, es decir, permite mantener la operabilidad de la red utilizando métodos de redundancia [22].
- ZigBee utiliza de una manera eficiente la potencia, ya que la batería tiene que ser reemplazada después de un determinado periodo mientras que la tecnología Bluetooth requiere de una recarga regular [20].

Desventajas

- ZigBee puede presentar interferencia con otros dispositivos tipo Wi-Fi o Bluetooth.

2.3.2. Sistema Operativo TinyOS [24]

TinyOS es sistema operativo base de código abierto diseñado para tecnología WSN, que soporta plataformas Linux, Windows 2000 y Xp. Incluye componentes de configuración, implementación y módulos que permiten la innovación con drivers de sensores y herramientas de adquisición de datos, y se encarga de realizar operaciones robustas, procesos pequeños y de grandes cantidades. Posee limitaciones de memoria, por lo que genera un código de tamaño pequeño apto para los sensores.

2.3.3. Tipos de Sensores para la Monitorización Volcánica [3]

Para el estudio específico de actividades volcánicas es necesario contar con sensores acústicos y sísmicos. Entre los principales tenemos:

Geospace Industrial GS-11 Geófono se caracteriza por tener una orientación vertical, un sólo eje con un sismómetro y una frecuencia de *corner* de 4.5 [Hz].

Geospace Industries GS-1 sismómetro triaxial con una frecuencias de *corner* de 1 [Hz].

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Estructura de la Red

La Red de Telecomunicaciones Volcán Cotopaxi - ESPE tiene gran importancia debido a que el Campus Politécnico se encuentra en una zona de alto riesgo frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi. El diseño de la Red de Transporte y de la Red de Sensamiento permitirá desarrollar un sistema de supervisión y alerta temprana, cuya información oportuna y de alta confiabilidad disminuirá el impacto socioeconómico que podría causar la erupción de dicho volcán.

Para el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi se ha desarrollado un plan de monitorización volcánico compuesto por una estación de control que comprende sensores autónomos, un Gateway y una estación base; y por un laboratorio remoto de vigilancia a ser ubicado en las instalaciones de la ESPE – Laboratorios de Electrónica, donde se recopilarán los datos, se procesarán y analizarán para obtener patrones o parámetros que permitan comparar la estabilidad y actividad volcánica detectando de esta forma variaciones precursoras de una erupción. Además, este Laboratorio tendrá conexión a la máquina en la estación remota para su monitorización y administración.

La Figura. 3.1 muestra la estructura de la red de transporte.

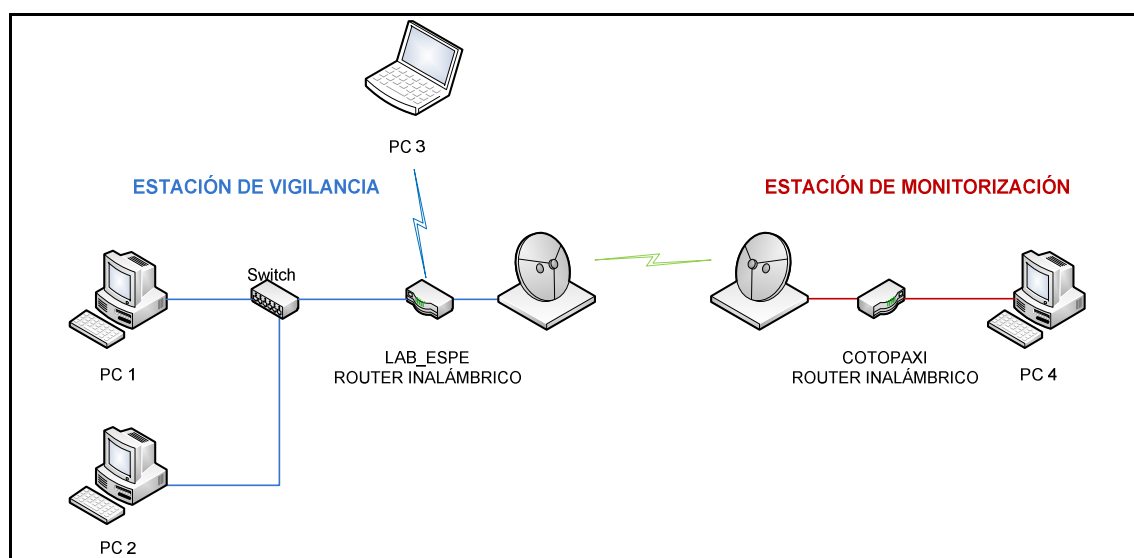


Figura. 3.1. Diagrama de la Red de Transporte

3.1.1 Consideraciones del Enlace Volcán Cotopaxi - ESPE

Para definir la tecnología adecuada para este enlace fue necesario analizar los diferentes sistemas de comunicaciones inalámbricas (Capítulo 2) y considerar factores como el volumen de información que debe ser regularmente transportado hacia los laboratorios para la monitorización del comportamiento del Volcán Cotopaxi.

Para establecer la tecnología de telecomunicaciones más adecuada para la transmisión de los datos adquiridos desde la estación de monitorización a la estación de vigilancia, se tomó en cuenta el volumen de información a ser enviado que aproximadamente es de 1 [Gbit] por día, lo cual nos permitió descartar la utilización de redes de Radio HF, VHF y UHF, ya que se caracterizan por una tasa de transmisión de datos muy baja. Para decidir entre los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.16 se basó en diferentes estudios donde indican que actualmente el estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi) para largas distancias con MAC alternativo se presenta como una solución madura, gestionable y estable, mientras que WiMAX se la considera una solución viable pero a un futuro mediano debido a las complicaciones existentes en el desarrollo de las radiobases y terminales de usuarios en las bandas no licenciadas de 5 [GHz], sumado a su alto costo [25] [26]. Por lo que, para la red de transporte se ha considerado el estándar IEEE 802.11 en la banda de 2.4 [GHz] como la alternativa más óptima.

Debido a los últimos avances que ha logrado la tecnología basada en el estándar IEEE 802.11 para largas distancias y con MAC modificable, se presenta como una opción viable en comparación con diferentes sistemas inalámbricos como WiMAX y otros enlaces microondas. Por lo tanto, Wi-Fi se muestra como una tecnología robusta a bajo costo que permite desarrollar enlaces mayores a 100 [km] en zonas rurales con una buena transmisión y utilizar bandas sin licencia como la 2.4 [GHz], por lo tanto, este sistema es apto para desarrollar la red de transporte [27]; por ello el despliegue de la tecnología Wi-Fi a larga distancia es adecuado para el enlace Volcán Cotopaxi – ESPE, ya que sus características tanto de capacidad como velocidad de transmisión permitirán generar resultados óptimos, facilidad de despliegue y expansión de la red.

El desarrollo de este diseño requiere un análisis de los parámetros, métricas y componentes, así también del volumen de la información y *Throughput* que generará la red para garantizar transmisión de alta fidelidad.

3.1.2 Consideraciones del Sistema WSN para los Nodos del Volcán [28]

El Sistema WSN para la vigilancia volcánica del Cotopaxi hace referencia a un diseño de red con tecnología de punta que posee dispositivos robustos y confiables, donde los sensores y nodos presentan un menor tamaño y peso, y que consumen menos energía en comparación con los nodos tradicionales, lo cual representa reducción de costos.

Después de haber realizado el análisis de la tecnología WSN (Capítulo 2) y en base a los estudios realizados por miembros de las Universidades de Harvard, New Hampshire y North Carolina: [2] y [3], se puede decir que, la Red de Sensores Inalámbricos basada en el estándar IEEE 802.15 permitirá mayor efectividad y capacidad, menor vulnerabilidad a fallas del sistema y una mejor monitorización en condiciones ambientales adversas. Además, el sistema WSN no requiere de una administración central ni una infraestructura física preestablecida. Por lo tanto, este sistema es idóneo y apto para desarrollar la red de monitorización de variables de distinta índole en el Volcán Cotopaxi.

Dicha red presenta una estructura Ad-Hoc donde los nodos o también denominados motas se despliegan de tal forma que pueden sensor un medio físico con gran detalle y, mediante un proceso *multihop* se recopilan los datos del sensor y se enrutan a la estación base; por ello deben ser capaces de adaptarse a cambios en la red, soportar comunicación en tiempo real sin afectar a la QoS y tener una capacidad de ordenamiento y almacenamiento temporal.

Cada nodo posee un dispositivo con microcontrolador, sensores, transmisor y receptor, por lo que pueden procesar información localmente y comunicarse de forma inalámbrica a largas distancias. La frecuencia a utilizarse es 2.4 [GHz] en banda libre y la ubicación de las motas será diseñada en base al conocimiento del espacio en el que se desarrollará el proyecto.

Este diseño también requiere del análisis del comportamiento de la red basada en el estándar 802.15 para determinar el número de nodos activos, el volumen de información sensada y el *Throughput* de la red.

3.2 Estudio de Requerimientos del Enlace

Es importante para el diseño considerar diferentes requerimientos del enlace inalámbrico para garantizar su comportamiento y confiabilidad.

Para determinar la capacidad de los equipos es necesario realizar un análisis del *Throughput*, del retardo de extremo a extremo (*End to End Delay*) y de la relación de entrega (*Delivery Ratio*) del enlace. Con el desarrollo de este estudio se podrá tener datos más exactos del comportamiento de la red y demás parámetros de los equipos.

3.2.1 *Throughput* de la Red

El *Throughput* es el volumen de trabajo o de información que fluye a través de la red en un determinado tiempo, por lo que es muy importante analizar este parámetro, ya que nos permite conocer el nivel de rendimiento o capacidad de la red.

La ecuación que lo define tanto para un nodo como para toda la red es la siguiente:

$$\textit{Throughput de la Red} = \frac{B_{Tx}}{t_{Tx}} \quad (3.1)$$

Donde:

B_{Tx} → Bytes totales transmitidos.

t_{Tx} → Tiempo total de transmisión en segundos.

La definición del tráfico de la red de transporte depende del número de nodos de sensores desplegados en Volcán Cotopaxi; por ello se requiere de un análisis de la tasa de transmisión real y normalizada, y de la media del tiempo como se muestra a continuación:

***Throughput* de la Red en Función al Número de Nodos**

Este parámetro depende del número de bytes enviados y del tiempo total de la simulación. Y es analizado mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{8 \cdot N_e}{\tau} \left[\frac{\textit{bits}}{\textit{s}} \right] \quad (3.2)$$

Donde:

η → *Throughput* de la red.

N_e → Número de Bytes enviados.

τ → Tiempo total de la simulación.

***Throughput* Real de la Red en Función al Número de Nodos**

El *Throughput* real toma en cuenta el número de bytes enviado y la relación entre paquetes perdidos y enviados durante el tiempo de simulación. Su ecuación se define de la siguiente manera:

$$\eta' = \frac{8 \cdot N_e \cdot (1 - r)}{\tau} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] \quad (3.3)$$

$$r = \frac{P_p}{P_e} \quad (3.4)$$

Donde:

$\eta' \rightarrow$ *Throughput* real de la red.

$N_e \rightarrow$ Número de Bytes enviados.

$\tau \rightarrow$ Tiempo total de la simulación.

$r \rightarrow$ Relación entre paquetes perdidos y paquetes enviados.

***Throughput* Normalizado de la Red en Función al Número de Nodos**

El *Throughput* normalizado es considerado como el porcentaje de tiempo que tiene una transmisión efectiva de paquetes. Su ecuación se define de la siguiente manera:

$$\frac{\eta'}{\eta} = (1 - r) \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right] \quad (3.5)$$

$$r = \frac{P_p}{P_e}$$

Donde:

$\frac{\eta'}{\eta} \rightarrow$ *Throughput* normalizado de la red.

$r \rightarrow$ Relación entre paquetes perdidos y paquetes enviados.

3.2.2 Retardo de Extremo a Extremo

El retardo de extremo a extremo se define como el tiempo que transcurre desde que el paquete sale del nodo origen hasta llegar al nodo destino de forma exitosa. Su ecuación está dada de la siguiente forma:

$$Retardo_{Promedio} = \frac{\sum \text{Delay de todos los paquetes}}{\text{Número de paquetes recibidos}} \quad (3.6)$$

3.2.3 Relación de Entrega

Esta relación determina el porcentaje de paquetes recibidos exitosamente, lo cual permite establecer el nivel de desempeño y saturación de la red. Se define por la siguiente ecuación:

$$Delivery\ Ratio(\%) = \frac{\text{Número de Paquetes Recibidos}}{\text{Número de Paquetes Enviados}} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

3.3 Establecimiento de Parámetros Técnicos para la Cobertura

3.3.1 Modelos de Propagación en *Network Simulator 2 (NS-2)*

El enlace Volcán Cotopaxi – ESPE presenta obstáculos sobre la línea de vista y otras interferencias multicamino que pueden afectar la transmisión; por ello es importante analizar los diferentes modelos de propagación de Radio Frecuencia.

Dichos modelos varían en su enfoque, complejidad y precisión, y surgen por la necesidad de modelar una zona geográfica de terreno irregular para así poder predecir la potencia de la señal en un punto específico de recepción dentro de un área [29]; por ello es importante conocer los factores que pueden alterar la propagación electromagnética de los sistemas de telecomunicaciones, su magnitud y su influencia en las distintas bandas de frecuencias para poder establecer óptimos diseños.

El software NS-2 permite analizar e implementar tres modelos de propagación:

- *Free Space*
- *Two-Ray Ground Reflection*
- *Shadowing*

Cuya función es determinar el nivel de la señal de un paquete en la capa física del receptor inalámbrico y compararlo con el umbral de energía para saber si el envío del paquete tuvo éxito o no. En caso que el paquete sea considerado como erróneo será eliminado por el nivel MAC.

El modelo de propagación *Free Space* es un caso ideal, ya que sus características eléctricas son las de vacío. Para el modelo *Two-Ray Ground Reflection*, la propagación toma en cuenta la reflexión de las señales sobre la tierra, es decir, se basa en una óptica geométrica. Finalmente, el modelo de propagación *Shadowing* representa un entorno más real; por ello este modelo ha sido seleccionado para la simulación de la propagación del canal de transporte en Network Simulator 2.33.

A continuación, se detallan las características de los modelos antes mencionados:

Modelo de Propagación *Free Space* [30]

El Modelo de Propagación *Free Space* se aplica a canales de comunicación inalámbrica con un camino directo y LOS. Básicamente representa un círculo alrededor de transmisor cuyo radio d es el rango de comunicación. Por consiguiente, la potencia recibida decae en función de la separación entre el transmisor y receptor [31].

Para determinar el nivel de potencia de la señal recibida en *Free Space* a una determinada distancia se aplica la siguiente ecuación:

$$P_{Rx}(d) = \frac{P_{Tx} \cdot G_{Tx} \cdot G_{Rx} \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot d^2 \cdot L} \quad (3.8)$$

Donde:

d → Distancia.

λ → Longitud de onda.

L → Factor de pérdidas por propagación.

G_{Rx} → Ganancia de la antena de recepción.

G_{Tx} → Ganancia de la antena de transmisión.

P_{Tx} → Potencia de transmisión.

$P_{Rx}(d)$ → Potencia recibida en función de distancia d .

Para el desarrollo de esta ecuación, el software NS-2 asigna los siguientes valores: $G_{Tx} = G_{Rx} = 1$ y $L = 1$.

Este modelo es considerado ideal, ya que se lo aplica en condiciones de vacío y está basado en una predicción determinística de la distancia, por lo que no es el más adecuado para un entorno terrestre real debido a que existen diferentes parámetros como curvatura de la tierra, la atmósfera y la ionosfera, y efectos de multitrayectos y de desvanecimiento que modifican las características de propagación.

Modelo *Two-Ray Ground Reflection* [32]

Este modelo requiere LOS entre el transmisor y receptor y considera la posible reflexión terrestre de la señal, es decir, toma en cuenta la transmisión directa y la componente de propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y el receptor. Por lo tanto, es un modelo más realista que el anterior y es adecuado únicamente para modelos de grandes distancias. La expresión que utiliza para determinar la potencia recibida en función de la distancia es:

$$P_{Rx}(d) = \frac{P_{Tx} \cdot G_{Tx} \cdot G_{Rx} \cdot h_{Tx}^2 \cdot h_{Rx}^2}{d^4 \cdot L} \quad (3.9)$$

Donde:

$d \rightarrow$ Distancia.

$h_{Rx} \rightarrow$ Altura de la antena de recepción.

$h_{Tx} \rightarrow$ Altura de la antena de transmisión.

$L \rightarrow$ Factor de pérdidas por propagación.

$G_{Rx} \rightarrow$ Ganancia de la antena de recepción.

$G_{Tx} \rightarrow$ Ganancia de la antena de transmisión.

$P_{Tx} \rightarrow$ Potencia de transmisión.

$P_{Rx}(d) \rightarrow$ Potencia recibida en función de distancia d .

Sin embargo, su cálculo también está basado en la predicción determinística de la distancia cuyo rango de cobertura se plantea en forma de círculo ideal, por lo que sólo será usado para determinados protocolos a larga distancia como el 802.15.4.

Modelo de Propagación Shadowing [33]

El modelo de Shadowing es mucho más preciso que los anteriores, ya que considera a la potencia recibida como una variable aleatoria debido a los efectos de desvanecimiento; por ello plantea dos cálculos que permiten analizar las pérdidas de propagación y la variación de la potencia a una determinada distancia.

El primer cálculo se mide generalmente en [dB] y se define como la relación entre la potencia media recibida a una distancia d y la potencia media a una distancia referencial d_0 .

$$\left(\frac{P_{Rx}(d)}{P_{Rx}(d_0)} \right)_{dB} = -10 \cdot \beta \cdot \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.10)$$

Donde la constante β se define como *Path Loss Exponent* y toma los siguientes valores:

Tabla. 3.1. Valores Típicos para Exponente de Pérdidas de Propagación β

AMBIENTE		β
Ambientes Exteriores	Espacio Libre	2.0
	Área urbana con sombra	2.7 a 5.0
Dentro del Edificio	Línea de vista	1.6 a 1.8
	Obstrucción	4.0 a 6.0

La segunda parte del modelo Shadowing refleja la variación de la potencia de recepción a una determinada distancia, mediante una distribución Gaussiana expresada en [dB]. Entonces, el modelo de propagación de Shadowing se define por la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{P_{Rx}(d)}{P_{Rx}(d_0)} \right]_{dB} = -10 \cdot \beta \cdot \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{dB} \quad (3.11)$$

Donde, X_{dB} es una variable randómica que posee una media igual a cero y una desviación estándar σ_{dB} , cuyos valores típicos se muestran en la Tabla. 3.2:

Tabla. 3.2. Valores Típicos de la Desviación Estándar σ_{dB}

AMBIENTE	$\sigma_{dB} (dB)$
Ambientes exteriores	4.0 a 12
Oficina con alta ocupación	7.0
Oficina con baja ocupación	9.6
Industrial con línea de vista	3.0 a 6.0
Industrial con obstáculos	6.8

Por tanto, la propagación Shadowing amplía su concepto y permite considerar un canal real debido a la utilización de un modelo probabilístico y a la utilización de la distribución Gaussiana.

Para el caso de la red de transporte se utilizará este modelo debido a sus características anteriormente mencionadas.

3.3.2 Protocolos de Enrutamiento en NS-2 para WSN [28]

Los protocolos de enrutamiento permiten dirigir los paquetes hacia diferentes redes, es decir, determinan el esquema de comunicación entre los nodos y difunden información acerca de la topología de la red.

Para las redes de sensores inalámbricas es necesario que estos algoritmos mantengan una tabla de enrutamiento razonablemente pequeña y regularmente actualizada; requieran una pequeña cantidad de mensajes y tiempo para converger; y elijan la mejor ruta para un destino dado bajo diferentes criterios como confiabilidad, rapidez, capacidad o menor coste.

Adicionalmente, para la recopilación fiable de datos se ha escogido el modelo de enrutamiento *Multi-hop*, ya que la información viaja desde el origen a la mota base a través de saltos entre vecinos hasta llegar a su destino, lo cual permite alcanzar mayores distancias a pesar del rango de transmisión limitado que poseen los nodos.

Existe una serie de esquemas competentes para el encaminamiento de paquetes aplicados a las redes inalámbricas Ad-Hoc y a las redes de sensores pero en el software NS-2 solamente pueden ser implementados cuatro:

- *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV)*
- *Dynamic Source Routing (DSR)*
- *Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)*
- *Ad-Hoc On-demand Distance Vector (AODV)*

A continuación, se describe cada uno de estos protocolos basándose en [34] y [35].

DSDV

Este protocolo intercambia periódicamente la información de las tablas de enrutamiento entre nodos vecinos. Dicha tabla contiene todos los posibles

destinos, el número de saltos que daría un paquete hacia un destino específico y números de secuencia que permiten distinguir rutas antiguas de rutas modernas.

Para no inundar la red con mensajes de actualización, se utilizan dos tipos de paquetes: *full dump* e *incremental*. Para el primer caso los paquetes o divisiones más pequeñas de estos transportan toda la información disponible sobre el enrutamiento, rara vez se utilizan para la actualización de pequeñas modificaciones en la red. Mientras que los paquetes *incremental* son recibidos por los nodos y almacenados en tablas adicionales cuya información indica los cambios detectados desde la última actualización.

Por consiguiente, el protocolo DSDV es aceptable para escenarios en donde todos los nodos intervienen en las comunicaciones y en los que la movilidad es media.

DSR

Algoritmo basado en *source routing* (encaminamiento de origen), en el cual los nodos mantienen cachés, cuyas entradas incluyen el destino y la lista de nodos para llegar a él. Y las tablas de enrutamiento son actualizadas según se aprendan nuevas rutas.

Este protocolo posee dos mecanismos que son: descubrimiento de ruta y mantenimiento de ruta. Cuando un nodo quiere enviar un paquete a un destino, primero consulta su caché para determinar si dispone de un ruta válida hacia el destino. En caso de no tenerla, se iniciará el proceso de descubrimiento de ruta enviado el paquete RREQ (*Route Request*) hacia otros nodos para verificar si poseen una ruta hacia el destino. Si este paquete alcanza su destino final o un nodo intermediario tiene una ruta válida hacia el destino se generará un paquete de respuesta RREP (*Route Response*). Para evitar el congestionamiento de la red, el nodo solo enviará el mensaje RREQ si la petición no fue recibida con anterioridad. Mientras que el mantenimiento de rutas utiliza paquetes de error en ruta (RERR) y asentimientos que permiten verificar que las operaciones con los

enlaces son correctas y borrar rutas con enlaces rotos o con problemas en la transmisión.

Este protocolo de enrutamiento es usado principalmente en escenarios con gran capacidad de movimiento y con alrededor de 200 nodos móviles.

TORA

Es un algoritmo de tipo *Link Reversal Routing*, es decir, cada nodo trabaja de forma independiente y mantiene un grafo dirigido y sin ciclos para llegar al destino, lo cual permite minimizar la cantidad de tráfico en la red. Sin embargo, presenta la desventaja de no poder estimar constantemente la distancia hacia el destino o de mantener siempre la ruta más corta.

AODV

Este protocolo es una evolución del algoritmo DSDV; por ello mantiene los números de secuencia y las tablas de encaminamiento pero el proceso de descubrimiento de rutas lo realiza bajo demanda, es decir, solamente cuando el nodo requiera enviar un paquete mantiene las rutas en caché y almacena información de los nodos que intervengan en la transmisión. Utiliza dos procedimientos: descubrimiento de rutas, y mantenimiento y gestión de rutas. Para ello, transmite un paquete RREQ (*Route Request*) en modo *broadcast* a sus vecinos, quienes verifican la existencia de la ruta hacia el destino en las entradas de su tabla de enrutamiento y vuelve a transmitir el paquete incrementando el número de saltos en caso de no haber recibido antes dicho paquete, con ello se crea la ruta inversa. Si el nodo es el destino o conoce la ruta envía el RREP (contestación de ruta) en modo *unicast* hacia el nodo fuente.

Para el mantenimiento y gestión de rutas el protocolo AODV se basa en distintos mecanismos según la calidad y fiabilidad de las mismas. Además, este proceso permite el manejo de topologías dinámicas.

Por lo tanto, este protocolo permite la disminución del tiempo de proceso, menor gasto de memoria y reducción del tráfico de la red. Además, los números de secuencia presentes en las tablas de enrutamiento de cada nodo evitan bucles de encaminamiento y permiten tener la información de las rutas actualizadas.

Este algoritmo está diseñado para redes móviles Ad-Hoc que poseen infinitud de nodos.

WLSTATIC [36]

Este protocolo se aplica para enrutamiento estático en redes inalámbricas, ya que las rutas son especificadas de forma manual. Fue creado en base al algoritmo móvil Ad-Hoc llamado AODV, sin embargo, no cuenta con muchas de sus características, puesto que sólo se requieren especificaciones estáticas de la ruta. Además, *WLStatic* no presenta ningún proceso de mantenimiento o gestión de red, por lo que si un nodo móvil está fuera del rango o una ruta estática se cae, no se genera una actualización de las tablas de enrutamiento.

Por consiguiente, este algoritmo se aplica a los escenarios donde los nodos son no móviles, a diferencia del caso de redes Móviles Ad-Hoc y sus protocolos de enrutamiento (como DSR), es decir, el algoritmo permite simular redes inalámbricas con nodos fijos y encaminamiento estático.

3.4 Diseño de la Red Wi-Fi [37]

En el diseño de una red Wi-Fi es importante analizar el presupuesto del enlace, la indisponibilidad y calidad del sistema, es decir, se debe hacer un correcto estudio sobre la planificación del radioenlace, lo que involucra examinar mapas topográfico y trazados de perfil, además, se debe determinar el cálculo del radio enlace que incluye potencias de la señal y ruido, umbrales y márgenes, desvanecimientos, pérdidas de espacio libre, pérdidas de reflexión y pérdidas de difracción para establecer la conectividad de la red. Dicho proceso se realizará con el objetivo de que el nivel de la señal recibida del diseño sea el más adecuado y que la elección de equipos sea correcta.

Adicionalmente, el cálculo del desempeño del enlace realiza un balance entre las características de los medios de propagación y factores condicionantes de los equipos como lo son las ganancias y pérdidas, lo que permite determinar la calidad de la señal, el funcionamiento y rendimiento de la comunicación.

La Figura. 3.2 muestra los elementos de análisis de un radio enlace: transmisión, propagación y recepción.

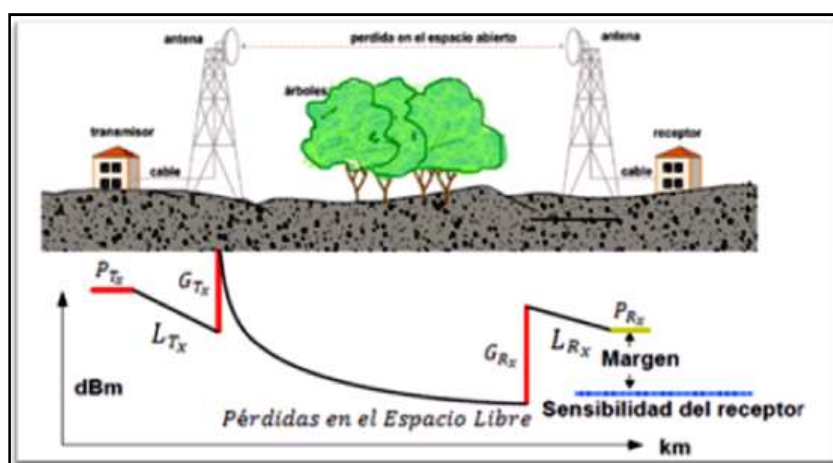


Figura. 3.2. Elementos de un Radio Enlace [38]

- + $P_{Tx} [dBm]$ → Potencia del Transmisor
- $L_{Tx} [dB]$ → Pérdidas en el Cable Transmisor
- + $G_{Tx} [dB_i]$ → Ganancia de Antena Transmisor
- $A_{Le} [dB_i]$ → Pérdidas en la Trayectoria en el Espacio Libre
- + $G_{Rx} [dB_i]$ → Ganancia de Antena Receptor
- $L_{Rx} [dB]$ → Pérdidas en el Cable Receptor
- = Margen – Sensibilidad del Receptor $[dBm]$

3.4.1 Pérdidas de Propagación

Difracción y la Zona de Fresnel [39] [40] [41]

El despeje de la zona de Fresnel y la visibilidad directa entre las antenas son factores fundamentales en el diseño de cualquier enlace microondas punto a punto, ya que las ondas electromagnéticas al viajar por el espacio libre sufren

diferentes procesos de reflexión y cambios de fase al pasar por obstáculos, lo que genera el aumento o disminución en el nivel de señal recibida.

Las zonas de Fresnel se presentan como elipsoides concéntricos cuya energía disminuye proporcionalmente a la distancia de la zona central, denominada primera zona de Fresnel. Por consiguiente, la mayor contribución en el nivel de la señal para la estación receptora es la primera zona de Fresnel, donde la obstrucción máxima permisible para considerar que no hay obstrucción es de 60 % de esta zona. Adicionalmente, se debe considerar la curvatura de la tierra (k), que generalmente es igual a $\frac{4}{3}$.

Para la deducción del radio de las zonas de Fresnel se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- La sección transversal de la primera zona de Fresnel es circular, por lo tanto, esta zona es el radio de la elipsoide de revolución en el cual todos los rayos eléctricos tienen una diferencia de fase entre 0 y $\lambda/2$.
- Las zonas subsecuentes de Fresnel son anulares en la sección transversal, y concéntricas con las primeras.

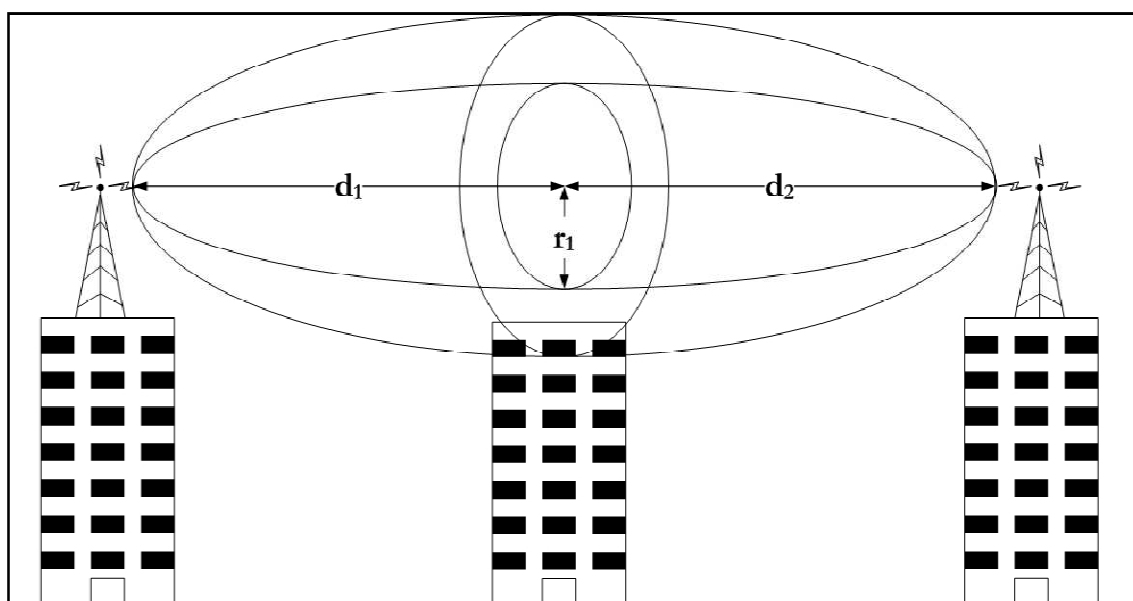


Figura. 3.3. Diagrama Explicativo de las Zonas de Fresnel
[42]

En la Figura. 3.3 se muestra una línea recta entre la antena transmisora y la receptora que se define como la línea de vista de RF, esta está rodeada por la zona de Fresnel.

Entonces, el radio de la primera zona de Fresnel se calcula con la siguiente fórmula:

$$F_1 = \sqrt{\lambda \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d}} = 548 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} \quad (3.12)$$

Donde:

- F_1 → Radio de la primera zona de Fresnel.
- d_1 → Distancia desde la menor altura al obstáculo [km].
- d_2 → Distancia desde la menor altura al obstáculo [km].
- d → Distancia total del enlace [km].
- f → Frecuencia expresada en [GHz].

Margen Sobre Obstáculo [39] [43]

Existen casos de enlaces donde el rayo directo entre la antena transmisora y la antena receptora (LOS), pasa cerca o atraviesa un obstáculo, lo cual genera pérdidas en la señal recibida debido a la difracción.

Este factor debe permitir el 60% de libertad de la primera zona de Fresnel para considerar que no existe obstrucción. Por lo tanto, el análisis de la influencia de los obstáculos es muy importante para el diseño de una red inalámbrica y su parámetro principal es el margen de despeje sobre el obstáculo que se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

$$c = h_1 + y - h_{obs}$$

$$\frac{y}{d_1} = \frac{h_2 - h_1}{d}$$

$$h_{obs} = h_s + x_k$$

$$h_{obs} = h_s + \frac{4}{51} \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{k}$$

$$c = h_1 + \frac{d_1 \cdot (h_2 - h_1)}{d} - \frac{4}{51} \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{k} \quad [m] \quad (3.13)$$

Donde:

- c → Margen sobre obstáculo [m].
- d → Distancia total del enlace [km].
- d_1 → Distancia desde la menor altura de la estación al obstáculo [km].
- d_2 → Distancia desde la mayor altura de la estación al obstáculo [km].
- h_s → Altura del obstáculo sobre el nivel de mar [m].
- h_1 → Menor altura de las estaciones [m].
- h_2 → Mayor altura de las estaciones [m].
- h_{obs} → Altura del obstáculo más la protuberancia de la de la tierra [m].
- x_k → Protuberancia de la tierra [m].
- k → Coeficiente del radio efectivo de la Tierra, para este caso el valor a considerar es $\frac{4}{3}$.

El margen sobre obstáculo se define como la distancia entre la parte más alta del obstáculo y la línea de vista. En la práctica, cuando dicho parámetro corresponde a un número menor a uno quiere decir que existe obstrucción en la línea de vista. Por lo tanto, para el diseño de un radio enlace se debe garantizar que:

$$c \geq F_1 \quad (3.14)$$

El despeje se define como la distancia entre la línea de vista y el perfil del terreno en la elevación más crítica. Por consiguiente, en la Figura. 3.4 podemos observar este parámetro a una altura h entre el rayo y el obstáculo.

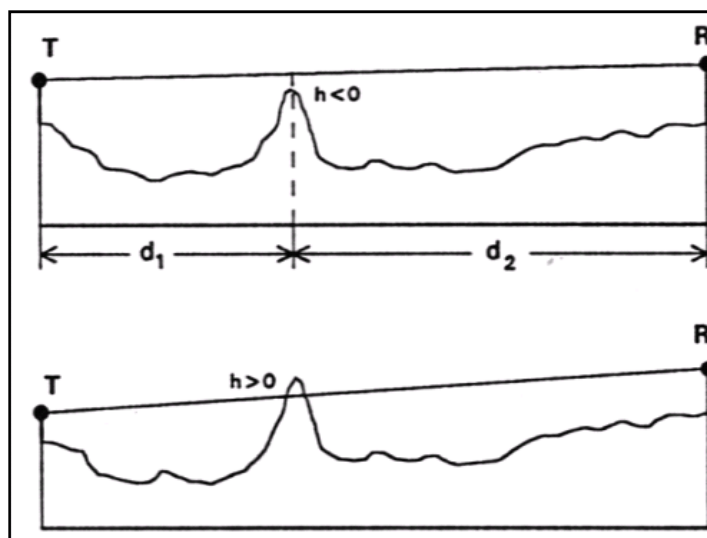


Figura. 3.4. Despeje [44]

Por convenio se considera que cuando $h > 0$ existe interceptación del rayo y cuando $h < 0$ el rayo pasa por encima del obstáculo. En la práctica se utiliza el despejamiento normalizado que se define como: $Dp = h/F_1$ y el rango que comprende la propagación por difracción está entre $-0.6 < h/F_1 < \infty$.

Por lo que es necesario hacer el estudio y evaluación del despejamiento y de su consiguiente atenuación por difracción basados en un análisis del número, situación e influencia de los obstáculos.

Pérdidas en el Espacio Libre

De acuerdo con el principio de Huygens, cuando las ondas se propagan por el espacio lo hacen en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda. E incluso esta consideración se aplica para el caso del vacío donde la energía de los objetos cercanos no presenta absorción ni reflexión. Sin embargo, en este medio se generan pérdidas en el aire que son directamente proporcionales a la distancia entre el transmisor y el receptor. Dichas pérdidas reducen la densidad de potencia, es decir, cuando las ondas se propagan por el

espacio vacío se produce el fenómeno de atenuación cuyo cálculo está en función de la distancia y de la frecuencia como lo muestra la siguiente fórmula:

$$A_{Le} = 32.5 + 20 \cdot \log(f[\text{MHz}]) + 20 \cdot \log(d[\text{km}]) \quad (3.15)$$

Donde:

A_{Le} → Pérdidas en trayectoria por el espacio libre expresado en [dB].

f → Frecuencia en [MHz].

d → Distancia total del enlace [km].

3.4.2 Balance de Potencia

Ganancia

Se define ganancia al número de veces que se concentra la energía en una dirección con respecto a que si se irradiaría en todas las direcciones.

Potencia de Recepción [44]

En los radios enlaces la señal se ve notablemente influenciada por los efectos que genera la propagación en el espacio libre lo que imposibilita captar toda la potencia generada y hace que la potencia recibida sea inferior a la transmitida.

La **potencia de recepción nominal** se obtiene sumando a la potencia transmitida las ganancias de antenas y restando las atenuaciones debidas a circuladores, al cable coaxial o guía de onda, al espacio libre. Matemáticamente se define de la siguiente manera:

$$P_{R_x}[\text{dB}] = P_{T_x}[\text{dB}] + G_{T_x}[\text{dB}_i] + G_{R_x}[\text{dB}_i] - A_{Le} \quad (3.16)$$

$$P_{R_x}[dB] = P_{T_x}[dB] + G_{T_x}[dB_i] + G_{R_x}[dB_i] - [32.5 + 20 \cdot \log(f[MHz]) + 20 \cdot \log(d[km])] \quad (3.17)$$

Donde:

P_{R_x} → Potencia de recepción.

P_{T_x} → Potencia de transmisión.

G_{T_x} → Ganancia de la antena de transmisión.

G_{R_x} → Ganancia de la antena de recepción.

A_{Le} → Pérdidas en el espacio libre.

La ganancia de la antena se expresa en la dirección de máxima directividad y es función directa de la frecuencia.

3.5 Propagación por Difracción [45] [46]

La difracción es un fenómeno basado en el principio de Huygen donde una antena emisora genera un frente de onda en expansión, es decir, los rayos de onda no viajan en una sola dirección sino que se generan infinitos caminos, ya que al chocar con un borde de un obstáculo (objeto opaco) se producen nuevos frentes de onda secundarios. Entonces, la señal difractada se incrementa en función de la longitud y puede tener un cierto retador produciendo interferencia al sumarse o restarse con la fase relativa.

Por consiguiente, la difracción es responsable de la atenuación por obstáculos y entre los principales casos podemos mencionar: difracción por obstáculo filo de cuchillo y por obstáculo redondeado.

Obstáculo Filo de Cuchillo [47]

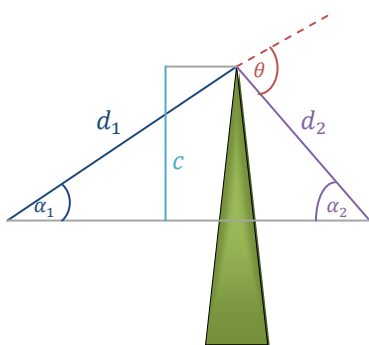
En la predicción de la intensidad de campo, el modelo filo de cuchillo permite obtener la estimación de pérdidas que ajustan el valor del cálculo hecho para el

espacio libre, es decir, toma en cuenta las pérdidas adicionales que genera el obstáculo y que afectan directamente al nivel de señal de recepción.

Dicho modelo depende de la cantidad y disposición de los obstáculos presentes en el trayecto.

- **Análisis para un solo obstáculo filo de cuchillo**

CASO 1:

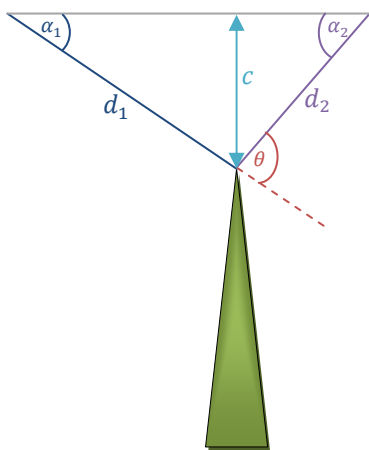


$$\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0$$

$$c > 0$$

$$\theta > 0$$

CASO 2:



$$\alpha_1 < 0, \alpha_2 < 0$$

$$c < 0$$

$$\theta < 0$$

Figura. 3.5. Modelo de Filo de Cuchillo para un Obstáculo

Cuando la primera zona de Fresnel, trazada entre el transmisor y el receptor intercepta un único obstáculo, se tratará de un perfil con un obstáculo aislado. Para el cálculo de atenuación por difracción, se debe tener en cuenta el tipo de difracción que puede ser superior (arriba de la línea de vista) o inferior (debajo de la línea de vista), ya que el margen c [m] podrá ser positivo o negativo respectivamente como lo muestra la Figura. 3.5.

La disposición geométrica del obstáculo en el trayecto en el modelo de filo de cuchillo para un obstáculo, se denota por la constante v , calculada como:

$$v = \theta \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot \theta}{\lambda}} \rightarrow (v \text{ tiene el signo de } c)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot d}{\lambda} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2} \rightarrow (v \text{ tiene el signo de } \alpha) \quad (3.18)$$

Donde:

- θ → Ángulo de difracción.
- α_1 → Ángulo que forman el extremo del obstáculo con la horizontal del transmisor.
- α_2 → Ángulo que forman el extremo del obstáculo con la horizontal del receptor.

Entonces, la atenuación debida a un obstáculo filo de cuchillo estará dada por la función de Bessel $J(v)$ como lo muestra la siguiente ecuación:

$$J(v) = 6.9 + 20 \cdot \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2} + v - 0.1 \right) \text{ [dB]} \quad (3.19)$$

También, existe una aproximación para el cálculo del valor de v :

$$v \approx \frac{c}{F_1} \quad (3.20)$$

Esta expresión facilita el cálculo del valor de v , ya que no es necesario calcular los ángulos y de esta forma se simplifica el proceso para obtener el valor de dichas pérdidas.

Por lo tanto, las pérdidas totales serían:

$$L_{TOTALES} = A_{gases} + A_{Le} + A_d \quad (3.21)$$

$$P_{R_x}[dB] = P_{T_x}[dB] + G_{T_x}[dB_i] + G_{R_x}[dB_i] - L_{Alimentación} - L_{T_x} - L_{TOTALES} \quad (3.22)$$

La pérdida de alimentación está dada por el valor de atenuación de los circuladores en sentido directo, éste es cercano a 0.2 [dB].

Las pérdidas de líneas de transmisión se refiere a la atenuación del cable coaxial o guía de onda que está en función directa de la frecuencia de trabajo y se expresa en [dB/100m] de longitud.

$$L_{T_x} = L_{LT_x} \cdot h_{antena} \quad (3.23)$$

Las pérdidas totales incluyen a la atenuación debido a los gases atmosféricos cuyo cálculo está dado por la siguiente expresión:

$$A_{gases} = \gamma_e \left[\frac{dB}{km} \right] \cdot d[km] \quad (3.24)$$

Donde el valor de γ_e (atenuación específica) se indica en la recomendación UIT-REC-P.676-5.

Obstáculo Redondeado

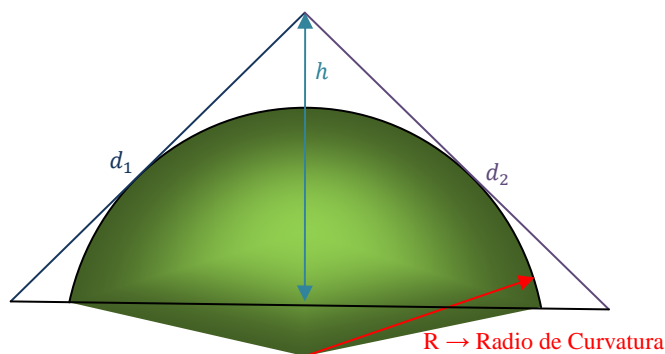


Figura. 3.6. Obstáculo Redondeado

Considerando las variaciones ilustradas en la Figura. 3.6 para el análisis de la atenuación debida a un obstáculo redondeado, se debe tomar en cuenta la sumatoria de los siguientes términos:

$$A_D = J(v) + T(m, n) \quad (3.25)$$

Entonces, el primer término corresponde a la función de Bessel anteriormente desarrollada, es decir, la parte más alta del obstáculo se la considerará como un obstáculo filo de cuchillo. Donde:

$$v \approx \frac{c}{F_1}$$

$$J(v) = 6.9 + 20 \cdot \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + v - 0.1} \right) \text{ [dB]} \quad (3.26)$$

Para determinar parámetro $T(m, n)$ realizamos el siguiente proceso:

$$m = \frac{R \cdot \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 \cdot d_2} \right)}{\left(\frac{\pi \cdot R}{\lambda} \right)^{1/3}}$$

$$n = \frac{h \cdot \left(\frac{\pi \cdot R}{\lambda} \right)^{2/3}}{R}$$

Luego se calcula los valores de b y k :

$$b = 0.73 + 0.27 \cdot (1 - e^{-1.43 \cdot n})$$

$$k = 8.2 + 12 \cdot n$$

Finalmente se obtiene el segundo término de la ecuación de atenuación con la siguiente expresión:

$$T(m, n) = k \cdot m^b \quad (3.27)$$

3.6 Desvanecimientos [43]

Al propagarse una onda electromagnética en la atmósfera terrestre, esta sufre una pérdida del nivel de la señal en el punto de recepción debido a la propagación del haz del radio eléctrico por múltiples trayectos. Dicho fenómeno se lo conoce como desvanecimiento.

Los casos que generan variación en la señal se mencionan a continuación:

- Formación de ductos en la superficie debido a la variación del índice de refracción (η), donde el haz radio eléctrico queda atrapado y se propaga dentro de este como se puede observar en la Figura. 3.7.

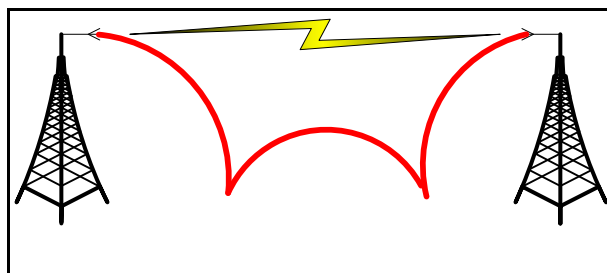


Figura. 3.7. Ducto de Superficie

- Formación de ductos elevados debido a la presencia de edificios u otros obstáculos laterales como se puede observar en la Figura. 3.8.

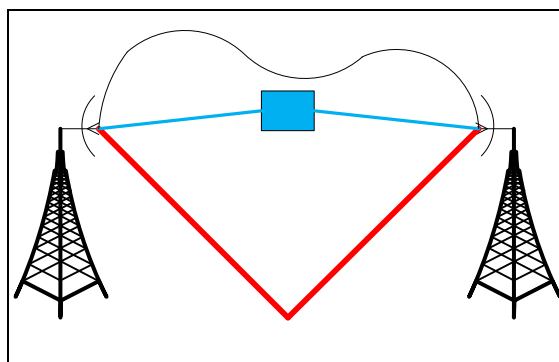


Figura. 3.8. Ducto Elevado

- Superficies terrestres irregulares.
- Perturbaciones meteorológicas como lluvia, nieve, granizo, etc.

- Cambio de polarización de la señal.

Entonces, es importante tomar en cuenta las características no ideales y menos predecibles de la propagación de las ondas de radio; por ello se ha definido el cálculo del **margen de desvanecimiento (M)** que agrega una pérdida adicional de transmisión a la pérdida en trayectoria normal mediante la diferencia entre la potencia nominal de recepción y la potencia umbral del receptor como lo muestra la siguiente ecuación:

$$M[dB] = P_{R_x}[dB] - Umbral[dB] \quad (3.28)$$

Donde:

M → Margen de desvanecimiento.

P_{R_x} → Potencia de recepción.

$Umbral$ → Potencia umbral.

La potencia umbral es una característica propia de los equipos y representa el valor de potencia recibida por el receptor que asegura una tasa de error BER de 10^{-3} y 10^{-6} . Dicho parámetro generalmente es un dato del equipo.

Dicho proceso se puede observar en la Figura. 3.9.

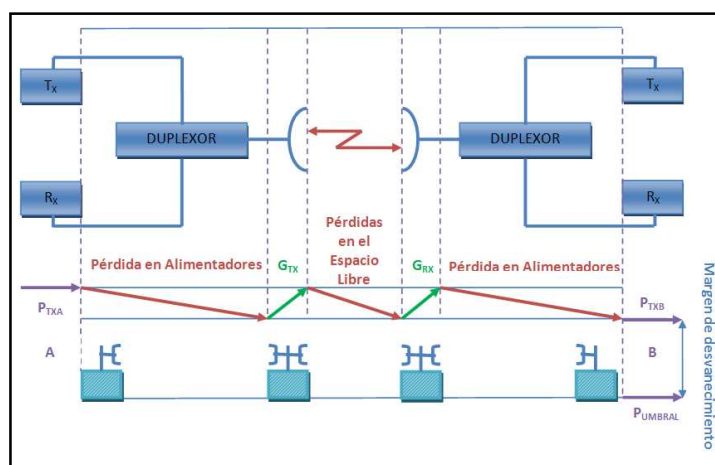


Figura. 3.9. Margen de Desvanecimiento

Por consiguiente, el diseño debe garantizar el cumplimiento de la siguiente expresión para que funcione el radioenlace:

$$P_{R_x}[dB] > Umbral[dB] \quad (3.29)$$

Sin embargo, la condición es necesaria pero no suficiente para asegurar que el M sea capaz de cubrir el desvanecimiento.

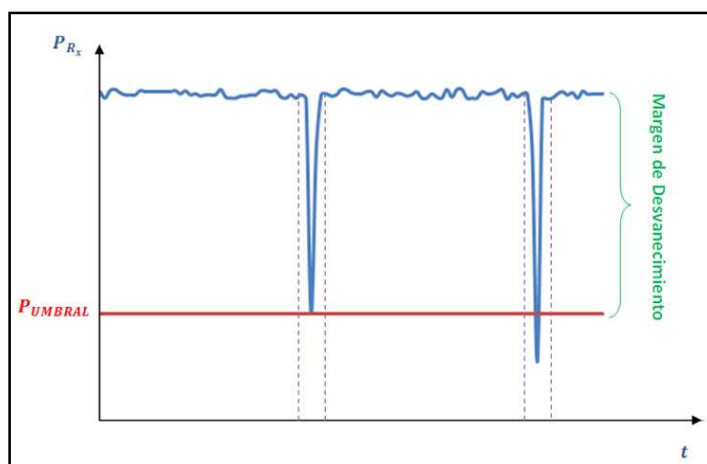


Figura. 3.10. Margen de Desvanecimiento

En la Figura. 3.10 se observa que el desvanecimiento genera la disminución de la potencia recibida con relación a su valor medio a largo plazo; por ello se establecen probabilidades (normal o Gaussiana) para determinar en qué instante el sistema puede dejar de funcionar.

Por lo tanto, su análisis es indispensable para poder predecirlo y evitar sus efectos, ya que estos tienen gran influencia en la calidad del servicio [48].

En este proceso también es necesario estudiar el ruido; por ello se indicarán diferentes parámetros que permiten establecer el balance de enlace:

Relación Señal Ruido [49]

La relación señal ruido se define como la mínima diferencia en [dB] que se debe alcanzar entre la señal útil y el ruido pudiendo ser este: ruido térmico o ruido

industrial debido a los microondas o a otra WLAN en la misma banda de frecuencias.

Al ser la señal más potente que el ruido dicha relación será positiva. Caso contrario, la relación señal ruido será negativa.

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \cdot \log \frac{P_{Señal}}{P_{Ruido}} \quad (3.30)$$

Bit Error Rate

La tasa de error de bit hace referencia al número de bits recibidos incorrectamente, con respecto a total de bit enviados en un determinado intervalo de tiempo.

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits}} \quad (3.31)$$

Potencia de Ruido [50]

- **Ruido Térmico:**

El ruido térmico se produce debido al movimiento de los electrones en los elementos integrantes de los circuitos, tales como conductores, semiconductores, tubos de vacío, etc. Entre sus principales características tenemos: es aleatorio, blanco y resistivo. Dicho ruido captado por la antena se expresa en la siguiente ecuación.

$$N_A = \kappa \cdot T_A \cdot B \quad (3.32)$$

Donde:

N_A → Ruido térmico producido por la antena.

- κ → Constante de Boltman cuyo valor es igual a $1.38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$ ó $-228 \left[\frac{dBW}{Hz} \cdot K \right]$
- T_A → Temperatura absoluta de la antena.
- B → Ancho de banda en [Hz].

Si se modifica dicha ecuación con los elementos pasivos hasta la entrada del receptor se obtiene la siguiente expresión.

$$N_e = \frac{\kappa \cdot T_A \cdot B}{a_g} + \kappa \cdot T_o \cdot B \cdot \left(1 - \frac{1}{a_g} \right) \quad (3.33)$$

Donde:

- N_e → Ruido a la entrada del R_x (considerando antenas y elementos pasivos).
- a_g → Atenuación de los elementos pasivos (expresado en veces).
- T_o → Valor constante de temperatura igual a 290[K].

Al hacer la consideración $T_A = T_o$, entonces la fórmula resultante es la siguiente:

$$N_e = \kappa \cdot T_o \cdot B \quad (3.34)$$

Por lo tanto, el ruido a la salida del receptor producido por elementos activos, y caracterizado por el factor de ruido estará definido por la siguiente ecuación:

$$N_{Rx} = F \cdot N_e \quad (3.35)$$

Donde:

- F → Factor de ruido del receptor (expresado en veces).

3.6.1 Mecanismos de Desvanecimientos [51]

Los mecanismos de desvanecimiento se dividen según sus características como lo muestra la Figura. 3.11:

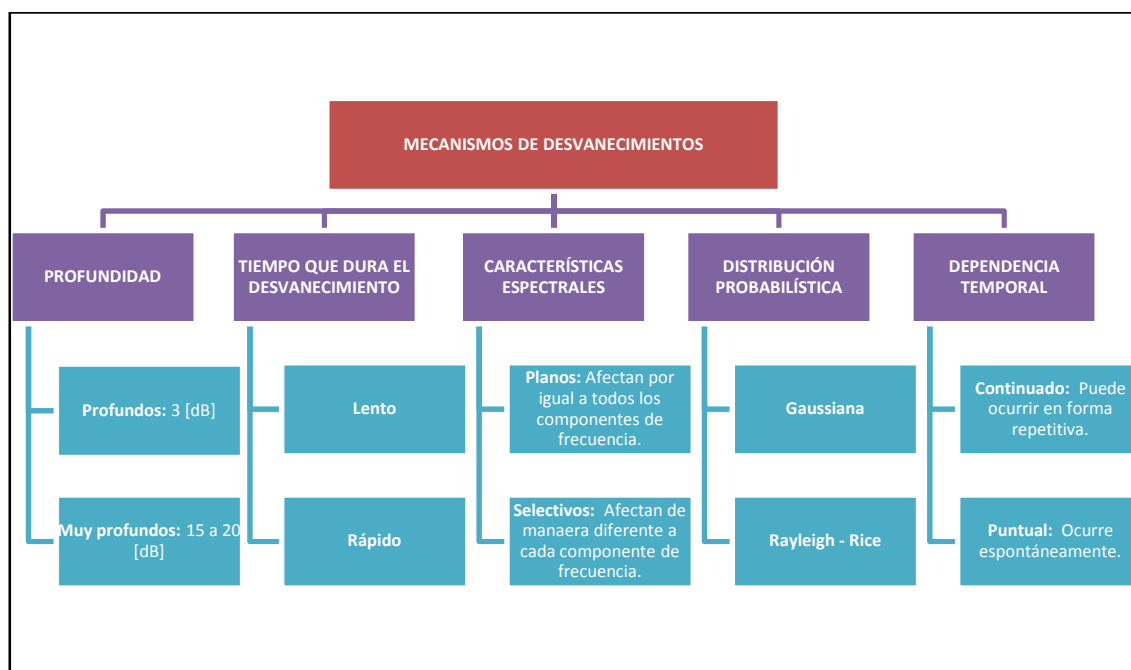


Figura. 3.11. Mecanismos de Desvanecimientos

En esta sección se realizará el análisis para el desvanecimiento multitrayectos debido a sus características espectrales que permite estudiar dos tipos de desvanecimientos: planos y selectivos (basados en [48] y [50]), en función de si afectan a toda la banda transmitida o sólo a una parte de ella.

Dichas interrupciones dependen de parámetros únicos definidos para cada país como son la frecuencia, longitud de salto, condiciones climáticas, asperezas y tipo de terreno.

Desvanecimientos Planos

El desvanecimiento plano se caracteriza por no ser selectivo en frecuencia y tiene como caso típico sistemas de media y baja capacidad, es decir, aquellos que estén por debajo de los 30 [Mbps]. Este fenómeno es causado por condiciones multitrayecto generadas por:

- Subrefracción severa.
- El rayo directo produce pérdidas de difracción adicionales debido a que se encuentra muy cercano al suelo.
- La variación del gradiente del coíndice modifica los ángulos de la salida y de llegada de las antenas.
- Al existir una pendiente, las capas atmosféricas obstaculizan la señal que va del transmisor al receptor.

Éste evento presenta un nivel crítico de ruido térmico a la entrada del receptor y crea una rápida y profunda atenuación de la señal. E inclusive, puede causar una interrupción si el margen de desvanecimiento es excedido.

El análisis de la probabilidad de ocurrencia de éste evento dependerá de características propias del enlace como: longitud, perfil topográfico, condiciones climáticas y frecuencia a la cual opera.

Para el caso de desvanecimientos muy profundos (> 15 [dB]) la distribución de probabilidad sigue la distribución *Raleigh*, la cual indica que por cada 10 [dB] de desvanecimiento, la probabilidad de ocurrencia decrece décuplo. La notación matemática se expresa de la siguiente manera:

$$P = P_o \cdot 10^{-\frac{M}{10}} \quad (3.36)$$

$$M = P_{Rx} - Umbral \quad (3.37)$$

Donde:

P → Probabilidad de desvanecimiento.

P_o → Factor que depende de la distribución de probabilidad.

M → Margen bruto de desvanecimiento.

Su expresión definida en porcentaje sería la siguiente:

$$P(\%) = 100 \cdot P_o \cdot 10^{-\frac{M}{10}} \quad (3.38)$$

El método usado para calcular P_o se denomina Mojoli, dicho procedimiento permite realizar el cálculo para el mes más desfavorable y a partir de ahí determina el factor de actividad. La fórmula se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_o = K \cdot Q \cdot f \cdot d^3 \quad (3.39)$$

Donde:

P_o → Factor que depende de la distribución de probabilidad.

K → Factor climático.

Q → Factor de rugosidad.

f → Frecuencia expresada en [GHz].

d → Distancia expresada en [km].

El factor climático puede tomar los valores que se indican en la Tabla. 3.3:

Tabla. 3.3. Factor Climático

CLIMA	VALOR DEL FACTOR CLIMÁTICO (K)
Templado	$4.1 \cdot 10^{-5}$
Continental	$2.1 \cdot 10^{-5}$
Seco y montañoso	10^{-5}

El factor de rugosidad se los define de la siguiente manera:

$$Q = S^{-1.3} \quad (3.40)$$

Donde:

S → Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad del terreno expresado en metros y se define como la desviación estándar de las alturas del perfil topográfico sobre el nivel del mar:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{n}} \Rightarrow \bar{h} = \frac{\sum h_i}{n} \quad (3.41)$$

Se suelen tomar muestras cada cierto número de kilómetros pero se excluye los extremos como se indica en la Figura. 3.12.

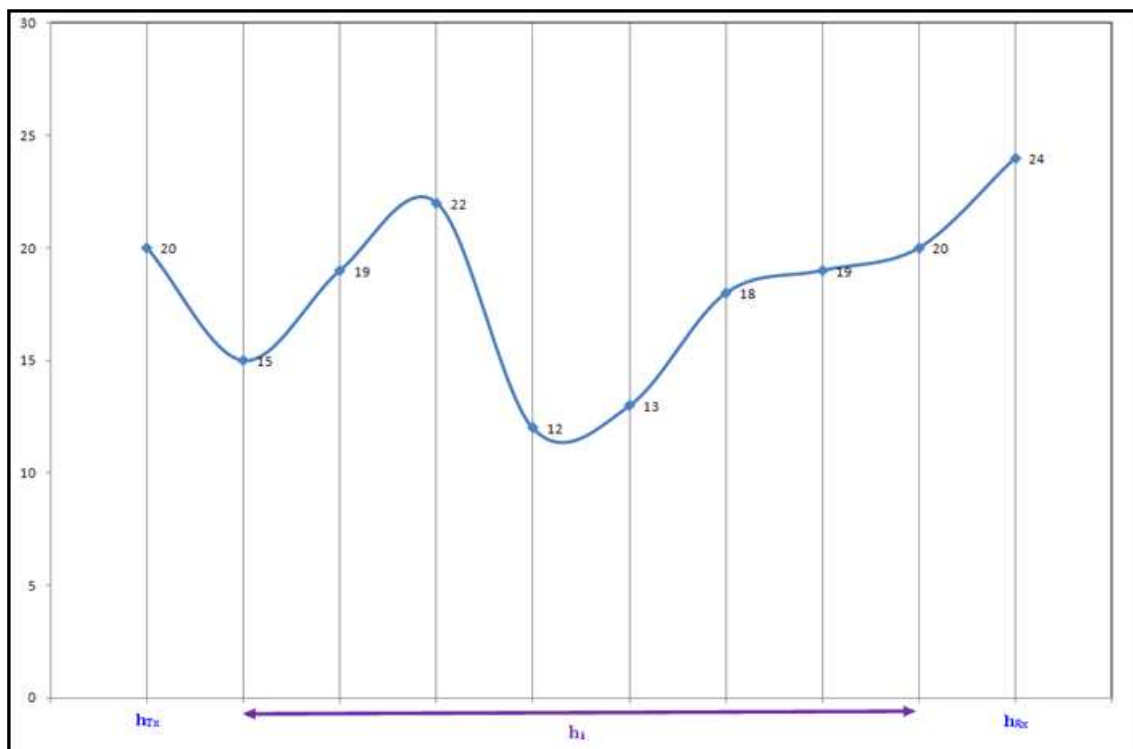


Figura. 3.12. Determinación de Alturas para el Cálculo del Coeficiente de Rugosidad.

Desvanecimientos Selectivos

Al propagarse la señal esta puede presentar deterioros y tomar diferentes trayectorias, este efecto se lo define como multitrayecto y es uno de los principales factores que genera el desvanecimiento selectivo debido a que produce una interferencia entre el rayo directo y los rayos que alcanzan la antena receptora.

Dicho desvanecimiento origina la presencia de *fading selectivo* en frecuencia, es decir, que afecta de modo diferente a unas frecuencias que a otras. En sistemas de banda ancha provoca una distorsión de la señal (IES).

En función del modelo de canal y de la caracterización de los equipos se aplican diferentes enfoques para la predicción de interrupciones:

- Métodos de las curvas de signatura o firma digital.
- Método del margen neto contra los desvanecimientos.
- Métodos que utilizan la distorsión lineal de amplitud.

Antes de explicar dichos métodos es necesario desarrollar el concepto de constate de Firma Digital.

- **Firma Digital**

La constante de la firma digital es una característica propia del receptor, por lo que depende del valor del BER. Dicho parámetro se puede obtener a partir de la curva de signatura mediante un simulador como se observa en la Figura. 3.13:

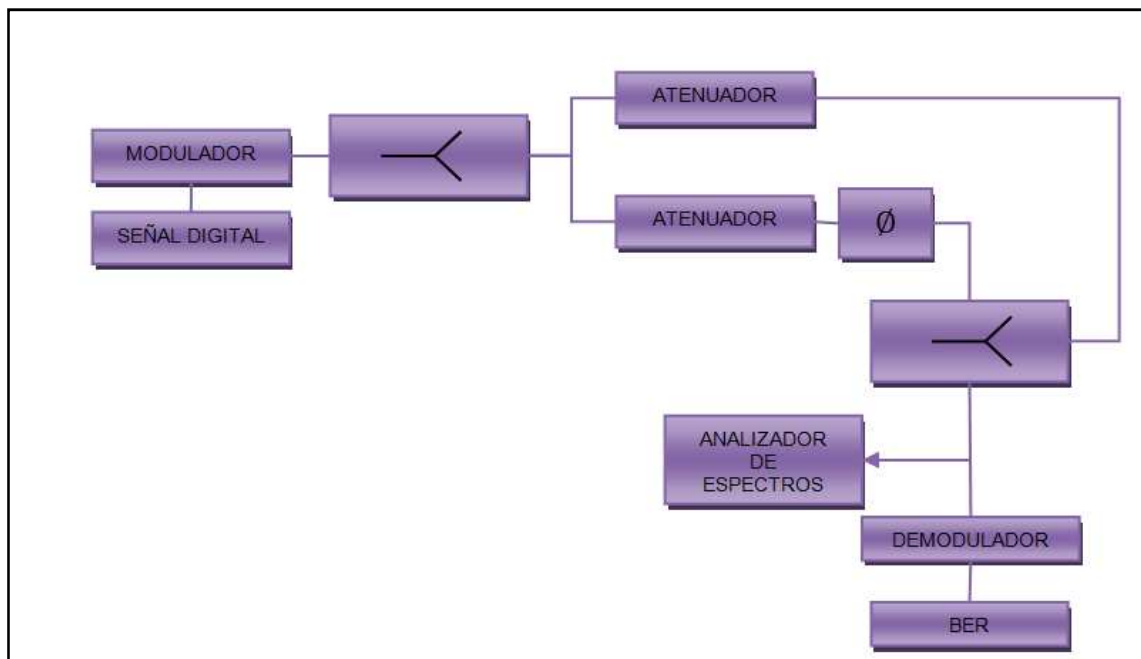


Figura. 3.13. Simulador del Canal de Dos Rayos

Al variar la frecuencia o el ángulo de fase en el modulador, se obtienen los resultados que se observan en la Figura. 3.14:

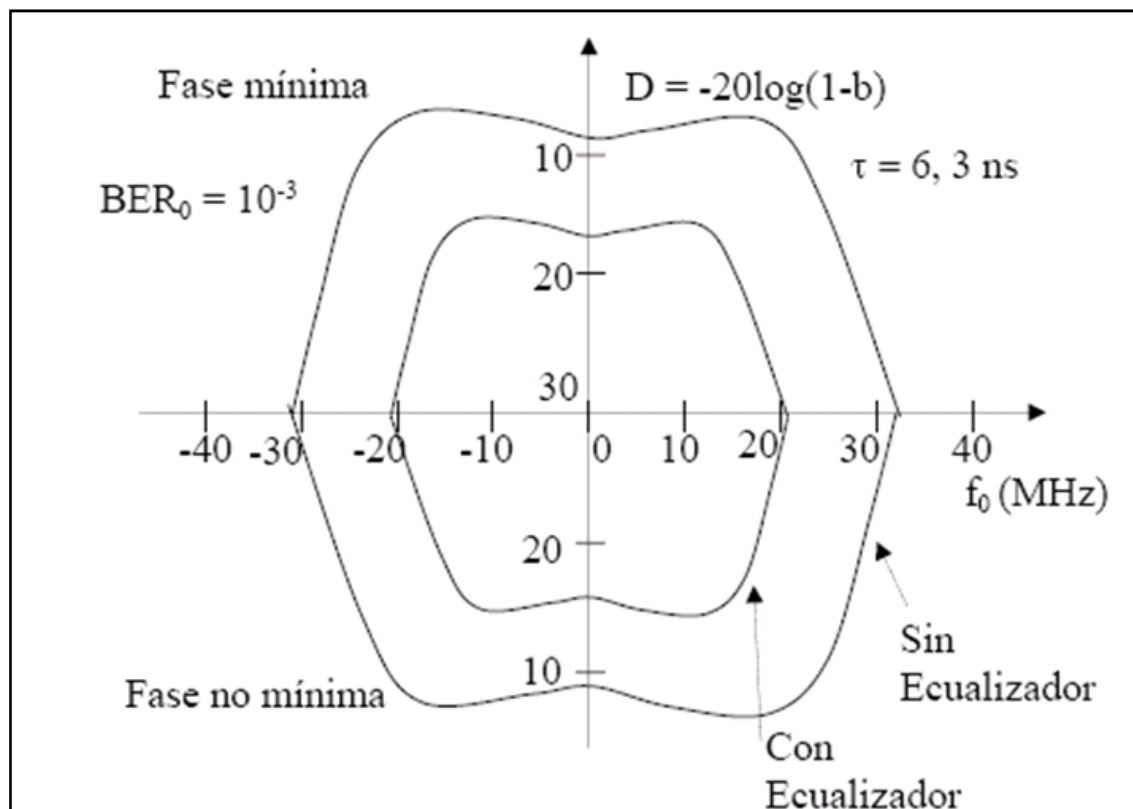


Figura. 3.14. Firma Digital [50]

La resistencia al desvanecimiento selectivo será mayor cuanto más estrecha y baja sea la curva de signatura.

Si el BER disminuye entonces la curva se desplaza hacia arriba pues existe mayor margen de desvanecimiento.

Para el cálculo de la probabilidad de desvanecimientos selectivos se determina la constante normalizada de la Firma Digital obteniendo la altura (D) y ancho de la curva de signatura (ω).

$$\kappa = A \cdot B \quad (3.42)$$

$$A = \omega \cdot T_s \quad (3.43)$$

$$B = T_s \cdot \frac{h(\tau_o)}{\tau_o} \quad (3.44)$$

$$h = 10^{-(D/20)} \quad (3.45)$$

Donde:

- κ → Constante de la Firma Digital.
- ω → Ancho de banda de la Firma Digital.
- T_s → Periodo del símbolo.
- τ_o → Tiempo medio de retardo $\tau_o = 6.3[ns]$.

- **Interrupción por Desvanecimiento Selectivo**

En base a la recomendación UIT-R. P.1093-1. se considerarán los siguientes métodos:

Métodos de las Curvas de Signatura

La probabilidad de desvanecimiento se fundamenta en el Método de Mojoli e indica el porcentaje de tiempo en que se supera una BER por desvanecimiento selectivo:

$$P_S = 100 \cdot \eta \cdot 4.32 \cdot \kappa \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)^2 [\%] \quad (3.46)$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2 \cdot (P_o)^{3/4}} \quad (3.47)$$

$$P_o = \mathbf{K} \cdot Q \cdot f \cdot d^3 \quad (3.48)$$

$$\tau_m = 0.7 \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^{1.3} [ns] \quad (3.49)$$

Donde:

- P_S → Probabilidad de desvanecimiento selectivo.
- η → Probabilidad de desvanecimiento multitrayecto.
- T_s → Periodo del símbolo.
- τ_m → Tiempo medio de retardo.

Los valores de la constante de la Firma Digital para $BER = 10^{-3}$ en función del método de modulación se muestran en la Tabla. 3.4.

Tabla. 3.4. Valor de la Constante de la Firma Digital para $BER = 10^{-3}$

MÉTODO DE MODULACIÓN	K $BER = 10^{-3}$
64 QAM	15.4
16 QAM	5.5
4 PSK	1.0

Para un sistema de alta capacidad (mayores a 30 [Mbps]) se debe calcular el método de desvanecimiento plano y selectivo. Mientras que para la velocidades menores sólo se calcula el desvanecimiento plano.

Métodos del Margen Neto

El valor teórico del margen neto permite calcular directamente el desvanecimiento selectivo utilizando para ello el método de desvanecimiento plano donde se sustituye el margen bruto con respecto al ruido e interferencias por un margen neto o efectivo.

Por lo tanto, el porcentaje de tiempo en que se supera una BER por desvanecimiento selectivo:

$$P_S = 100 \cdot P_0 \cdot 10^{-\frac{M}{10}} [\%] \quad (3.50)$$

3.6.2 Cálculo de la Interrupción Total por Desvanecimientos

La probabilidad total de desvanecimiento considerando desvanecimientos planos y selectivos es:

$$P_T = \left(P_P^{\frac{\alpha}{2}} + P_S^{\frac{\alpha}{2}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (3.51)$$

$$\alpha = 1.5 \dots 2$$

Donde:

$\alpha = 2 \rightarrow$ Se suman directamente en porcentajes.

$\alpha = 1.5 \rightarrow$ Se refiere a una situación más conservadora.

3.6.3 Técnicas de Diversidad

Las técnicas de diversidad son útiles para mejorar la disponibilidad del sistema y por ende la probabilidad de desvanecimiento:

- Diversidad de Espacio.
- Diversidad de Frecuencia.
- Diversidad de Polarización.
- Diversidad de Ángulo de Arribo.

Se va analizar:

Diversidad de Espacio

En esta técnica se usan dos antenas separadas verticalmente una determinada distancia s [m] como se observa en la Figura. 3.15.

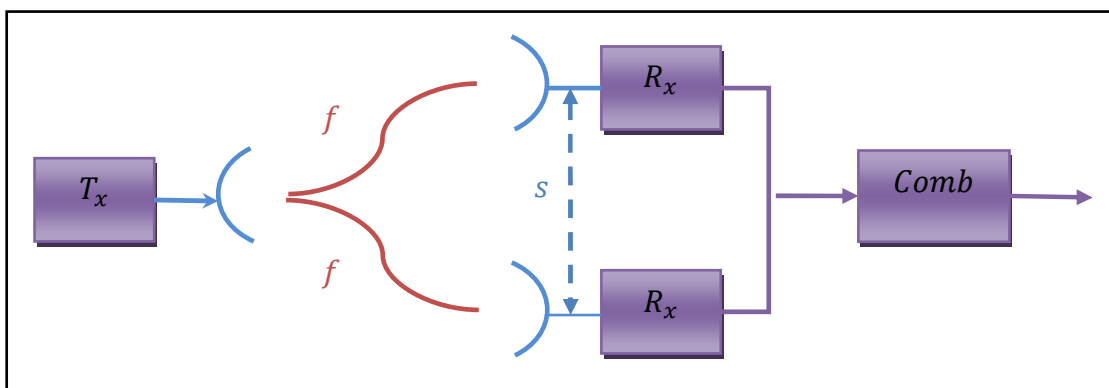


Figura. 3.15. Diversidad de Espacio

- **Probabilidad de Desvanecimiento Cuando se Utiliza Diversidad de Espacio**

Se ha desarrollado las siguientes ecuaciones:

Mejora No Selectiva:

$$I_p = \left[1 - \exp(-3.34 \cdot 10^{-4} \cdot s^{0.87} \cdot f^{-0.12} \cdot d^{0.48} \cdot P_0^{-1.4}) \right] \cdot 10^{\frac{(M-V)}{10}} \quad (3.52)$$

$$P_o = K \cdot Q \cdot f \cdot d^3 \quad (3.53)$$

$$V = |G_1 - G_2| \quad (3.54)$$

Donde:

s → Distancia en [m].

f → Frecuencia de la antena con menor altura en [GHz].

d → Distancia en [km].

P_o → De la antena con menor altura.

M → Margen de desvanecimiento de la antena de menor altura.

Coefficiente de Correlación Plana:

$$\rho_p^2 = 1 - \frac{I_p \cdot P_p}{\eta} \quad (3.55)$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2 \cdot P_o^{\frac{3}{4}}} \quad (3.56)$$

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0.974 \cdot (1 - \rho_p^2)^{2.170} & \rho_p^2 \leq 0.26 \\ 1 - 0.692 \cdot (1 - \rho_p^2)^{1.034} & \rho_p^2 > 0.26 \end{cases} \quad (3.57)$$

Coefficiente de Correlación Selectiva:

$$\rho_s^2 = \begin{cases} 0.823 & r_w \leq 0.5 \\ 1 - 0.195 \cdot (1 - r_w)^{0.109 - 0.13 \cdot \log(1 - r_w)} & 0.5 \leq r_w \leq 0.962 \\ 1 - 0.395 \cdot (1 - r_w)^{0.513} & r_w > 0.962 \end{cases} \quad (3.58)$$

Probabilidad de Interrupción con Diversidad:

$$P_{dp} = \frac{P_p}{I_p} \quad (3.59)$$

Donde:

P_{dp} → Probabilidad de desvanecimiento plano con diversidad de espacio.

P_p → Probabilidad de desvanecimiento plano sin diversidad de espacio.

I_p → Mejora no selectiva.

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta \cdot (1 - \rho_s^2)} \quad (3.60)$$

Donde:

P_{ds} → Probabilidad de desvanecimiento selectivo con diversidad de espacio.

P_s → Probabilidad de desvanecimiento selectivo sin diversidad de espacio.

ρ_s → Coeficiente de correlación selectiva.

$$P_d = (P_{ds}^{0.75} + P_{dp}^{0.75})^{1.33} \quad (3.61)$$

Donde:

P_d → Probabilidad total de desvanecimiento.

Diversidad de Frecuencia

En esta técnica se usa una antena que transmite dos frecuencias, es decir, requiere equipos que dependiendo del nivel de la señal conmutan a otra frecuencia. La modulación se realizará en otra portadora. Dicho procedimiento se muestra en la Figura. 3.16.

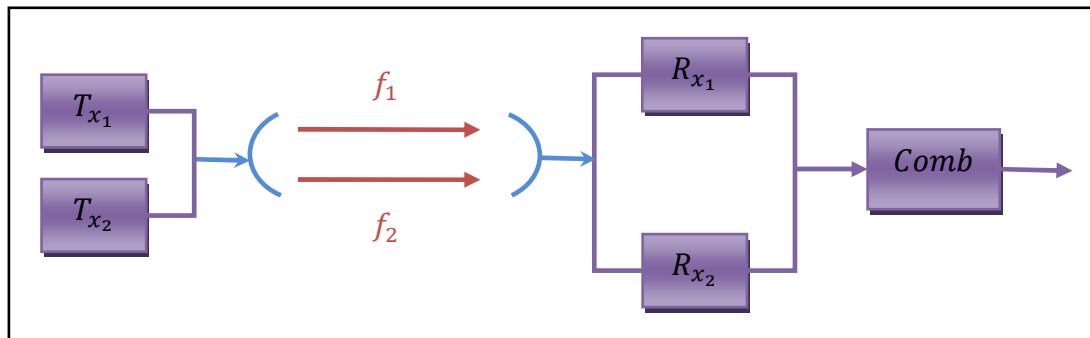


Figura. 3.16. Diversidad de Frecuencia

- **Probabilidad de Desvanecimiento Cuando se Utiliza Diversidad de Frecuencia**

Para el desarrollo de este cálculo se utiliza el mismo procedimiento que en el caso anterior sustituyendo el valor de la mejora no selectiva (plana) por:

$$I_p = \frac{80}{f \cdot d} \cdot \left(\frac{\Delta f}{f}\right) \cdot 10^{\frac{M}{10}} \quad (3.62)$$

$$\Delta f = f_2 - f_1 \Rightarrow f_2 > f_1 \quad (3.63)$$

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.64)$$

Diversidad de Espacio y Frecuencia

En casos críticos podemos utilizar los dos tipos de diversidad de forma simultánea. Pero estos sistemas involucran más costos.

En esta técnica se utilizan dos transmisores y dos receptores que trabajen en distintas frecuencias como se observa en la Figura. 3.17.

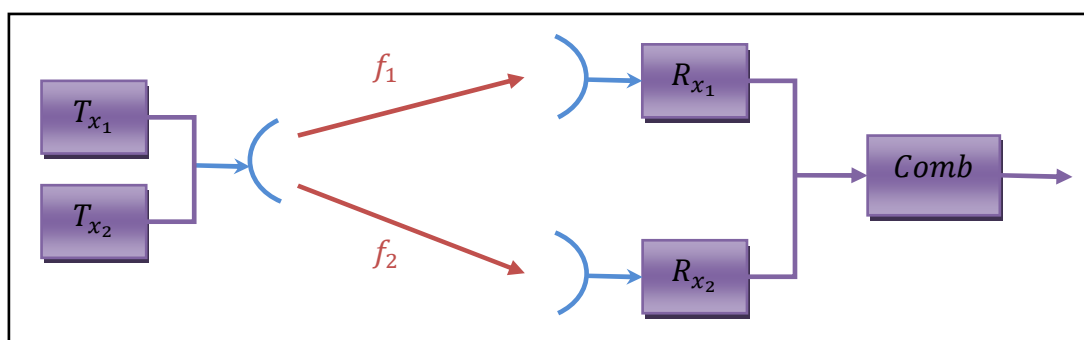


Figura. 3.17. Diversidad de Espacio y Frecuencia

- **Probabilidad de Desvanecimiento Cuando se Utiliza Diversidad de Espacio y Frecuencia**

Para el desarrollo de este cálculo se utiliza el mismo procedimiento que en el caso de diversidad de espacio sustituyendo el valor del coeficiente de correlación plana ρ_p :

$$\rho_p = \rho_{pe} \cdot \rho_{pf} \quad (3.65)$$

Donde:

ρ_{pe} → Coeficiente de correlación plana para diversidad de espacio.

ρ_{pf} → Coeficiente de correlación plana para diversidad de frecuencia.

Además, para mejorar la disponibilidad también se usa equipos de respaldo o también llamados dispositivos redundantes como lo muestra la Tabla. 3.5.

Tabla. 3.5. Equipos de Respaldo

1+1	1 transmisor y 1 respaldo
2+1	2 equipos funcionando y 1 de respaldo.
2+2	2 equipos funcionando y 2 de respaldo.
n+0	Cuando se usa como respaldo otro medio como fibra óptica.

3.7 Diseño de la Red de Sensores

El diseño de Red de Sensores Inalámbricos basada en el estándar IEEE 802.15.4 – Zigbee, no requiere línea de vista para el enrutamiento entre los nodos. Y para el desarrollo de este proyecto se ha optado por una red Ad-Hoc con topología dinámica tipo árbol debido a que la distribución de nodos es no uniforme, por lo tanto, esta estructura de red facilitará su despliegue, permitirá la monitorización de diferentes tipos eventos y presentará una mayor tolerancia a fallas. Dicha tecnología va a operar en la banda libre 2.4 [GHz] con una tasa máxima de transferencia de 250 [kbps].

La arquitectura de la red WSN comprende: sensores, nodos, Gateway y estación base.

Los nodos presentan larga autonomía, ya que son autoconfigurables y la comunicación entre estos se basa en el método *multihop*. Además, poseen un rango de operación de 10 a 100 [m].

A continuación, la Tabla. 3.6 presenta las principales características de la red:

Tabla. 3.6. Características de la Red WSN

CARACTERÍSTICAS DE LA RED WSN	
Tipo de red	Ad-Hoc
Topología	Árbol
Obligaciones de los sensores	Simétrica
Capacidad	Asimétrica
Movilidad de los nodos sensores	No
Tipos de variables	Temperatura, humedad y sísmica

CAPÍTULO 4

4. PLANIFICACIÓN DE LA RED

4.1. Enlace Inalámbrico ESPE – Volcán Cotopaxi

El desarrollo de este proyecto requiere determinar la ubicación de una estación transmisora de los datos censados en el Volcán Cotopaxi y una estación base que permita la monitorización de los datos obtenidos en dicho volcán; por ello es necesario realizar el estudio y reconocimiento topográfico tanto del Campus de la ESPE – Sangolquí como del Volcán Cotopaxi.

Adicionalmente, para la elaboración del presente capítulo se realizaron diferentes estudios de campo y utilizado un GPS (*Global Positioning System*) *Meridian Platinum 2004 Thales Navegation* cuya precisión es de ± 5 metros, se pudieron obtener las coordenadas y alturas de los puntos estratégicos necesarios para establecer y diseñar la red inalámbrica.

Este análisis es importante, ya que permitirá realizar diferentes estudios de vano y coberturas, compararlos y determinar la mejor ubicación para las estaciones de transmisión y recepción de la red de transporte.

4.1.1. Reconocimiento Topográfico del Campus de la ESPE – Sangolquí

Es indispensable determinar un lugar estratégico en el Campus de la ESPE que permita la comunicación vía inalámbrica con la estación transmisora ubicada en el Volcán Cotopaxi, así también establecer una estación base donde se pueda realizar la monitorización de la actividad volcánica; por ello se requiere definir las

coordenadas geográficas y las alturas de los puntos estratégicos en los cuales se colocarán los equipos, dichos puntos corresponden a los edificios y construcciones que posee la ESPE como lo muestra la Tabla. 4.1.

Tabla. 4.1. Alturas y Coordenadas de las Dependencias de la ESPE [52]

Nº	EDIFICIO	ALTURA DE TERRAZAS [m]	COORDENADAS	
			Latitud	Longitud
1	Edificio Administrativo	22	0°18'53" S	78°26'38" O
2	Bar	6	0°18'54" S	78°26'44" O
3	Biblioteca	8	0°18'51" S	78°26'38" O
4	Bloque D	10	0°18'46" S	78°26'43" O
5	Departamento de Eléctrica y Electrónica	5	0°18'45" S	78°26'45" O
6	Edificio Central	10	0°18'51" S	78°26'43" O
7	Elect.-Biotecnología	5	0°18'45" S	78°26'45" O
8	Geográfica	7	0°18'54" S	78°26'46" O
9	Idiomas	6	0°18'47" S	78°26'40" O
10	Mecánica	7	0°18'49" S	78°26'49" O
11	Residencia	10	0°18'59" S	78°26'35" O
12	Coliseo	5	0°19'03" S	78°26'38" O
13	Casino	8	0°19'03" S	78°26'35" O
14	MED	10	0°18'48" S	78°26'43" O
15	Transportes	3,5	0°19'09" S	78°26'42" O

En la Figura. 4.1 muestra la ubicación exacta de cada dependencia perteneciente al Campus Politécnico.



Figura. 4.1. Ubicación de las Diferentes Dependencias de la ESPE [52]

Por lo tanto, se determinó que el lugar propicio para la ubicación de los equipos receptores es el Edificio Administrativo y que el laboratorio que permitirá la monitorización de los datos obtenidos será el Departamento de Eléctrica y Electrónica.

Sin embargo, en este proyecto se utilizarán diferentes puntos de pruebas para desarrollar un análisis mucho más adecuado.

4.1.2. Reconocimiento Topográfico del IASA

El Instituto Agropecuario Superior Andino (IASA-ESPE) está ubicado en la hacienda El Prado, en el Barrio San Fernando, Sangolquí. Debido a su situación geográfica y altimetría ha sido considerado como un punto auxiliar o de respaldo para este proyecto, es decir, se podría considerar la ubicación de una repetidora en estas instalaciones en caso de ser necesario para establecer el enlace Wi-Fi, por lo que se determinó tres lugares estratégicos en las zonas más altas del IASA, obteniéndose las coordenadas que se muestran en la Tabla. 4.2:

Tabla. 4.2. Alturas y Coordenadas de Puntos Estratégicos del IASA

Nº	PUNTO ESTRATÉGICO	ALTURA (m)	COORDENADAS	
			Latitud	Longitud
1	IASA 1	2759	0°23' 35" S	78°24' 52" O
2	IASA 2	2763	0°23' 31" S	78°24' 52" O
3	IASA 3	2842	0°24' 42" S	78°24' 57" O

En la Figura. 4.2 muestra la ubicación exacta de los puntos anteriormente mencionados pertenecientes al IASA.

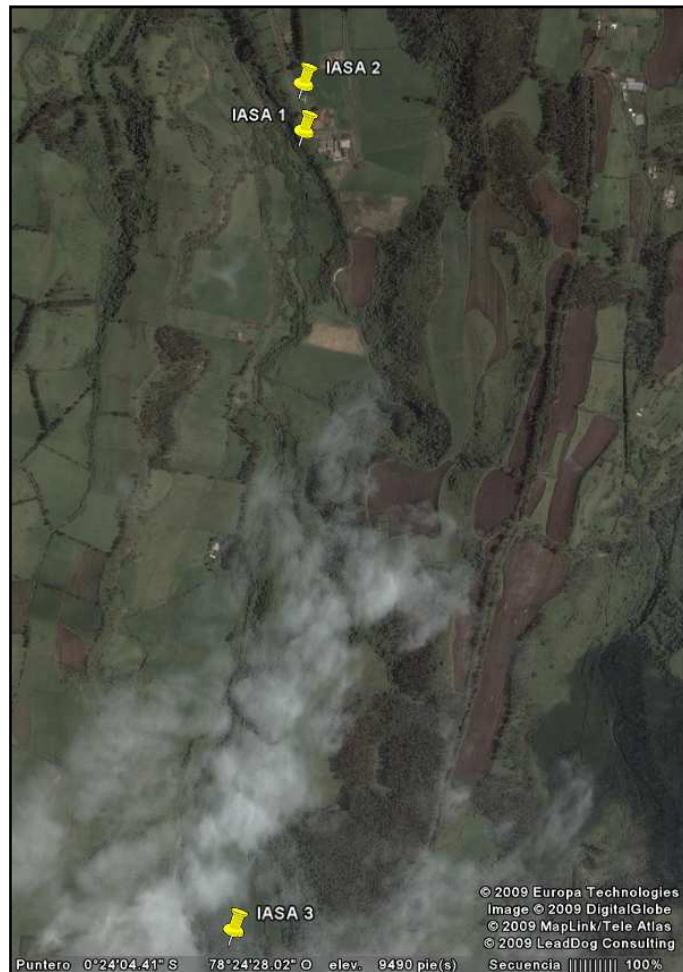


Figura. 4.2. Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el IASA

Para mayor información del estudio topográfico y de los puntos estratégico establecidos en el IASA ver Anexo 1.

4.1.3. Reconocimiento Topográfico del Volcán Cotopaxi



Figura. 4.3. Ubicación Geográfica del Parque Nacional Cotopaxi [53]

Como se observa en la Figura. 4.3, el área del Parque Nacional Cotopaxi tiene una superficie es de 33393 hectáreas que comprende las provincias de Cotopaxi, Napo y Pichincha. Se caracteriza por tener un clima frío cuyas

temperaturas varían entre los 0 y 15 grados centígrados, y precipitaciones lluviosas anuales de 500 a 1.500 [ml]. Presenta elevaciones que varían entre los 3350 y los 5800 [msnm], y su interior posee una gran plantación de pino de aproximadamente 1.750 hectáreas y se encuentra bañada por los ríos Cutuchi y Daule, varios riachuelos y otras corrientes [54].

El Volcán Cotopaxi está ubicado en el centro del Parque Nacional, en la Cordillera Real de los Andes Ecuatorianos a unos 60 [km] SE de Quito y su cumbre alcanza los 5897 [msnm]. Es un estratocono que posee un diámetro basal de 16 x 19 [km], un cráter somital de 800 [m] de diámetro y 160 [m] de profundidad coronado por un cono simétrico perfecto cubierto por unos 20 [km²] de potentes glaciares a partir de los 5000 [msnm] cuyo volumen estimado es de 0.5 [km³] [55].

En nuestro estudio el Volcán Cotopaxi será monitoreado por una red *mesh* utilizando WSN, por lo cual se requiera una estación base que recoja los datos obtenidos por los sensores y que pueda transmitir dicha información a la estación de vigilancia ubicada en la ESPE – Sangolquí.

Por lo tanto, se determinaron dos puntos estratégicos para el proceso anteriormente descrito ubicados en las cercanías del Refugio José Rivas.

En la Figura. 4.4 se observa el Refugio José Rivas ubicado en el Parque Nacional Cotopaxi.

Para una mejor comprensión de las coordenadas del Refugio José Rivas se presenta en la Figura. 4.5 la panorámica del Volcán Cotopaxi con ayuda de la herramienta *Google Earth*.



Figura. 4.4. Refugio José Rivas – Parque Nacional Cotopaxi

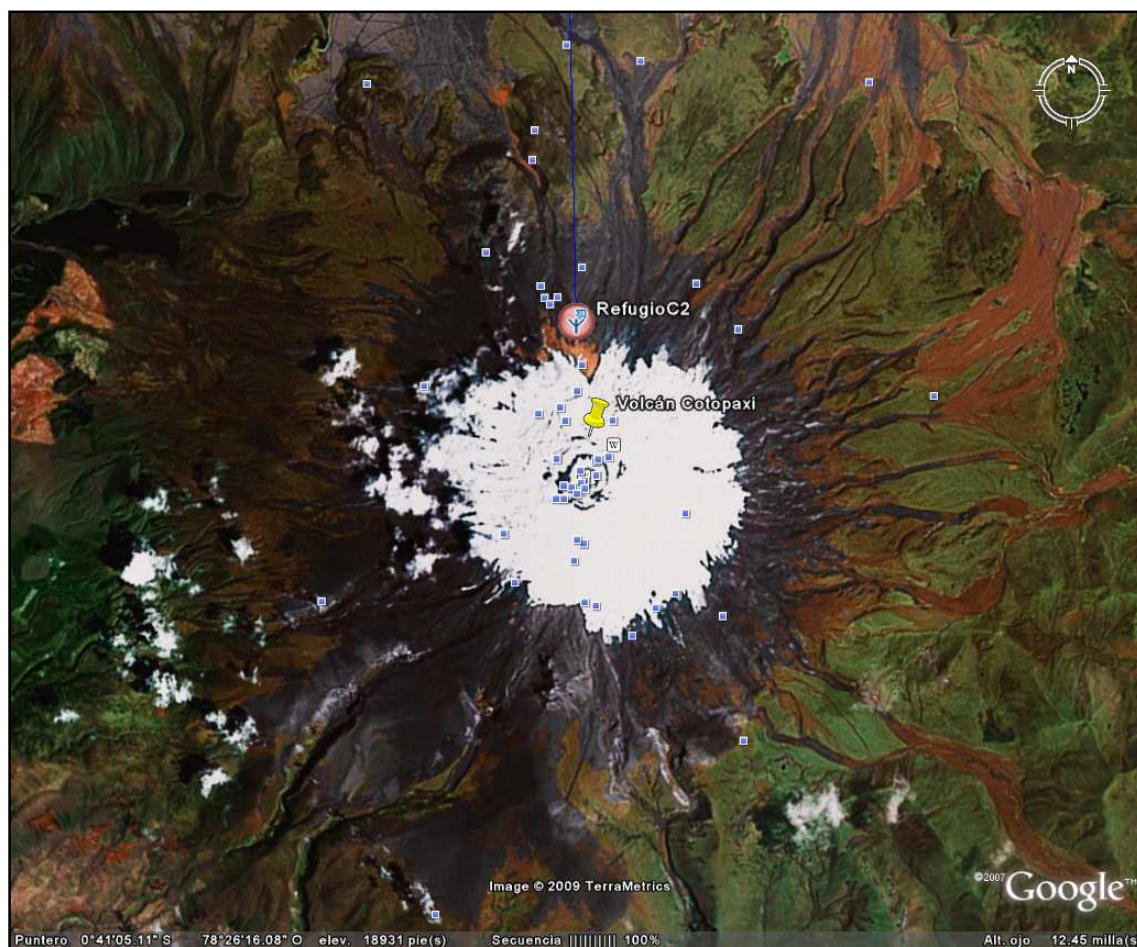


Figura. 4.5. Ubicación del Refugio José Rivas – Volcán Cotopaxi

Las coordenadas de dichos puntos se muestran en la Tabla. 4.3:

Tabla. 4.3. Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el Volcán Cotopaxi

Nº	PUNTO ESTRATÉGICO	ALTURA (m)	COORDENADAS	
			Latitud	Longitud
1	COTOPAXI 1	4883	0°39' 49" S	78°26' 17" O
2	COTOPAXI 2	4888	0°39' 50" S	78°26' 19" O

En la Figura. 4.6 se muestra la ubicación exacta de los puntos anteriormente mencionados.

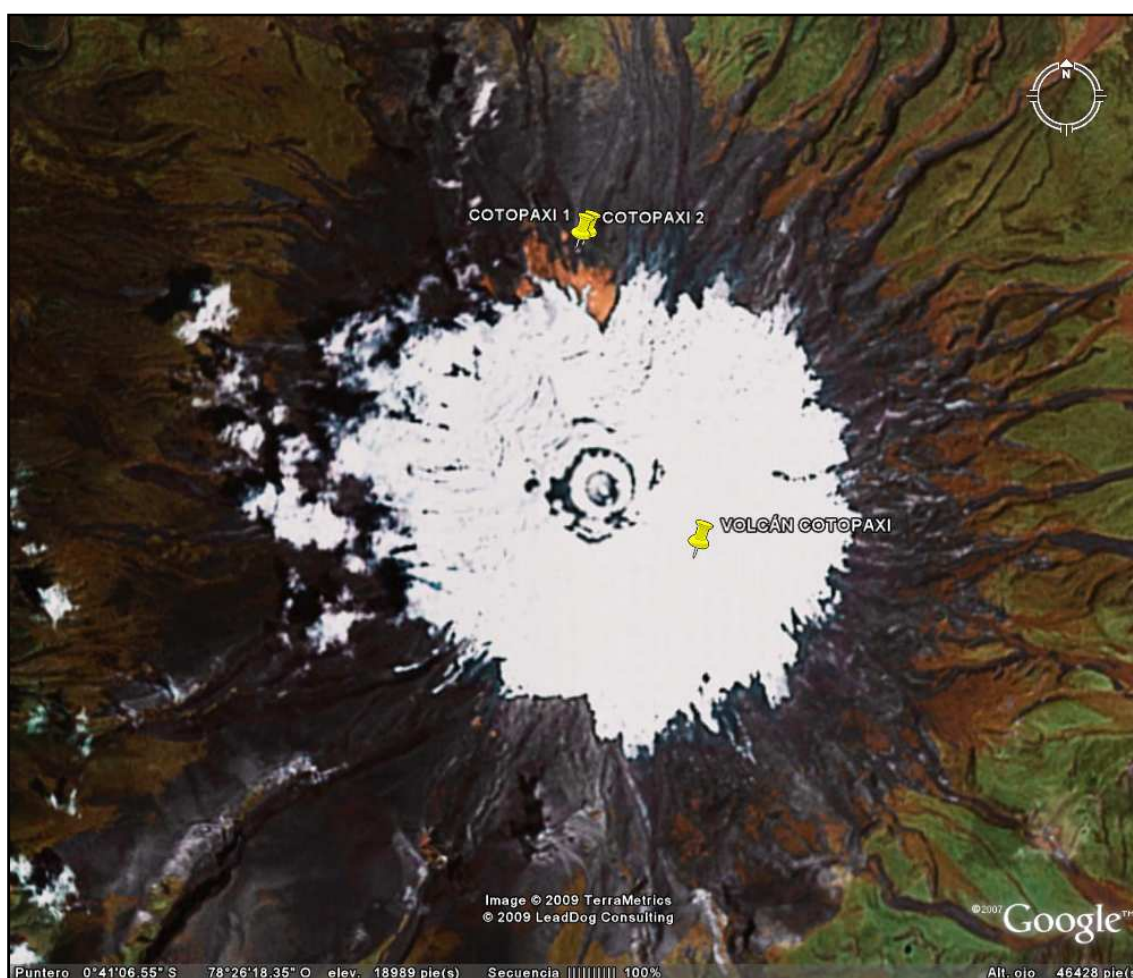


Figura. 4.6. Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el Volcán Cotopaxi

Para mayor información del estudio topográfico y de los puntos estratégico establecidos en el Volcán Cotopaxi ver Anexo 2.

4.1.4. Determinación de los Parámetros Topográficos para el Enlace ESPE – Volcán Cotopaxi

Se ha determinado que la mejor tecnología para establecer este enlace punto a punto es la tecnología Wi-Fi con MAC Modificada. La distancia del enlace que muestra la Figura. 4.7 es de 38.712 [km].

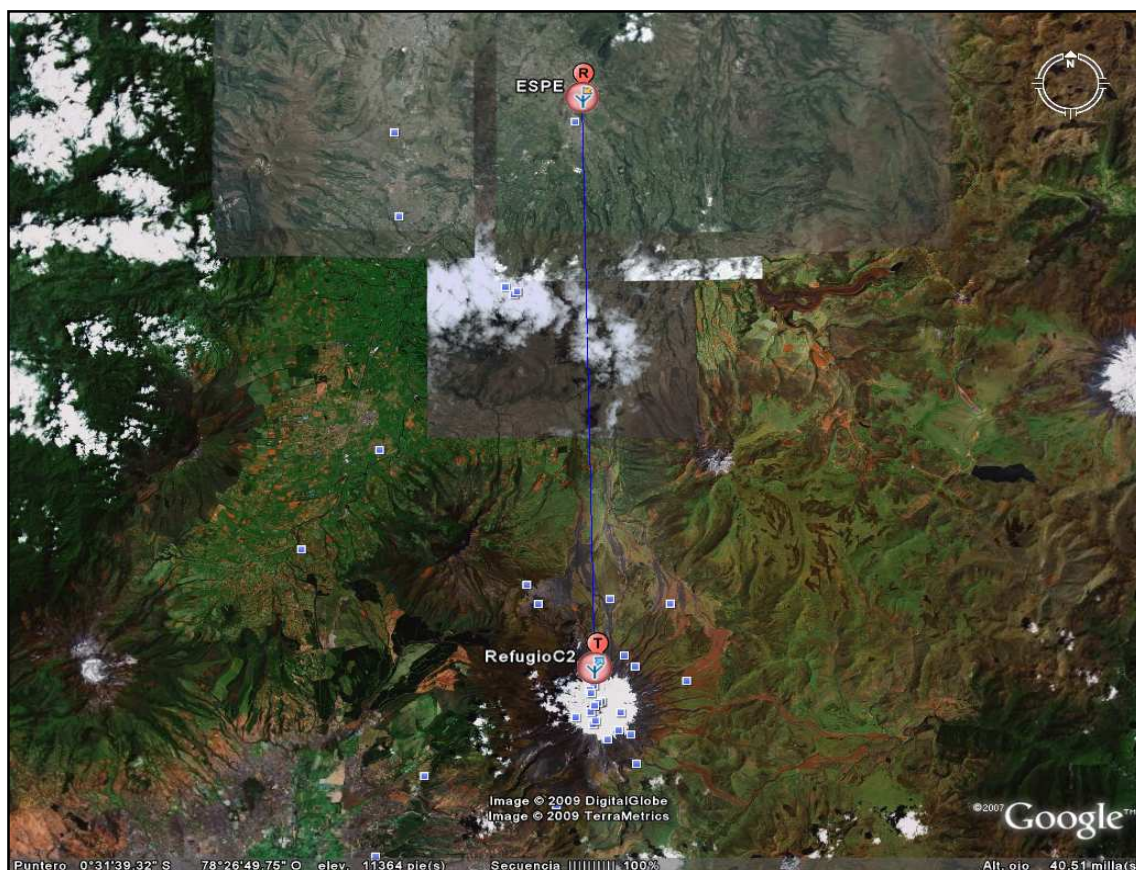


Figura. 4.7. Enlace ESPE – Refugio José Rivas

La Tabla. 4.4 muestra las alturas y las coordenadas de los posibles puntos para la ubicación de la estación de transmisión y de recepción.

Tabla. 4.4. Coordenadas del Enlace Wi-Fi Volcán Cotopaxi - ESPE.

	ESTACIÓN BASE	ALTURA DE TERRAZAS (m)	COORDENADAS	
			Latitud	Longitud
Tx	Refugio José Rivas 1	0	0°39' 49" S	78°26' 17' O
Tx	Refugio José Rivas 2	0	0°39' 50" S	78°26' 19' O
Rx	IASA 1	2759	0°23' 35" S	78°24' 52" O
Rx	IASA 2	2763	0°23' 31" S	78°24' 52" O
Rx	IASA 3	2842	0°24' 42" S	78°24' 57" O
Rx	Edificio Administrativo	22	0° 18' 53" S	78° 26' 38" O

En la Figura. 4.8 se muestra el enlace Refugio José Rivas y ESPE-Sangolquí (Edificio Administrativo) conjuntamente con la repetidora ubicada en el IASA.

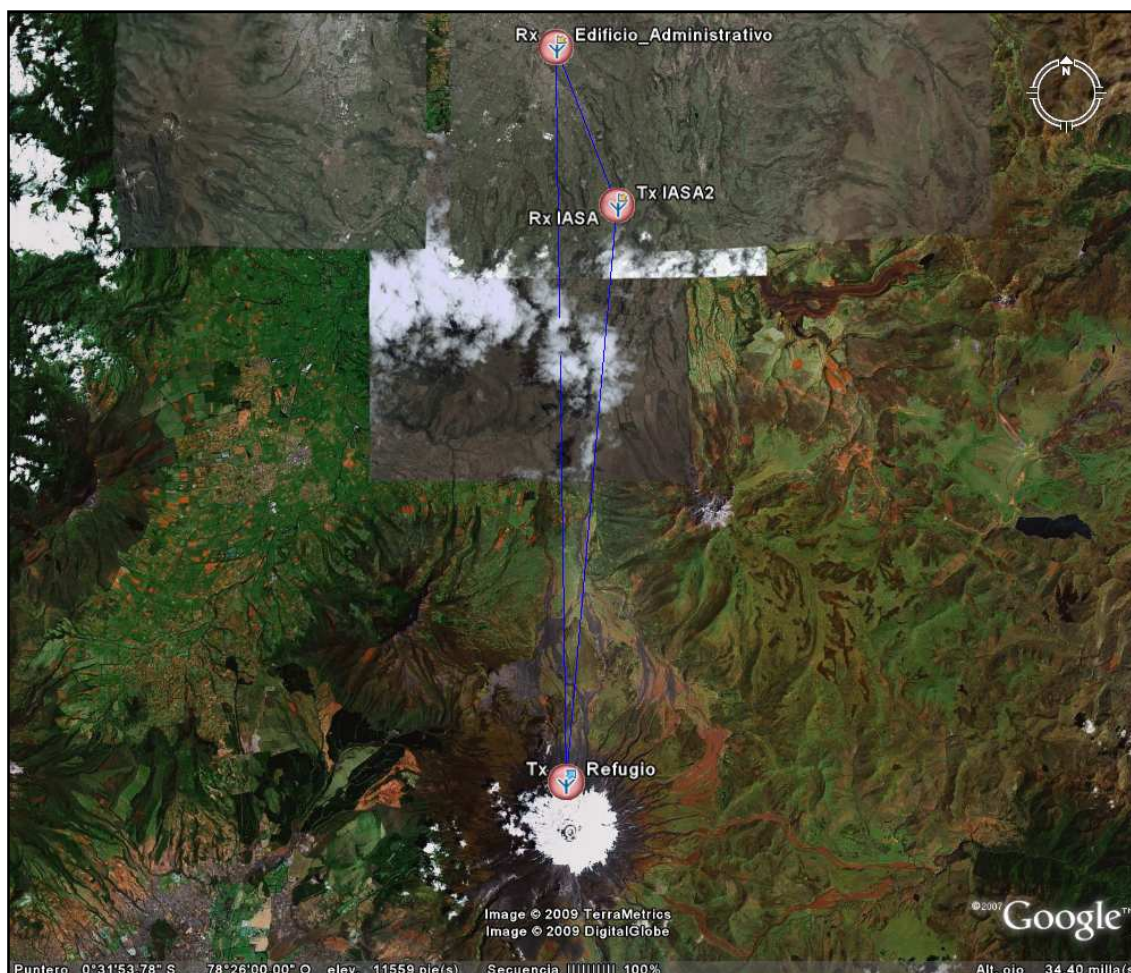


Figura. 4.8. Ubicación de las Estaciones del Enlace Wi-Fi Volcán Cotopaxi - ESPE.

4.2 Enlace WSN en el Volcán Cotopaxi

El estudio y la monitorización del Volcán Cotopaxi requiere sensores diseñados para recoger datos sísmicos e infrasónicos relevantes a través de una red *mesh* utilizando el método *multihop*, dichos datos serán transmitidos desde una estación base ubicada en el Refugio José Rivas a la base receptora localizada en el Campus Politécnico de la ESPE a través de un enlace Wi-Fi a larga distancia.

Se puede decir que la “exactitud y precisión” de los datos es directamente proporcional al número de nodos ubicados en el volcán.

4.2.1 Reconocimiento Topográfico y Ubicación de Puntos Estratégicos en el Volcán Cotopaxi

El Volcán Cotopaxi forma parte del Nudo de Tiopullo y posee una altura de 5897 msnm, por lo que es considerado como el volcán activo más alto del mundo y uno de los más peligrosos del Ecuador. Se caracteriza por tener un perfecto cono cubierto por capas inclinadas de material volcánico (bombas, lapilli y ceniza) y presenta glaciares sobre los 4800 [m], principalmente en lado oriental. Además, posee surcos profundos en direcciones radiales debido a la erosión producida en el manto [54].

Es muy probable que su actividad futura sea de magnitud moderada a grande debido a que el volcán Cotopaxi hace varios siglos se encuentra en una fase de erupciones andesítica (erupciones leves a moderadas) [1]. Su actividad volcánica se caracteriza por la generación de grandes y destructivos lahares, y caídas de piroclastos y ceniza. Sin embargo, la evolución tecnológica ha permitido desarrollar diferentes tipos de monitorización y vigilancia basados en los cambios físicos y químicos del sistema magmático, utilizando instrumentos científicos extremadamente sensibles o por observación visual. A continuación, se presentan los métodos que se pueden utilizar en el Volcán Cotopaxi debido a sus características, esta información está basada en los documentos [56] y [57]:

Vigilancia por Observación

Este método está basado en la observación de forma sistemática por medios visuales para determinar anomalías físicas que indiquen un cambio en el estado y en la actividad del volcán como: emanación de gases y cenizas, deslizamientos, deformaciones, cambios en el caudal, detección de daños o muerte de la vegetación y comportamiento de los animales. Además, este método incluye la percepción de ruidos y sismos de origen volcánico.

Monitorización Sísmica

Los sismómetros son instrumentos extremadamente sensibles que permiten detectar vibraciones del suelo producidas en el interior del volcán debido al movimiento de magma o de gases magmáticos.

Generalmente se instalan en una red de tres o más dispositivos sobre y alrededor del volcán. Se utilizan sismómetros y geófonos de periodo corto verticales o en arreglos triaxiales, y de periodo largo o de banda ancha.

Monitorización Geodésica

La medición de la deformación del suelo se basa en determinar los cambios topográficos en consecuencia del ascenso del magma en el interior del volcán.

La instalación de redes de geodésicas utiliza diferentes métodos como la nivelación, triangulación, trilateración, inclinometría seca, gravimetría o sistemas electrónicos como radiotelemetría y mediante sistemas de posicionamiento global, GPS.

Monitorización Geoquímica

Se basa en el análisis de la composición química de las fumarolas y fuentes termales, y otras variables como vientos, temperaturas, precipitación, pH, y emanación de gas radón. Por consiguiente, los sensores pueden ser ubicados en las cercanías del cráter y en fuentes termales de Salitre como en el sector del Río Pita.

Por tanto, en la topología de una red WSN es fundamental tener un adecuado rendimiento y calidad de servicio (QoS) para la transmisión de mensajes, es decir, en este tipo de comunicaciones se debe tomar en cuenta parámetros como el retraso del mensaje, tiempos de vencimiento, tasa de error de bit, pérdidas de paquetes e inclusive consideraciones económicas y de la aplicación; por ello se escogió la topología *mesh*, la cual es robusta, potencializa

los recursos de esta tecnología a gran escala y permite la transmisión de la información a nodos vecinos haciendo referencia al método *peer to peer* y utilizando múltiples caminos. Además, esta estructura posee nodos idénticos y con las mismas capacidades pero admite la asignación de grupos líderes que asumen funciones adicionales y cuando se desactiva uno de estos, otro nodo puede asumir dicho cargo. Sin embargo, se debe tener cuidado con el número de nodos del enlace, ya que al aumentar estos, el número de enlaces aumenta exponencialmente pudiendo tener problemas con las rutas y la disponibilidad de grandes cantidades de potencia [58].

4.3 Determinación de Equipos

La correcta elección de equipos es muy importante, ya que tanto la red de transporte como la red de monitorización requieren de una confiable distribución y transmisión de datos; por ello las características de los equipos son fundamentales para definir el alcance y cobertura real del proyecto. También es necesario realizar un estudio y simulaciones previas que se asemejen a la realidad para determinar los parámetros relevantes del diseño.

La selección de equipos se ha dividido en dos grupos, pues, se requiere trabajar con dispositivo específicos para los estándares 802.11 y 802.15.4. El servicio de radiocomunicación ofrecido será fijo entre puntos determinados y ambos estándares deberán operar en la banda de frecuencia sin licencia de 2.4 [GHz] reguladas por el CONATEL.

4.3.1 Equipos para la Red Cotopaxi – ESPE [59]

Actualmente, existen diversos tipos de productos y fabricantes cuyos parámetros técnicos cumplen con los requerimientos del enlace Wi-Fi con MAC alternativo de largo alcance. Sin embargo, se ha optado por la solución menos costosa, que es la construcción de un nodo Wi-Fi que puede ser utilizado en exteriores a larga distancia.

Para la montar dicho router es necesario contar con los siguientes dispositivos:

Software

- **Imagen de Voyage Linux V0.5.2:** Microdistribución del Sistema Operativo Linux para router inalámbricos.

Hardware

- Placa Alix.
- Memoria Compact Flash.
- Antenas direccionales de 24 [dBi].
- Carcasa de exteriores para Alix.
- Radios 802.11 b/g miniPCI.
- Inyector PoE para alimentar el router por el cable de datos.
- Pigtailes y minicables coaxiales.
- Fuente de alimentación.

Para más información de parámetros técnicos de los equipos ver Anexo 3.

4.3.2 Equipos para la Red de WSN [60]

Actualmente, la tecnología de las TIC ha desarrollado varias soluciones para los medioambientales, la seguridad, la industria, la construcción, los servicios públicos, los sistemas de transporte y la automatización, las cuales están basadas en redes WSN, ya que por sus características permiten realizar una monitorización en tiempo real e integración de dispositivo (MOTEs) con sensores o actuadores, creando entornos inteligentes que constan de una distribución de múltiples nodos en una determinada área.

Para la arquitectura de la red de sensores inalámbricos es necesario contar con los siguientes dispositivos:

Software

- Software de programación. Para este proyecto se utilizará el software de fábrica MoteView cuyo lenguaje es el NesC6 y cuyo sistema operativo es el TinyOS5 que soporta diferentes plataformas Windows: *XP Home, Profesional, y 2000 Service Pack 4.*

Hardware

- Nodos MPR2400.
- Sensores MTS310 (Sismicidad, Temperatura, luz, acústico, magnetómetros).
- Estación Base MIB520CB de comunicación Serial USB (Gateway).
- Procesador/Radio.
- Tarjeta de programación USB.
- Antenas GPS.

Para más información de parámetros técnicos de los equipos ver Anexo 4.

SIMULACIÓN DE LA RED

4.4 Simulación en SIRENET [61]

Actualmente existen diferentes aplicaciones informáticas con licencia o software libres que permiten realizar la simulación de cualquier tipo de comunicación inalámbrica o servicio radioeléctrico, facilitando su diseño, planificación y gestión.

Para el diseño de la red de transporte se ha empleado el software licenciado SIRENET 3.0 (*Simulation of RadioElectric NETWORKS*), desarrollado por la compañía española Intelia, que integra la información geográfica y simulaciones radioeléctricas sobre cartografía digital, con algoritmos y métodos de estimación de las pérdidas de propagación.

Dicho software fue seleccionado, ya que presenta una interfaz gráfica amigable e intuitiva que permite al programador establecer los parámetros y, ser guiado por un conjunto de menús y ventanas hasta obtener resultados fiables y fáciles de interpretar. Además, esta herramienta permite definir el perfil del terreno con mapas de alta precisión topográfica y altimetría, analiza la disminución de la señal eléctrica en una línea que une un transmisor con un receptor. Mediante este cálculo se puede verificar si existe visión directa entre el transmisor y el receptor, si está libre la primera zona de Fresnel y el nivel de señal recibido en todos los puntos del trayecto; por ello este proceso tiene gran importancia para determinar si las características de los equipos, en base al diseño desarrollado en el Capítulo 3 fueron adecuadas.

Otra ventaja de SIRENET es que los resultados, objetos y elementos radioeléctricos del estudio pueden ser almacenados, impresos y exportados a diferentes formatos como por ejemplo a ficheros *.kmz* compatibles con *Google Earth*.



Figura. 4.9. Sirenet 3.0

4.4.1 Simulación y Cálculos de la Red de Transporte

Con el objetivo de conocer las características del perfil del terreno y alcance de la señal eléctrica de la red inalámbrica a ser diseñada entre la estación de vigilancia ESPE y la estación base del Volcán Cotopaxi bajo el estándar IEEE 802.11 se ha realizado la simulación empleando el software SIRENET 3.0, que es

una de las mejores herramientas de planificación y gestión radioeléctrica que permite el manejo de recursos espectrales de manera rápida y eficiente.

A continuación, se realiza una descripción de las características y parámetros necesarios para realizar la simulación de la red de transporte.

4.4.2 Definición de Puntos o Nodos de la Red

Para el desarrollo del presente capítulo se realizó una inspección física y se obtuvo las alturas y las coordenadas geográficas de los posibles lugares de instalación de los equipos, para ello, se empleó la tecnología GPS (*Global Positioning System*), *Meridian Platinum* cuya precisión es de ± 5 [m], con dicha herramienta podemos determinar si los lugares cumplen los requisitos necesarios para el diseño de la red inalámbrica de transporte.

Por consiguiente, debido a que una de las condiciones planteadas en el proyecto es de encontrar un enlace sin obstrucción en línea de vista, se determinaron trece diferentes alternativas de puntos como se puede observar en la Tabla. 4.5:

Tabla. 4.5 Alternativas de Puntos Estratégicos para el Enlace de Transporte

ENLACE	POSIBLE ALTERNATIVA
Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Bloque D)	Cotopaxi 1 – Bloque D Cotopaxi 2 – Bloque D
Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)	Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo Cotopaxi 2 – Edificio Administrativo
Enlace Refugio Cotopaxi – IASA	Cotopaxi 1 – IASA 1 Cotopaxi 1 – IASA 2 Cotopaxi 1 – IASA 3
Enlace IASA - Bloque D	IASA 1 – Bloque D IASA 2 – Bloque D IASA 3 – Bloque D
Enlace IASA – ESPE (Edificio Administrativo)	IASA 1 – Edificio Administrativo IASA 2 – Edificio Administrativo IASA 3 – Edificio Administrativo

- Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Bloque D)

Cotopaxi 1 – Bloque D

Cotopaxi 2 – Bloque D

Cuyas coordenadas se muestran en la Tabla. 4.6:

Tabla. 4.6. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Bloque D)

Ubicación	Latitud	Longitud	Altura [m]
COTOPAXI 1	0°39' 50" S	78°26' 19" O	4888
COTOPAXI 2	0°39' 49" S	78°26' 17" O	4870
ESPE – Bloque D	0°18' 46" S	78°26' 43" O	2505

- Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)

Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo

Cotopaxi 2 – Edificio Administrativo

Cuyas coordenadas se muestran en la Tabla. 4.7:

Tabla. 4.7. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)

Ubicación	Latitud	Longitud	Altura [m]
COTOPAXI 1	0°39' 50" S	78°26' 19" O	4888
COTOPAXI 2	0°39' 49" S	78°26' 17" O	4870
ESPE – Ed. Administrativo	0°18' 53" S	78°26' 38" O	2499

Adicionalmente, se tomo en cuenta la alternativa de la instalación de una repetidora en caso de que no exista línea de vista con los puntos anteriormente planteados. La repetidora estaría ubicada en el IASA y se consideraron nueve posibles alternativas que se describen a continuación:

- Enlace Refugio Cotopaxi – IASA

Cotopaxi 1 – IASA 1

Cotopaxi 1 – IASA 2

Cotopaxi 1 – IASA 3

Cuyas coordenadas se muestran en la Tabla. 4.8:

Tabla. 4.8. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – IASA

Ubicación	Latitud	Longitud	Altura [m]
COTOPAXI 1	0°39' 50" S	78°26' 19" O	4888
ESPE – IASA 1	0° 23' 35" S	78° 24' 52" O	2759

Ubicación	Latitud	Longitud	Altura [m]
ESPE – IASA 2	0° 23' 31" S	78° 24' 52" O	2763
ESPE – IASA 3	0° 24' 42" S	78° 24' 57" O	2842

- Enlace IASA - Bloque D

IASA 1 – Bloque D

IASA 2 – Bloque D

IASA 3 – Bloque D

Cuyas coordenadas se muestran en la Tabla. 4.9:

Tabla. 4.9. Coordenadas Enlace IASA - Bloque D

Ubicación	Latitud	Longitud	Altura [m]
ESPE – IASA 1	0° 23' 35" S	78° 24' 52" O	2759
ESPE – IASA 2	0° 23' 31" S	78° 24' 52" O	2763
ESPE – IASA 3	0° 24' 42" S	78° 24' 57" O	2842
ESPE – Bloque D	0° 18' 46" S	78° 26' 43" O	2505

- Enlace IASA – ESPE (Edificio Administrativo)

IASA 1 – Edificio Administrativo

IASA 2 – Edificio Administrativo

IASA 3 – Edificio Administrativo

Cuyas coordenadas se muestran en la Tabla. 4.10:

Tabla. 4.10. Coordenadas Sistema IASA – ESPE (Edificio Administrativo)

Ubicación	Latitud	Longitud	Altura
ESPE – IASA 1	0° 23' 35" S	78° 24' 52" O	2759
ESPE – IASA 2	0° 23' 31" S	78° 24' 52" O	2763
ESPE – IASA 3	0° 24' 42" S	78° 24' 57" O	2842
ESPE – Ed. Administrativo	0° 18' 53" S	78° 26' 38" O	2499

Los parámetros de coordenadas geográficas tanto del transmisor de la estación base (Cotopaxi) como las del receptor de la estación de vigilancia (ESPE), que fueron tomadas con la ayuda de un GPS, son relevantes para el proceso de simulación, ya que la información cartográfica es la capa base con la que funcionará el estudio.

Todos los criterios y conceptos desarrollados en la sección del enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Bloque D) serán utilizados para cada alternativa de enlace, por lo que en los demás enlaces sólo se procederá a presentar los resultados obtenidos del Software Sirenet 3.0 y de los cálculos respectivos para la determinación de la viabilidad del radioenlace.

4.4.3 Parámetros del Transmisor

Para que los resultados de la simulación se aproximen a la realidad, es necesario que los parámetros físicos, el sistema radiante y los parámetros específicos de emisión tanto del transmisor como del receptor sean correctamente establecidos.

Los parámetros del transmisor permiten hacer una configuración específica del sistema, los cuales pueden ser modificados de acuerdo a las necesidades de la red. La información que se requiere para el transmisor en cuestión se encuentra distribuida en cuatro pestañas de la siguiente forma:

Identificación

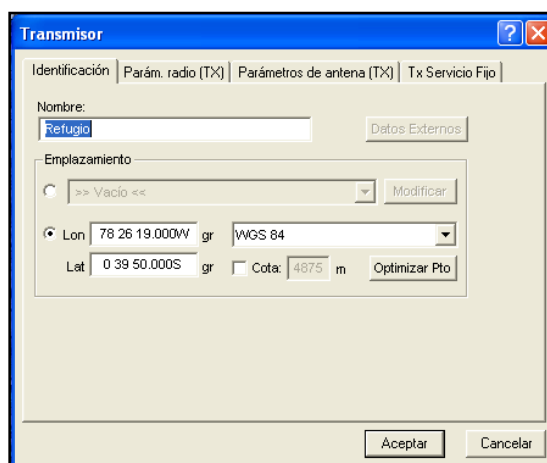


Figura. 4.10. Parámetros de Identificación del Transmisor SIRENET

En la ventana general del transmisor que se muestra en la Figura. 4.10, se establece el nombre identificativo del transmisor, sus coordenadas y el sistema de referencia.

Parámetros Radio

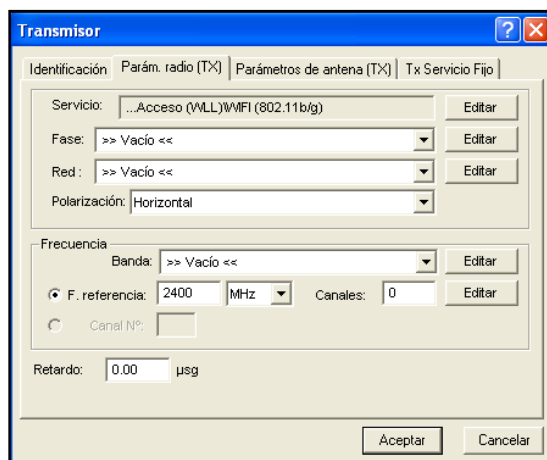


Figura. 4.11. Parámetros del Radio Transmisor SIRENET

Como se observa en la Figura. 4.11, se definen los parámetros del equipo radio base, el tipo de servicio radioeléctrico en el transmisor y se selecciona el valor de frecuencia de referencia correspondiente a la banda libre que se va a emplear, en este caso 2.4 [GHz]. La Tabla. 4.11 muestra los parámetros del radio del transmisor establecidos para el diseño de simulación.

Tabla. 4.11. Parámetros Radio

PARÁMETRO	VALOR
Servicio	Wi-Fi (802.11b/g)
Frecuencia de referencia	2400 [MHz]

Parámetros de Antena

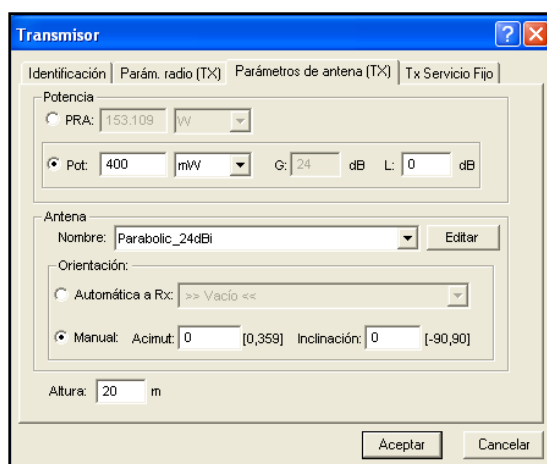


Figura. 4.12. Parámetros de la Antena SIRENET

Se completan los campos más representativos del tipo de antena seleccionada como se puede observar en la Figura. 4.12.

La Tabla. 4.12 muestra los parámetros de la antena transmisora establecidos para el diseño de simulación.

Tabla. 4.12. Parámetros de la Antena Transmisora

PARÁMETRO	VALOR
Potencia	1 [W]
Pérdidas	0 [dB]
Ganancia	24 [dBi]
Tipo de antena	Parabólica
Altura de la antena	5 [m]

Tx Servicio Fijo

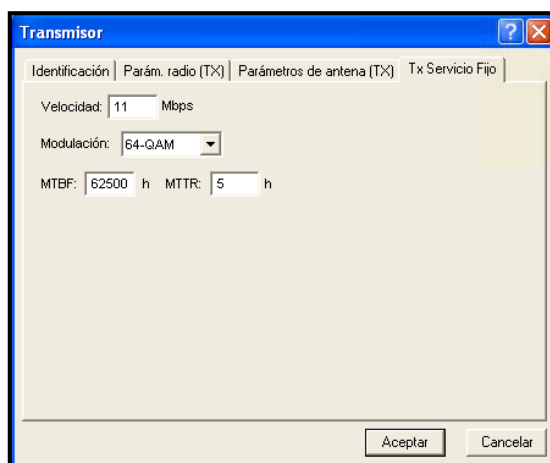


Figura. 4.13. Parámetros de Servicio Fijo

Como se observa en la Figura. 4.13, el servicio radioeléctrico seleccionado es Wi-Fi bajo el estándar IEEE 802.11b/g, por lo que es necesario definir en estos campos los parámetros del equipo radio base seleccionado que forma parte del transmisor. Estos valores son utilizados para cálculos de la red de transporte.

La Tabla. 4.13 muestra los parámetros del transmisor servicio fijo establecidos para el diseño de simulación.

Tabla. 4.13. Parámetros del Transmisor Servicio Fijo

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad de Tx	11 [Mbps]
Modulación	64 QAM
MTBF (Medium Time Before Failure)	62500h
MTTR (Medium Time to Repare)	5 h

4.4.4 Parámetros del Receptor

Una vez establecidos los parámetros del transmisor se procede a modificar las características del receptor, las cuales comprenden el sistema de captación, el equipo receptor físico y los parámetros en base a los cuales se comporta.

Con el fin de facilitar su configuración, el programa adapta los valores por defecto de los parámetros de los receptores empleados en ese tipo de servicio en base a los parámetros establecidos en el transmisor.

La información que se requiere para el receptor en cuestión, al igual que el transmisor, se encuentra distribuida en cuatro pestañas de la siguiente forma:

Identificación

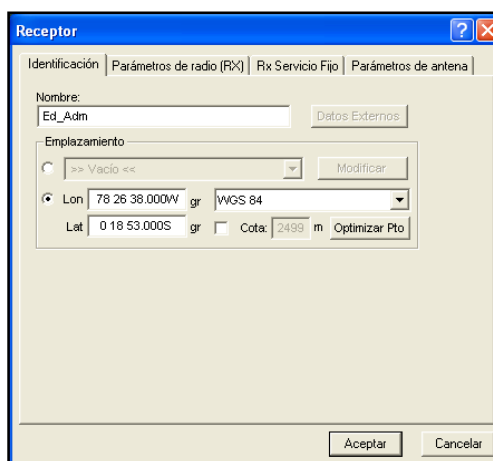


Figura. 4.14. Parámetros de Identificación del Receptor SIRENET

Se establece el nombre identificativo del receptor, sus coordenadas y el sistema de referencia como se indica en la Figura. 4.14.

Parámetros Radio

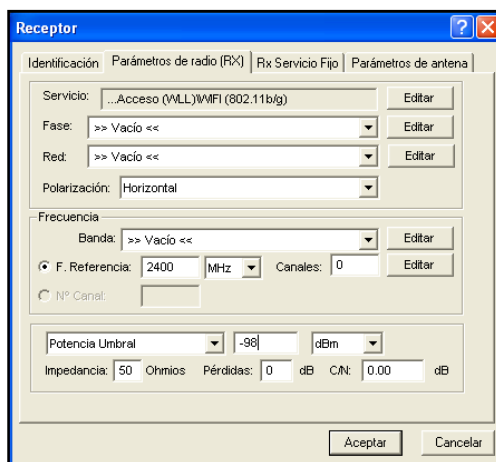


Figura. 4.15. Parámetros del Radio del Receptor SIRENET

Como se observa en la Figura. 4.15, es necesario definir un tipo de servicio en el receptor, la frecuencia de operación y la potencia umbral, entre otros. La Tabla. 4.14 muestra los parámetros del receptor establecidos para el diseño de simulación.

Tabla. 4.14. Parámetros del Receptor

PARÁMETRO	VALOR
Tipo de Servicio	Wi-Fi (802.11b/g)
Frecuencia de referencia	2.4 GHz
Potencia umbral	-98 [dBm]
Impedancia	50 [Ω]

Parámetros de Antena

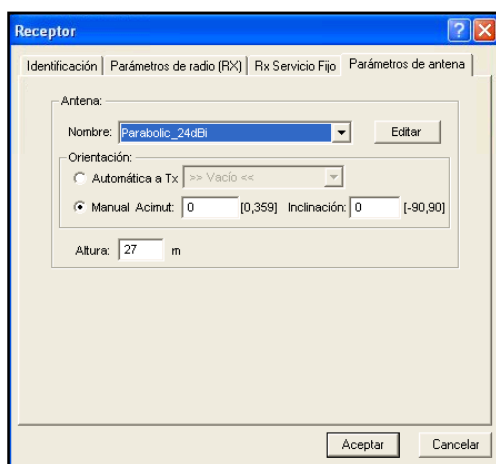


Figura. 4.16. Parámetros de la Antena SIRENET

Como se indica en la Figura. 4.16, se selecciona el tipo de antena cuyos parámetros se muestran en la Tabla. 4.15:

Tabla. 4.15. Parámetros de la Antena Receptora

PARÁMETRO	VALOR
Ganancia	24 [dBi]
Tipo de antena	Parabólica
Altura de la antena	27 [m]

Rx Servicio Fijo

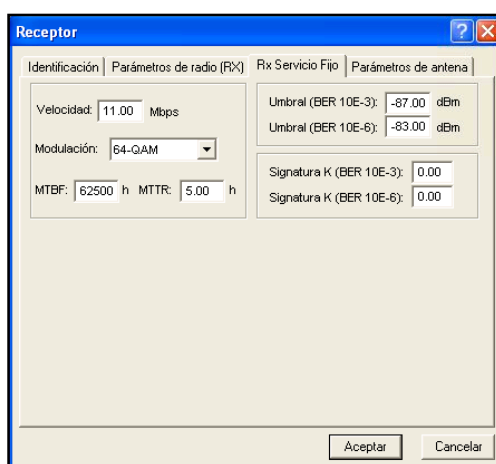


Figura. 4.17. Parámetros de Servicio Fijo

Esta categoría presenta parámetros muy similares al del transmisor, lo que permite establecer una relación lógica entre el transmisor y el receptor. Adicionalmente, se ingresan los valores del umbral en [dBm] para un BER (Tasa de Error de Bit) 10E-3 y 10E-6 para garantizar la calidad de la señal, como se observa en la Figura. 4.17.

La Tabla. 4.16 muestra los parámetros del receptor servicio fijo establecidos para el diseño de simulación.

Tabla. 4.16. Parámetros del Receptor Servicio Fijo

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad de Rx	11 [Mbps]
Modulación	64 QAM
Umbral (BER 10E-3)	-87 [dBm]
Umbral (BER 10E-6)	-83 [dBm]
MTBF (<i>Medium Time Before Failure</i>)	62500h
MTTR (<i>Medium Time to Repare</i>)	5 h

4.4.5 Características de los Equipos

Antes de proceder a realizar los cálculos y ver los resultados de las simulaciones, es necesario revisar las características y especificaciones técnicas de los equipos a utilizarse:

Equipo de Transmisión y Recepción

En este proyecto se pretende construir un router inalámbrico que pueda dar acceso por Wi-Fi en exteriores a larga distancia, ya que es la solución menos costosa. El alcance del enlace está dado principalmente por el sistema de antena utilizado y por las características propias del equipo que se muestran en la Tabla. 4.17.

Tabla. 4.17. Especificaciones Técnicas del Equipo de Transmisión y Recepción

Wi-Fi con MAC Modificada	
Banda de Frecuencia	2.4 [GHz]
Potencia de Transmisión	400 [mW]
Sensibilidad del Receptor	-98 [dBm]
Modulación	64 QAM

Antena [62]

La antena rejilla Wi-Fi ofrece una ganancia de 24 [dBi] y se la utiliza para aplicaciones *outdoor* punto a punto y punto a multipunto a larga distancia, trabaja en la banda ISM de 2.4 [GHz] y con los estándares IEEE 802.11b, 802.11g y 802.11n. Se la puede instalar, ya sea en polarización vertical u horizontal.

La Tabla. 4.18 presenta las especificaciones técnicas de la antena seleccionada.

Tabla. 4.18. Especificaciones Técnicas de la Antena

Antena Parabólica 2.4 GHz	
Rango de frecuencia	2.4 [GHz]
Impedancia de entrada	50 [ohms]
Ganancia de la Antena	24 [dBi]

Cable Coaxial

Debido a que los cables coaxiales más gruesos (RG-8) tienen menos pérdida de señal en comparación con los más delgados y su impedancia es de 50 $[\Omega]$, se utilizará un cable coaxial RG-8. Las pérdidas que presenta a una frecuencia de 2.4 [GHz] se indican en la Figura. 4.18:

Coaxial Cable Attenuation & Power Handling Calculator				
Product	Frequency (MHz)	Attenuation (db/100 feet)	Attenuation (db/100 mtrs)	Average Power (kW)
RG-8	2400	12.381	40.622	0.16
<input type="button" value="Calculate"/>		Run Length (feet)	Total Run Attenuation(dB)	Efficiency (%)
		0	0.0	0.0

Copyright ©2002 Times Microwave Systems All rights reserved.

Figura. 4.18. Cable Coaxial [63]

Se procede a calcular el valor de atenuación del cable coaxial RG-8.

$$\text{Atenuación (RG - 8)} = \frac{40.622[dB]}{100[m]}$$

$$\text{Atenuación (RG - 8)} = 0.40622 \left[\frac{dB}{m} \right]$$

Por lo tanto, la atenuación de cable coaxial a usar es $0.40622 \left[\frac{dB}{m} \right]$ con una impedancia de 50 [ohms], como se muestra en la Tabla. 4.19.

Tabla. 4.19. Especificaciones Técnicas del Cable Coaxial

Cable Coaxial	
Atenuación	0.40622 $\left[\frac{dB}{m} \right]$
Impedancia	50 [ohms]

4.4.6 Simulación y Cálculos

Una vez determinadas las posibles posiciones geográficas de las estaciones se procede a la generación del perfil geográfico utilizando el software Sirenet 3.0, dicho estudio presenta detalles topográficos de curvas de nivel y alturas entre las estaciones, y tiene como objetivo definir si existe LOS (*Line Of Sight*) entre el transmisor y el receptor, lo que implica, un despejamiento del 60% de manera que se garantice la conectividad entre los dos sitios.

Además, se realizará el cálculo del radioenlace entre las estación base y la estación receptora, dicho proceso comprende el estudio de la trayectoria del mismo y los efectos a los que se encuentra expuesto.

El proceso de cálculo y simulación se repetirá para las trece alternativas posibles de enlace.

- **ENLACE REFUGIO COTOPAXI – ESPE (BLOQUE D)**

A partir de un plano con detalles topográficos se marcaron los puntos extremos del radioenlace, en este caso corresponden al Refugio Cotopaxi y a la ESPE (Bloque D) que se encuentran ubicados en la provincia del Cotopaxi y la provincia de Pichincha respectivamente.

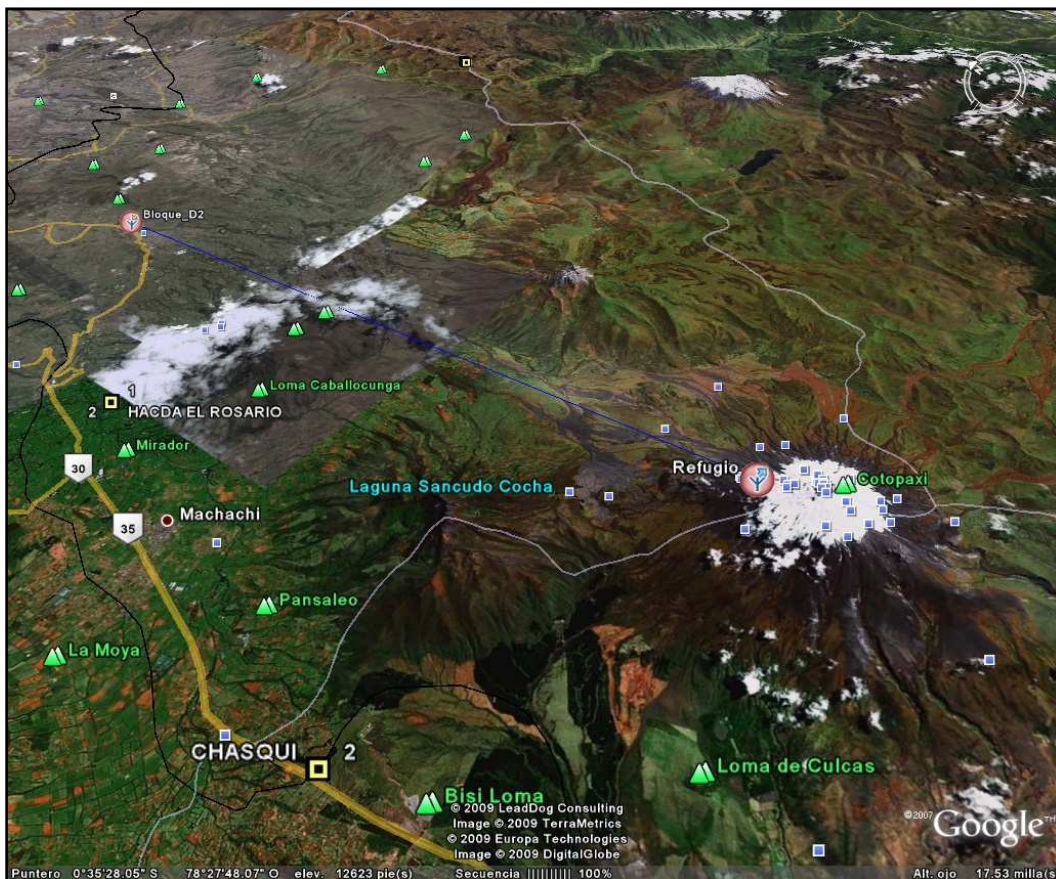


Figura. 4.19. Enlace Cotopaxi – ESPE (Bloque D)

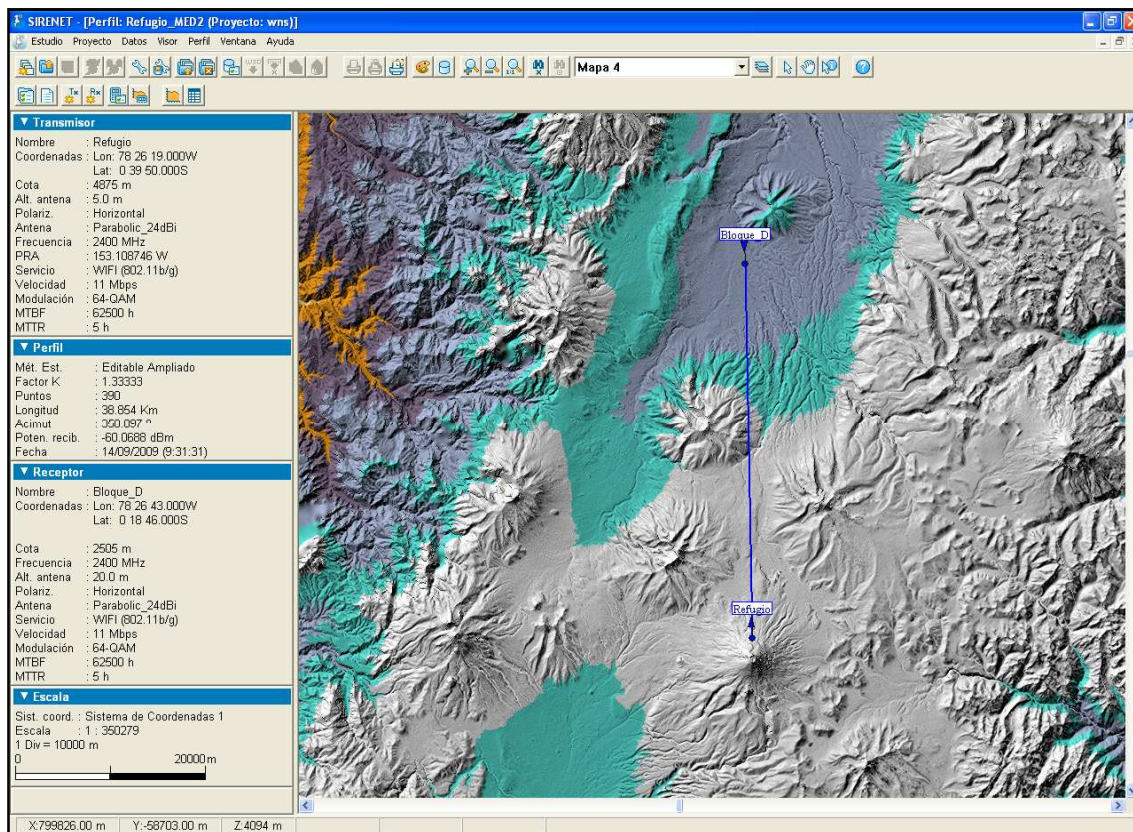


Figura. 4.20. Enlace Cotopaxi – ESPE (Bloque D) en el Software SIRENET

Las Figuras. 4.19 y 4.20 muestran el enlace Refugio Cotopaxi y ESPE (Bloque D). La primera corresponde a una presentación de 3D de *Google Earth*, ya que gracias al software Sirenet, los objetos y elementos radioeléctricos del estudio se pueden exportar al conocido sistema de información geográfica *Google Earth*, permitiendo explorar de una manera sencilla los datos espaciales georeferenciados. Mientras que la Figura. 4.20 es una captura del enlace mencionado en cartografía digital de la herramienta Sirenet.

A continuación, se muestran los resultados basados en el Software Sirenet utilizando dos puntos de coordenadas diferentes para la estación base ubicada en el Volcán Cotopaxi:

- **Cotopaxi 1 – Bloque D**

La Figura. 4.21 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

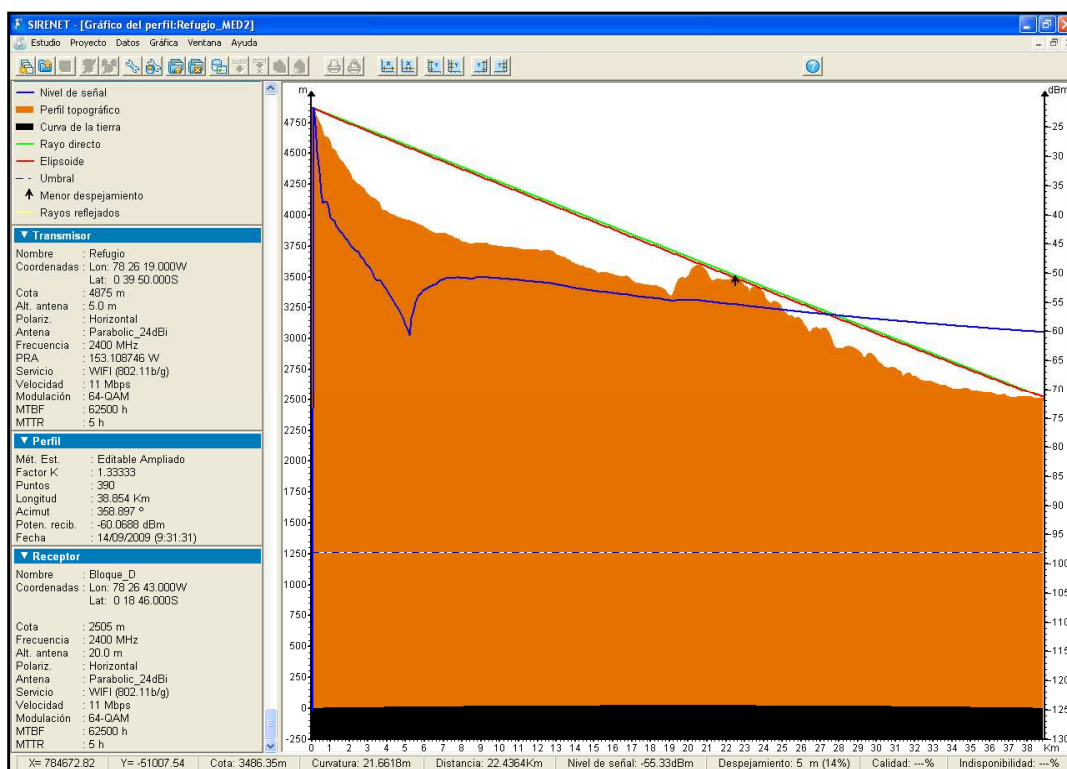


Figura. 4.21. Perfil Cotopaxi 1 – Bloque D

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de 5 m (14%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 22.4364 [km] de la estación transmisora. Por lo tanto, la determinación de la altura de las torres de las antena va a tomar un papel fundamental para garantizar LOS entre las estaciones base y un 60% de libertad en la primera zona de Fresnel, caso contrario, si esta zona es obstruida por algún tipo de obstáculo la señal es atenuada.

- **Cotopaxi 2 – Bloque D**

La Figura. 4.22 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

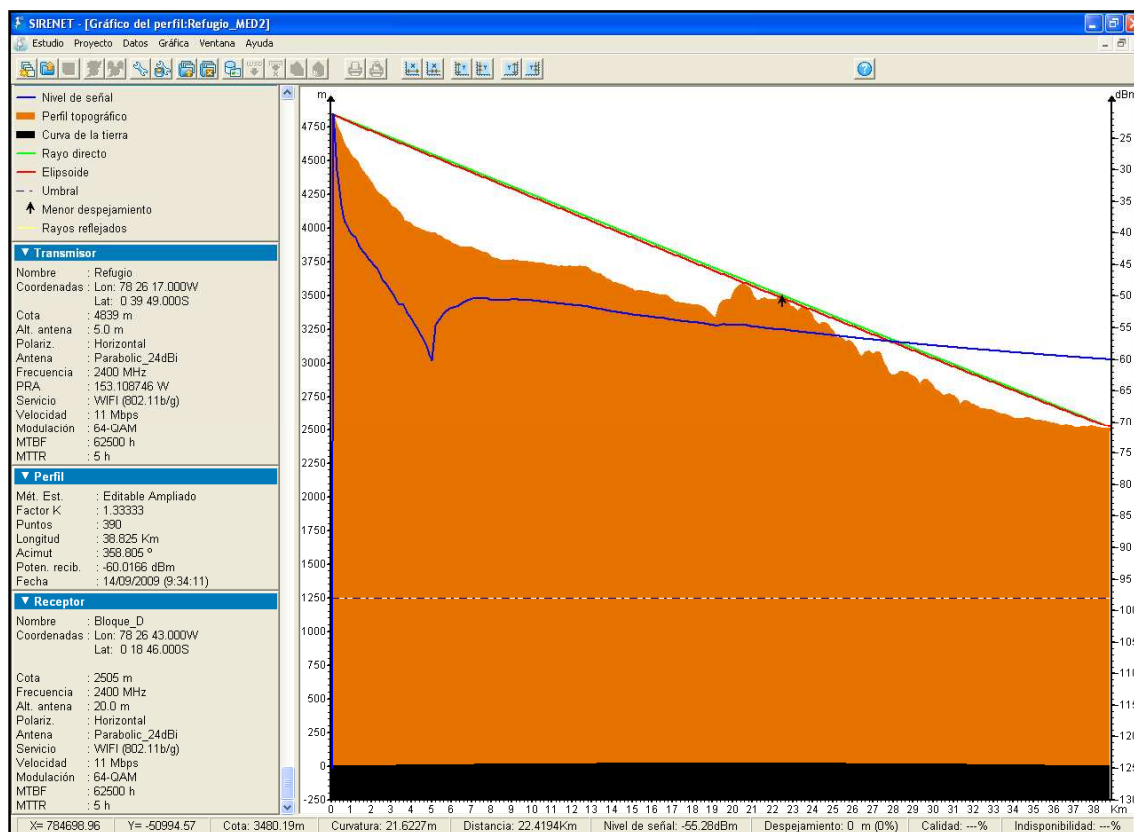


Figura. 4.22. Perfil Cotopaxi 2 – Bloque D

Como se muestra en la figura anterior, el análisis del perfil del terreno presenta un despejamiento de 0 m (0%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 22.4194 [km] de la estación transmisora. Por lo tanto, dichas posiciones geográficas de las estaciones quedan descartadas, ya que el obstáculo que se encuentra entre ellas no permite garantizar el 60% de libertad en la primera zona de Fresnel y se requeriría un valor excesivo para la altura de las torres de las antenas.

Análisis del Vano

El análisis del vano permite determinar la visibilidad de los extremos del enlace radioeléctrico de servicio fijo y la viabilidad del mismo en función de la posible obstrucción de la zona de Fresnel, las pérdidas del espacio libre y la potencia recibida entre el transmisor y el receptor. En este estudio, el método de cálculo empleado para estimar las pérdidas de propagación es el propuesto por la Recomendación UIT R. P-530. La ventana de análisis del vano que se indican en la Figura. 4.23, contiene los parámetros específicos del estudio.

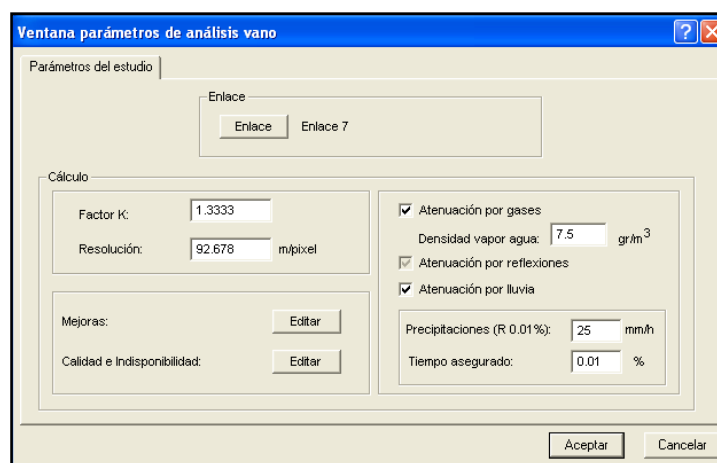


Figura. 4.23. Parámetros de Análisis del Vano

Tras realizar los cálculos, el programa pasa a una nueva pantalla similar a la del perfil como se muestra en la Figura. 4.24, donde se indica que el enlace presenta una potencia recibida de -56.002 [dBm] y una atenuación de 132.085 [dB].

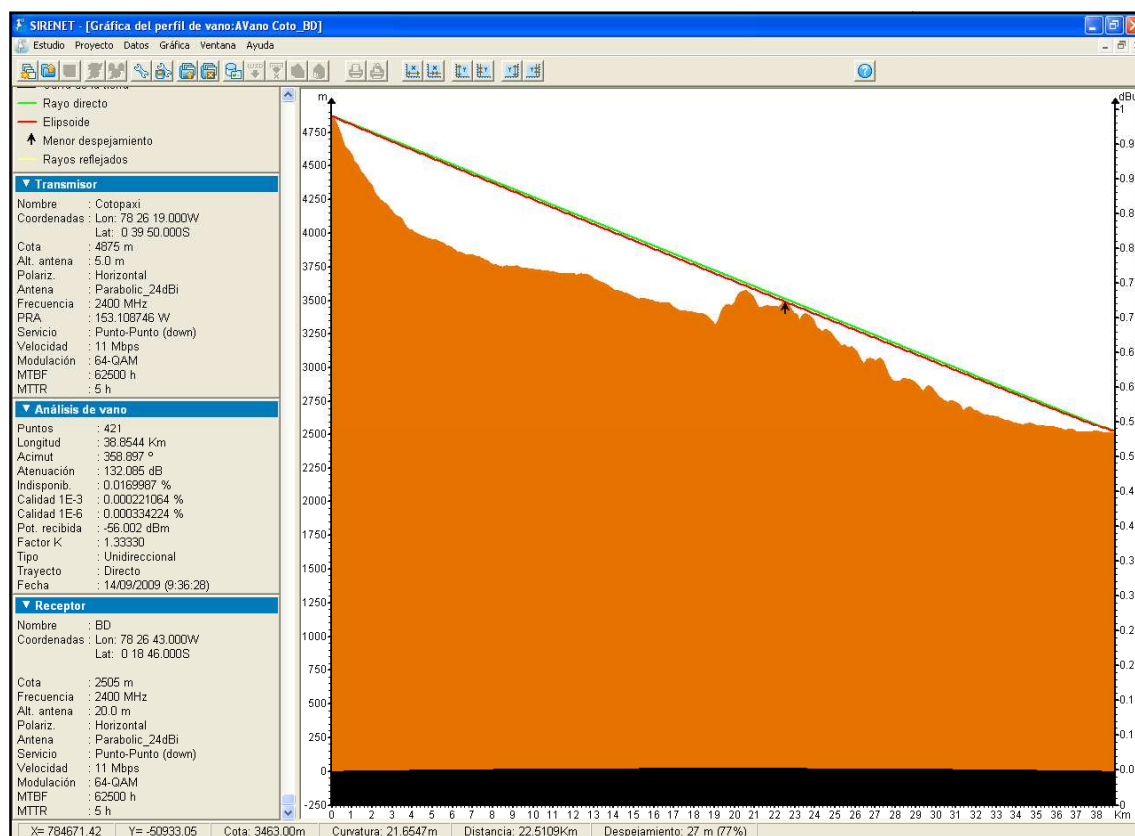


Figura. 4.24. Análisis del Vano Cotopaxi – Bloque D

Los resultados del estudio incluyen un desglose de los distintos tipos de pérdidas (espacio libre, difracción, reflexiones, atenuación por lluvia, absorción por gases) y hace una estimación de las estadísticas de recepción en términos de calidad del enlace e indisponibilidad. Las Figuras. 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 y 4.29 muestran los resultados obtenidos de la herramienta Sirenet:

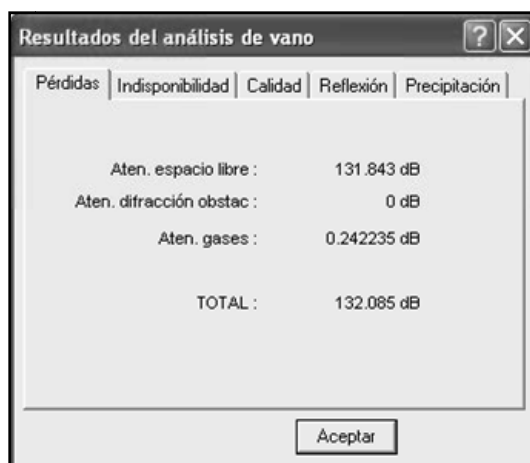


Figura. 4.25. Pérdidas del Enlace

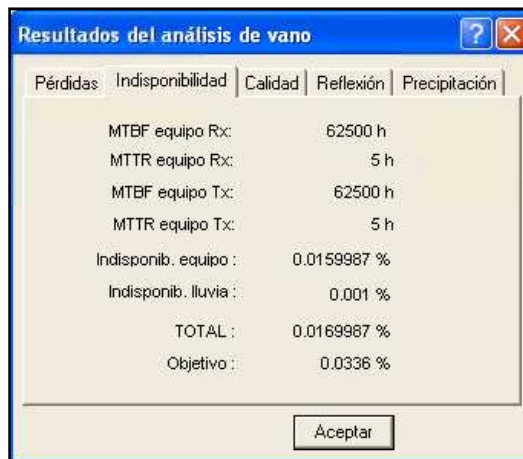


Figura. 4.26. Indisponibilidad del Enlace

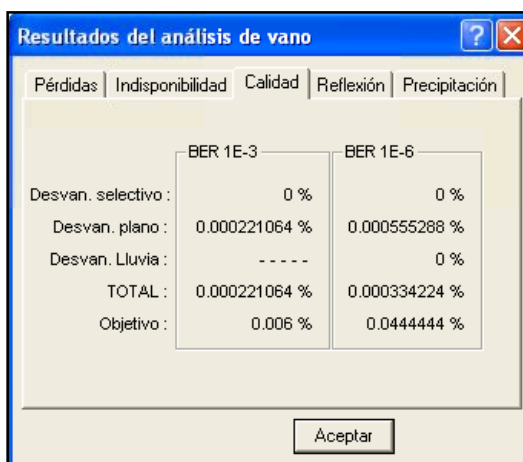


Figura. 4.27. Calidad del Enlace

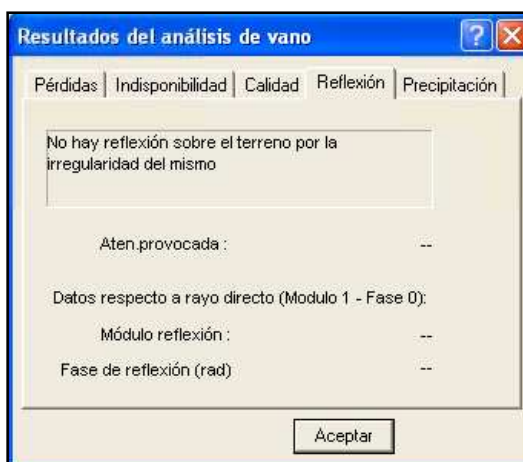


Figura. 4.28. Reflexión del Enlace



Figura. 4.29. Precipitación del Enlace

- **Altura de las Antenas**

El estudio de Análisis de Vano en Sirenet permite el cálculo automático de la altura del mástil del transmisor y/o del receptor. Para este caso se ha variado sólo altura del receptor y se ha establecido el 60% y el 100% de libertad de la Zona de Fresnel.

Las Figuras. 4.30 y 4.31 muestran los resultados:

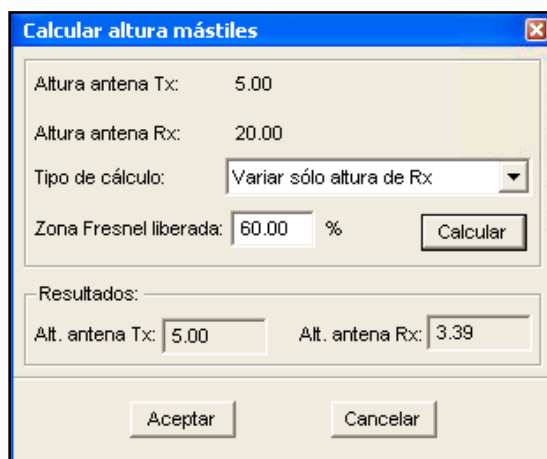


Figura. 4.30. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel

Calcular altura mástiles

Altura antena Tx: 5.00

Altura antena Rx: 20.00

Tipo de cálculo: Variar sólo altura de Rx

Zona Fresnel liberada: 100.00 %

Calcular

Resultados:

Alt. antena Tx: 5.00 Alt. antena Rx: 27.21

Aceptar Cancelar

Figura. 4.31. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel

Ejemplo de Cálculos

Para la realización de las pruebas se utilizarán las coordenadas de Cotopaxi 1 y Bloque D. Las cuales se muestran en la Tabla. 4.20:

Tabla. 4.20. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Bloque D)

Ubicación	Latitud	Longitud
Tx COTOPAXI1	0°39' 50" S	78°26' 19" O
Rx ESPE – Bloque D	0°18' 46" S	78°26' 43" O

- **Perfil**

Gracias a las herramientas del software Sirenet 3.0 se pudo obtener las alturas del perfil del trayecto corregidas para un valor de $\frac{4}{3}$ como lo indica la siguiente tabla:

Tabla. 4.21. Perfil Cotopaxi 1 – Bloque D

D [km]	Alt [m]
0	4869
0.1	4834
0.2	4804
0.3	4766
0.4	4727
0.5	4679
0.6	4632
0.7	4629
0.8	4618

0.9	4591
1	4541
1.1	4524
1.2	4510
1.3	4481
1.4	4457
1.5	4443
1.6	4419
1.7	4397
1.8	4374

1.9	4361
2	4322
2.1	4289
2.2	4274
2.3	4254
2.4	4239
2.5	4230
2.6	4219
2.7	4203
2.8	4182

2.9	4169
3	4146
3.1	4132
3.2	4125
3.3	4119
3.4	4110
3.5	4091
3.6	4052
3.7	4029
3.8	4022

3.9	4017
4	4009
4.1	4000
4.2	3992
4.3	3987
4.4	3977
4.5	3970
4.6	3961
4.7	3956
4.8	3950

4.9	3945
5	3942
5.1	3939
5.2	3938
5.3	3930
5.4	3922
5.5	3917
5.6	3909
5.7	3900
5.8	3894
5.9	3888
6	3878
6.1	3868
6.2	3859
6.3	3851
6.4	3845
6.5	3837
6.6	3832
6.7	3830
6.8	3830
6.9	3830
7	3829
7.1	3826
7.2	3819
7.3	3813
7.4	3807
7.5	3799
7.6	3791
7.7	3790
7.8	3783
7.9	3767
8	3762
8.1	3756
8.2	3752
8.3	3747
8.4	3742
8.5	3737
8.6	3745
8.7	3747
8.8	3744
8.9	3745
9	3746
9.1	3752
9.2	3746
9.3	3743

9.4	3735
9.5	3729
9.6	3728
9.7	3727
9.8	3726
9.9	3720
10	3722
10.1	3718
10.2	3715
10.3	3715
10.4	3714
10.5	3710
10.6	3708
10.7	3709
10.8	3705
10.9	3702
11	3700
11.1	3696
11.2	3694
11.3	3689
11.4	3689
11.5	3691
11.6	3689
11.7	3688
11.8	3689
11.9	3689
12	3688
12.1	3682
12.2	3679
12.3	3686
12.4	3687
12.5	3685
12.6	3682
12.7	3683
12.8	3678
12.9	3665
13	3652
13.1	3644
13.2	3637
13.3	3632
13.4	3629
13.5	3619
13.6	3610
13.7	3602
13.8	3591

13.9	3583
14	3573
14.1	3567
14.2	3564
14.3	3559
14.4	3553
14.5	3549
14.6	3543
14.7	3538
14.8	3533
14.9	3527
15	3521
15.1	3510
15.2	3499
15.3	3505
15.4	3507
15.5	3503
15.6	3502
15.7	3500
15.8	3497
15.9	3492
16	3489
16.1	3481
16.2	3478
16.3	3474
16.4	3469
16.5	3470
16.6	3474
16.7	3474
16.8	3470
16.9	3453
17	3439
17.1	3428
17.2	3417
17.3	3415
17.4	3414
17.5	3412
17.6	3411
17.7	3405
17.8	3406
17.9	3403
18	3399
18.1	3395
18.2	3394
18.3	3397

18.4	3392
18.5	3386
18.6	3378
18.7	3372
18.8	3348
18.9	3324
19	3315
19.1	3312
19.2	3326
19.3	3367
19.4	3411
19.5	3442
19.6	3460
19.7	3464
19.8	3455
19.9	3455
20	3466
20.1	3495
20.2	3527
20.3	3545
20.4	3557
20.5	3566
20.6	3565
20.7	3548
20.8	3538
20.9	3524
21	3488
21.1	3460
21.2	3442
21.3	3438
21.4	3441
21.5	3452
21.6	3454
21.7	3450
21.8	3443
21.9	3443
22	3443
22.1	3444
22.2	3443
22.3	3450
22.4	3478
22.5	3486
22.6	3472
22.7	3448
22.8	3422

22.9	3404
23	3393
23.1	3388
23.2	3348
23.3	3347
23.4	3382
23.5	3392
23.6	3387
23.7	3380
23.8	3368
23.9	3348
24	3311
24.1	3285
24.2	3278
24.3	3262
24.4	3254
24.5	3272
24.6	3274
24.7	3264
24.8	3250
24.9	3228
25	3207
25.1	3187
25.2	3163
25.3	3154
25.4	3163
25.5	3155
25.6	3137
25.7	3137
25.8	3147
25.9	3135
26	3115
26.1	3090
26.2	3060
26.3	3038
26.4	3017
26.5	3024
26.6	3048
26.7	3064
26.8	3063
26.9	3053
27	3041
27.1	3048
27.2	3063
27.3	3056

27.4	3024
27.5	2988
27.6	2953
27.7	2916
27.8	2899
27.9	2888
28	2889
28.1	2888
28.2	2892
28.3	2895
28.4	2910
28.5	2912
28.6	2906
28.7	2904
28.8	2896
28.9	2888
29	2879
29.1	2864
29.2	2842
29.3	2818
29.4	2818
29.5	2842
29.6	2858
29.7	2852
29.8	2839

29.9	2822
30	2800
30.1	2780
30.2	2773
30.3	2761
30.4	2747
30.5	2741
30.6	2734
30.7	2741
30.8	2747
30.9	2740
31	2735
31.1	2726
31.2	2714
31.3	2677
31.4	2666
31.5	2683
31.6	2698
31.7	2700
31.8	2685
31.9	2673
32	2674
32.1	2663
32.2	2658
32.3	2647

32.4	2640
32.5	2633
32.6	2637
32.7	2633
32.8	2634
32.9	2630
33	2627
33.1	2620
33.2	2613
33.3	2606
33.4	2603
33.5	2599
33.6	2604
33.7	2595
33.8	2589
33.9	2582
34	2577
34.1	2571
34.2	2570
34.3	2568
34.4	2569
34.5	2576
34.6	2579
34.7	2577
34.8	2580

34.9	2566
35	2561
35.1	2560
35.2	2558
35.3	2556
35.4	2555
35.5	2553
35.6	2550
35.7	2548
35.8	2545
35.9	2541
36	2540
36.1	2537
36.2	2533
36.3	2528
36.4	2522
36.5	2523
36.6	2526
36.7	2529
36.8	2526
36.9	2516
37	2507
37.1	2504
37.2	2503
37.3	2504

37.4	2509
37.5	2507
37.6	2508
37.7	2507
37.8	2511
37.9	2515
38	2513
38.1	2511
38.2	2507
38.3	2503
38.4	2501
38.5	2496
38.6	2496
38.7	2498
38.8	2501
38.854	2503

A continuación, se muestran los resultados del perfil del terreno:

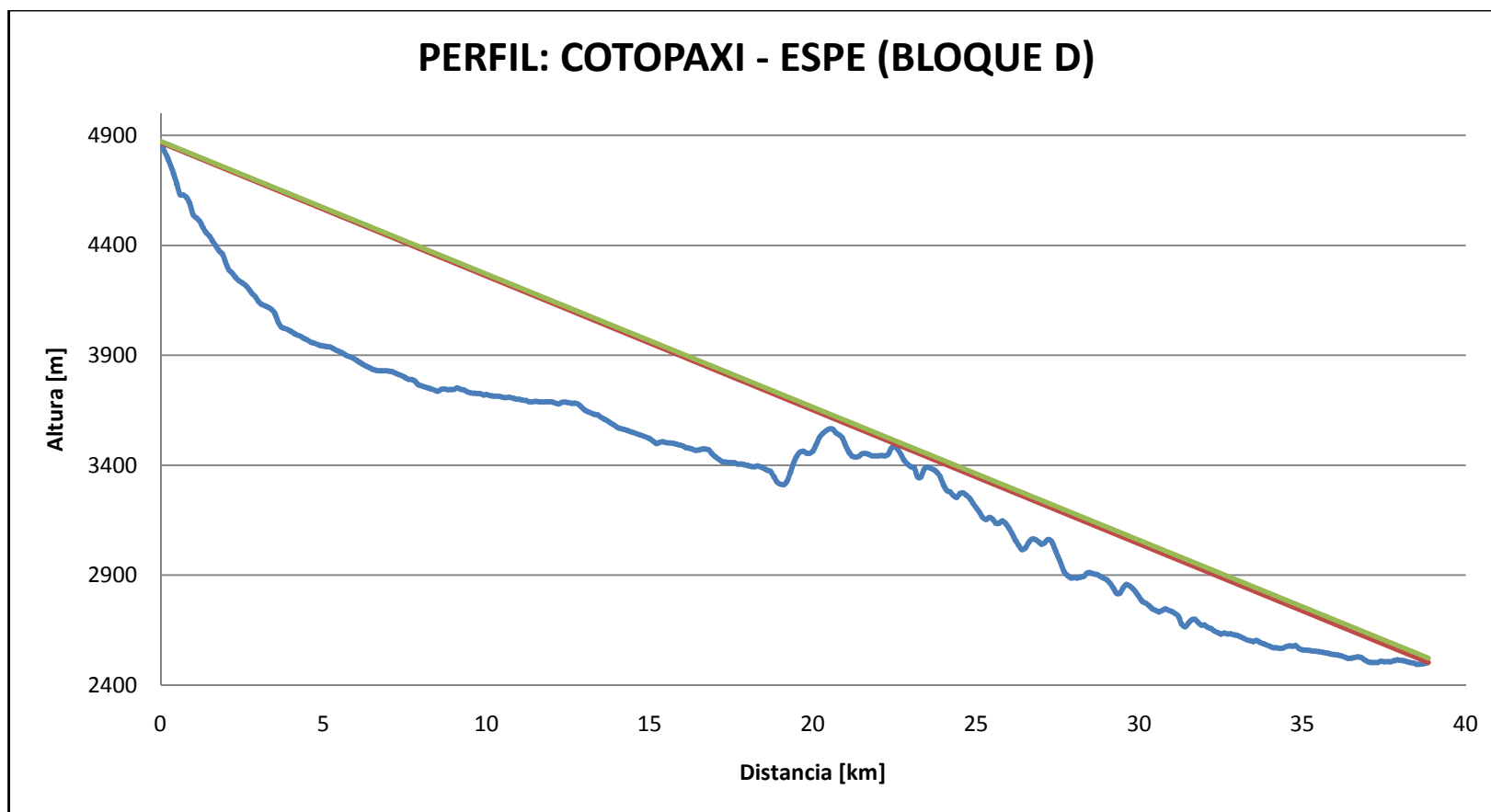


Figura. 4.32. Perfil de enlace Cotopaxi – ESPE (Bloque D)

En la figura anterior la línea de color roja muestra el trayecto directo entre el transmisor y el receptor. Mientras que la línea de color verde incluye la altura de las torres de las antenas, por lo que se puede observar que existe un obstáculo que intercepta con el rayo directo.

- **Desarrollo de cálculos:**

A continuación, se describe el procedimiento realizado para el cálculo del desempeño del radio enlace, basado en el Modelo de Mojoli:

Se presentan tabulados los datos de las características de los equipos a usarse y del perfil de terreno. En la Tabla. 4.23 se indica la posición, distancia y altura de las estaciones y del obstáculo, estos datos fueron obtenidos de la herramienta Sirenet.

Tabla. 4.22. Características del Enlace

DATOS	
Potencia de Transmisión	400 [mW]
Frecuencia de Operación	2.4 [GHz]
Umbral de Recepción	-97 [dBm]
Ganancia de la Antena ($G_{Tx} = G_{Rx}$)	24 [dBi]
Altura de la Torre de la Antenas de Tx	5 [m]
Altura de la Torre de la Antenas de Rx	20 [m]
Pérdidas por Línea de Transmisión	$0.40622 \left[\frac{dB}{m} \right]$
Modulación	64QAM
BER	10^{-03}

Tabla. 4.23. Características del Perfil

	DISTANCIA [km]	ALTURA [m]
Transmisor	0	4869
Obstáculo	22.5	3486
Receptor	38.637	2503

- **Análisis del Perfil:**

Una vez conocidos los valores de distancia y altura de las estaciones base y determinado el obstáculo que puede interferir en la trayectoria se procede a:

Calcular:

El margen sobre obstáculo aplicando la ecuación (3.13):

$$c = h_1 + \frac{d_1 \cdot (h_2 - h_1)}{d} - h_{obs}$$

$$c = 2503 + 20 + \frac{(38.854 - 22.5) \cdot (4869 + 5 - 2503 - 20)}{38.854} - 3486$$

$$c = 26.557 [m]$$

El valor de c es correcto, ya que es positivo. En caso de que dicho parámetro sea negativo se debe aumentar las alturas de las torres de las antenas.

Calcular:

El radio de la primera zona de Fresnel utilizado la ecuación (3.12):

$$F_1 = 548 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}}$$

$$F_1 = 548 \cdot \sqrt{\frac{(38.854 - 22.5) \cdot 22.5}{2400 \cdot 38.854}}$$

$$F_1 = 34.424$$

Calcular:

El porcentaje de liberación de la primera zona de Fresnel se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{c}{F_{1\%}} = \frac{26.557}{34.424} \cdot 100\%$$

$$\frac{c}{F_{1\%}} = 77.15\%$$

Por lo tanto, el enlace cumple con la libertad del 60% de la Primera Zona de Fresnel.

Comprobación:

$$60\% \cdot F_1 = 34.424 \cdot 0.6$$

$$60\% \cdot F_1 = 20.654$$

$$c = 26.557$$

$$c > 20.654$$

$$\therefore c > 60\% \cdot F_1$$

Con el cumplimiento de dicha condición se determina que la altura de las torres es correcta.

Calcular:

La constante de disposición geométrica del obstáculo en el trayecto en el modelo de filo de cuchillo aplicando la ecuación (3.20):

$$v = \frac{c}{F_1}$$

$$v = -\frac{26.557}{34.424}$$

$$v = -771.474 \cdot 10^{-3}$$

Como $v < -1$, la atenuación debida a un obstáculo filo de cuchillo (función Bessel) se obtiene aplicando la ecuación (3.19):

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) [dB]$$

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(-771.474 \cdot 10^{-3} - 0.1)^2 + 1} - 771.474 \cdot 10^{-3} - 0.1 \right)$$

$$J(v) = 59.750 \cdot 10^{-3} [dB]$$

Por lo tanto, la atenuación por difracción es de:

$$A_d = 59.750 \cdot 10^{-3} [dB]$$

Calcular:

Las pérdidas debido al espacio libre utilizando la ecuación (3.15):

$$A_{Le} = 32.5 + 20\log(f[\text{MHz}]) + 20\log(d[\text{km}])$$

$$A_{Le} = 32.5 + 20\log(2400) + 20\log(38.854)$$

$$A_{Le} = 131.893 [\text{dB}]$$

Calcular:

Las pérdidas de las líneas de transmisión se definen con la ecuación (3.23):

$$L_{Tx} = L_{LT_x} \cdot h_{antena}$$

$$L_{Tx} = (0.40622 \cdot 2) + (0.40622 \cdot 2)$$

$$L_{Tx} = 1.625 [\text{dB}]$$

Calcular:

El margen de desvanecimiento con la ecuación (3.28):

$$M = P_{R_x} - \text{Umbral}$$

Donde la P_{R_x} se define como (3.22):

$$P_{R_x} [\text{dB}] = P_{T_x} [\text{dB}] + G_{T_x} [\text{dB}_i] + G_{R_x} [\text{dB}_i] - A_d - A_{Le} - L_{T_x}$$

$$P_{R_x} [\text{dB}] = 10\log\left(\frac{400 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) + 24 + 24 - 59.750 \cdot 10^{-3} - 131.893 - 1.625$$

$$P_{R_x} [\text{dB}] = -59.557 [\text{dB}]$$

Por lo tanto,

$$M = P_{R_x} - \text{Umbral}$$

$$M = -59.557 - (-97)$$

$$M = 37.443[dB]$$

- **Cálculo del Desvanecimiento Plano:**

Se aplica la ecuación (3.36):

$$P_{dp} = P_o \cdot 10^{-M/10}$$

Donde:

$$P_o = k \cdot Q \cdot f \cdot d^3$$

$$P_o = (2.1 \cdot 10^{-5}) \cdot Q \cdot 2.4 \cdot (38.854)^3$$

$$P_o = 2.1 \cdot 10^{-5} \cdot S^{-1.3} \cdot 2.4 \cdot (38.854)^3$$

Calcular:

El coeficiente de rugosidad utilizando la ecuación (3.41):

$$S = \sqrt{\frac{\sum(h_i - \bar{h})^2}{n}}$$

Donde:

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i}{n}$$

$$\bar{h} = \frac{1305851}{388}$$

$$\bar{h} = 3365.595$$

Por lo tanto,

$$S = \sqrt{\frac{\sum(h_i - \bar{h})^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{120627127}{388}}$$

$$S = 557.579$$

Entonces, el factor que depende de la distribución de probabilidad es:

$$P_o = 2.1 \cdot 10^{-5} \cdot S^{-1.3} \cdot 2.4 \cdot (38.854)^3$$

$$P_o = 2.1 \cdot 10^{-5} \cdot 557.5793^{-1.3} \cdot 2.4 \cdot (38.854)^3$$

$$P_o = 795.315 \cdot 10^{-6}$$

Con los valores obtenidos podemos encontrar el desvanecimiento plano:

$$P_{dp} = P_o \cdot 10^{-M/10}$$

$$P_{dp} = 795.315 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-37.443/10}$$

$$P_{dp} = 1.433 \cdot 10^{-7}$$

$$P_{dp}(\%) = 1.433 \cdot 10^{-5}\%$$

- **Cálculo del Desvanecimiento Selectivo (3.46):**

$$P_{ds} = 100 \cdot \eta \cdot 4.32 \cdot K \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)^2 \%$$

$$P_{ds} = 100 \cdot \eta \cdot 4.32 \cdot 15.4 \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)^2 \%$$

Calcular:

La probabilidad de desvanecimiento multitrayecto (3.47).

$$\eta = 1 - e^{-0.2 \cdot (P_o)^{3/4}}$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2 \cdot (795.315 \cdot 10^{-6})^{3/4}}$$

$$\eta = 946.736 \cdot 10^{-6}$$

Calcular:

El tiempo medio de retardo (3.49).

$$\tau_m = 0.7 \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^{1.3} \text{ [ns]}$$

$$\tau_m = 0.7 \cdot \left(\frac{38.854}{50}\right)^{1.3}$$

$$\tau_m = 0.504 \text{ [ns]}$$

Calcular:

El periodo del símbolo.

$$T_s = 6 \cdot \frac{1}{155.52 \cdot 10^6}$$

$$T_s = 38.580 \text{ [ns]}$$

Con los valores obtenidos podemos encontrar el porcentaje de desvanecimiento selectivo:

$$P_{ds} = 100 \cdot \eta \cdot 4.32 \cdot K \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)^2 \%$$

$$P_{ds} = 100 \cdot 946.736 \cdot 10^{-6} \cdot 4.32 \cdot 15.4 \cdot \left(\frac{0.504}{38.580}\right)^2$$

$$P_{ds}(\%) = 1.076 \cdot 10^{-3} \%$$

- **Cálculo del Desvanecimiento Total (3.51):**

$$P_T = \left(P_{dp}^{\alpha/2} + P_{ds}^{\alpha/2}\right)^{2/\alpha}$$

Para $\alpha = 2$:

$$P_T = \left(1.433 \cdot 10^{-5^{2/2}} + 1.076 \cdot 10^{-3^{2/2}}\right)^{2/2}$$

$$P_T = 1.091 \cdot 10^{-3} \%$$

Para el cálculo de disponibilidad y del tiempo fuera de servicio se realiza el siguiente procedimiento:

- **Disponibilidad:**

$$D(\%) = 100 - 1.091 \cdot 10^{-3}$$

$$D(\%) = 99.99890943\%$$

- **Tiempo Fuera de Servicio:**

$$t_{fs} = 365 \text{ días} \cdot \left(\frac{1.091 \cdot 10^{-2} \%}{100 \%} \right) \cdot \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right)$$

$$t_{fs} = 9.423 \cdot 10^{-2} \text{ h}$$

$$\text{Horas} = 0$$

$$\text{Minutos} = 9.423 \cdot 10^{-2} \text{ h} \cdot \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right)$$

$$\text{Minutos} = 5.654 \approx 5 \text{ min}$$

$$\text{Segundos} = 0.654 \text{ min} \cdot \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)$$

$$\text{Segundos} = 39.212 \approx 39 \text{ s}$$

Por lo tanto, el tiempo fuera de servicio para $\alpha = 2$ se presenta en la Tabla. 4.24.

Tabla. 4.24. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha = 2$

HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS
0	5	39

Para $\alpha = 1.5$:

$$P_T = \left(1.433 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{1.5/2} + 1.076 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{1.5/2} \right)^{2/1.5}$$

$$P_T = 1.133 \cdot 10^{-3} \%$$

Para el cálculo de disponibilidad y del tiempo fuera de servicio se realiza el siguiente procedimiento:

- **Disponibilidad:**

$$D(\%) = 100 - 1.133 \cdot 10^{-3}$$

$$D(\%) = 99.99886715\%$$

- **Tiempo Fuera de Servicio:**

$$t_{fs} = 365 \text{ días} \cdot \left(\frac{1.133 \cdot 10^{-3} \%}{100 \%} \right) \cdot \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right)$$

$$t_{fs} = 9.788 \cdot 10^{-2} \text{ h}$$

$$\text{Horas} = 0$$

$$\text{Minutos} = 9.788 \cdot 10^{-2} \text{ h} \cdot \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right)$$

$$\text{Minutos} = 5.873 \approx 5 \text{ min}$$

$$\text{Segundos} = 0.873 \text{ min} \cdot \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)$$

$$\text{Segundos} = 52.363 \approx 52 \text{ s}$$

Por lo tanto, el tiempo fuera de servicio para $\alpha = 1.5$ se presenta en la Tabla. 4.25.

Tabla. 4.25. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha = 1.5$

HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS
0	5	52

- **Alineación de las Antenas:**

Calcular:

El ángulo de elevación es el que se forma entre la dirección de viaje de una onda electromagnética radiada por una antena y el plano horizontal. Al ser más

pequeño el valor de este ángulo, mayor será la distancia que una onda propagada debe recorrer a través de la atmósfera terrestre.

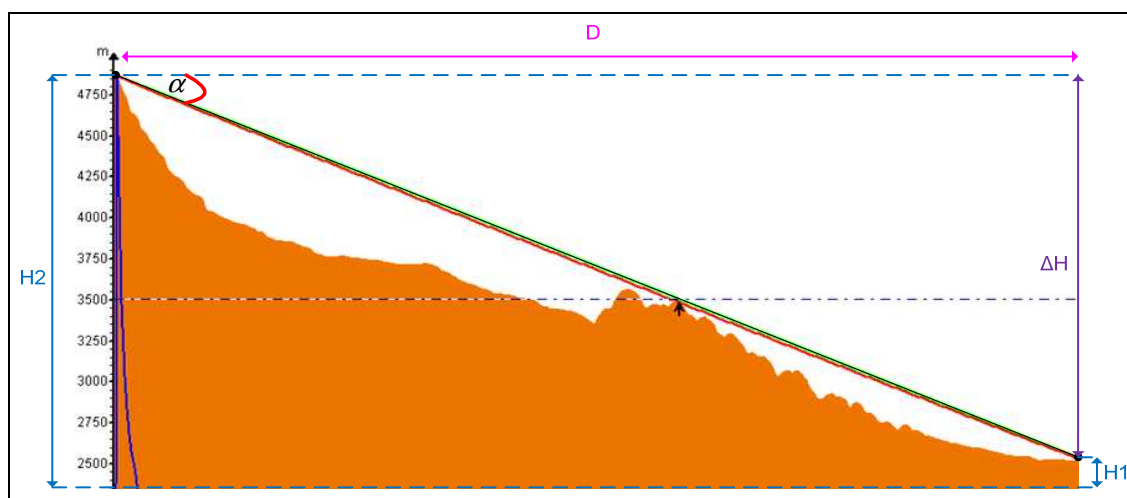


Figura. 4.33. Ángulo de Elevación Cotopaxi – ESPE

Como se observa en la Figura. 4.33, entre la antena transmisora y la antena receptora se forma un triángulo rectángulo donde: ΔH (variación de alturas) y D son sus catetos, y α es el ángulo de elevación. Si se conocen los valores de: H_1 , H_2 y D como se indica en la Tabla. 4.26, entonces se procede a calcular las incógnitas ΔH y α de la siguiente manera:

Tabla. 4.26. Altura de Estaciones

		ALTURA [m]	DISTANCIA [km]
H_2	Transmisor	4874	0
H_1	Receptor	2523	38.854

Se determina la variación de alturas (cateto opuesto):

$$\Delta H = H_2 - H_1$$

$$\Delta H = 4874 - 2523$$

$$\Delta H = 2.351[m]$$

Utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene el ángulo de elevación:

$$\text{Tag}(\alpha) = \frac{\Delta H}{D}$$

$$\alpha = \text{Tag}^{-1}\left(\frac{\Delta H}{D}\right)$$

$$\alpha = \text{Tag}^{-1}\left(\frac{2.351}{38.854}\right)$$

$$\alpha = 3.463^\circ$$

Calcular:

El Azimut se define como el ángulo horizontal que se forma entre la dirección de viaje de una onda electromagnética radiada por una antena y el plano vertical. Para su medición se hace referencia al Norte como cero grados, y se continúa girando en sentido de las agujas del reloj, hacia el Este corresponden 90° de Azimut, hacia el Sur tendríamos 180° Azimut, hacia el Oeste serían 270° , hasta llegar al punto inicial donde los 360° coinciden con los 0° del Norte.

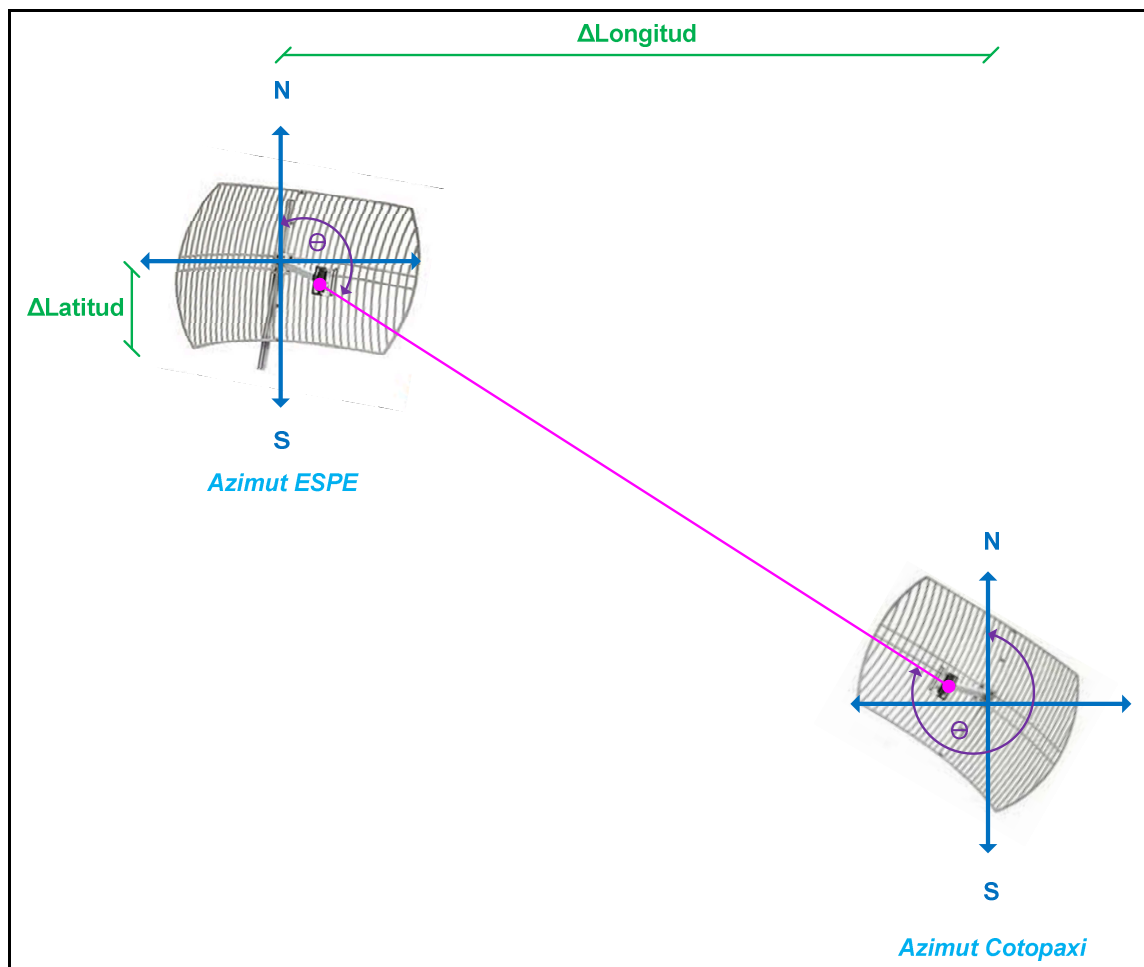


Figura. 4.34. Ángulo de apuntamiento y Azimut

Como se observa en la Figura. 4.34, para el cálculo del azimut es necesario determinar el ángulo de apuntamiento de la siguiente forma:

Calcular:

La variación de la longitud.

$$\Delta_{\text{longitud}} = \text{lon}_{\text{ESPE}} - \text{lon}_{\text{COTOPAXI}}$$

$$\Delta_{\text{longitud}} = 78^{\circ}26'43'' - 78^{\circ}26'19''$$

$$\Delta_{\text{longitud}} = 0^{\circ}0'24''$$

$$\Delta_{\text{longitud}} = 0.00667^{\circ}$$

Calcular:

La variación de la latitud.

$$\Delta_{\text{latitud}} = \text{lat}_{\text{ESPE}} - \text{lat}_{\text{COTOPAXI}}$$

$$\Delta_{\text{latitud}} = 0^{\circ}18'46'' - 0^{\circ}39'50''$$

$$\Delta_{\text{latitud}} = -0^{\circ}21'4''$$

$$\Delta_{\text{latitud}} = -0.35111^{\circ}$$

Calcular:

El ángulo de apuntamiento.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_{\text{latitud}}}{\Delta_{\text{longitud}}} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-0.35111}{0.00667} \right)$$

$$\theta = -88.91^{\circ}$$

Calcular:

El ángulo Azimut ESPE.

$$AZ_{ESPE} = 90^\circ + |\theta|$$

$$AZ_{ESPE} = 90^\circ + 88.91^\circ$$

$$AZ_{ESPE} = 178.91^\circ$$

Calcular:

El ángulo Azimut Cotopaxi.

$$AZ_{COTO} = 270^\circ + |\theta|$$

$$AZ_{COTO} = 270^\circ + 88.91^\circ$$

$$AZ_{COTO} = 358.91^\circ$$

Todos los criterios y conceptos desarrollados en la sección anterior serán utilizados para cada enlace, por lo que sólo se procederá a presentar los resultados obtenidos del Software Sirenet 3.0 y de los cálculos respectivos para la determinación de la viabilidad del radioenlace.

- **ENLACE REFUGIO COTOPAXI – ESPE (EDIFICIO ADMINISTRATIVO)**

A partir de un plano con detalles topográficos se marcaron los puntos extremos del radioenlace, en este caso corresponden al Refugio Cotopaxi y a la ESPE (Edificio Administrativo) que se encuentran ubicados en la provincia del Cotopaxi y la provincia de Pichincha respectivamente.

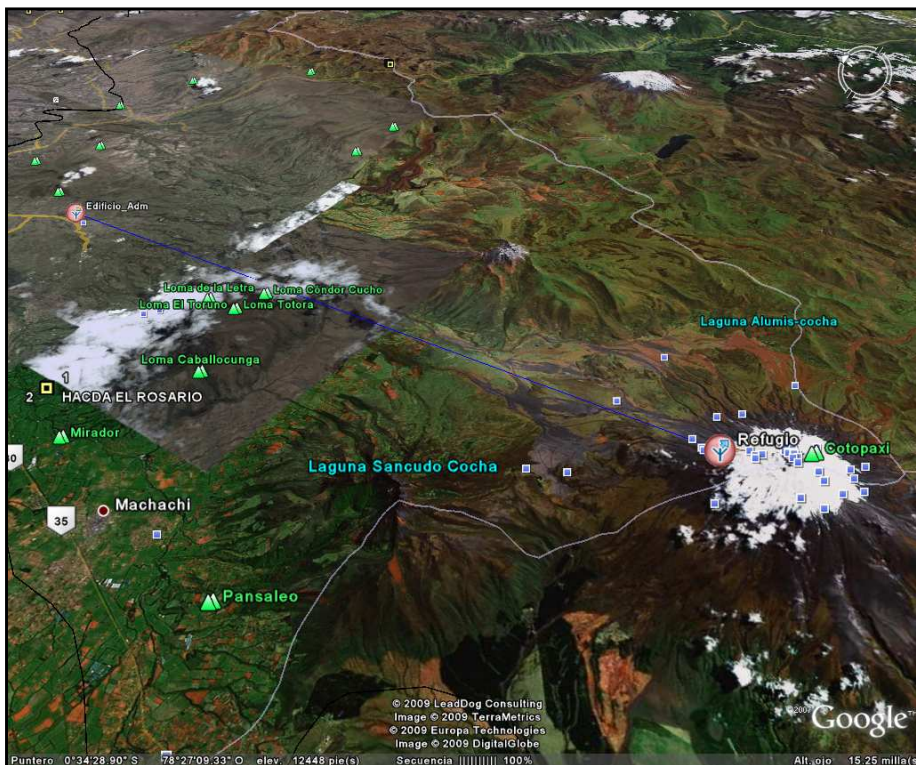


Figura. 4.35. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)

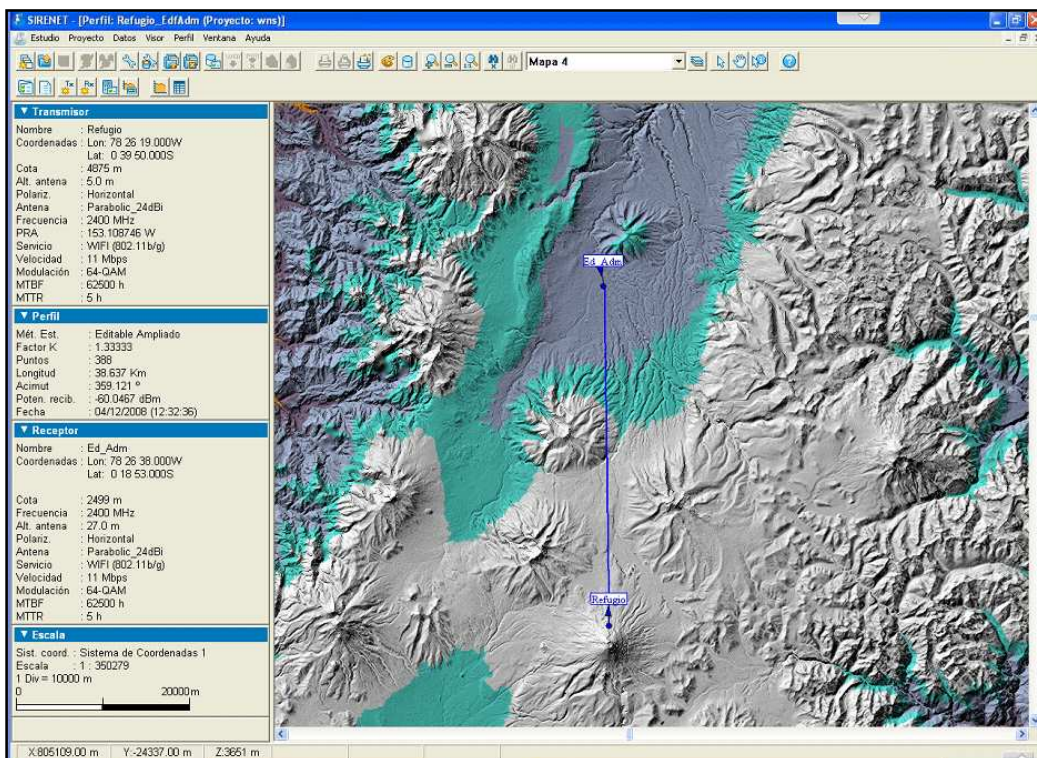


Figura. 4.36. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo) en el Software SIRENET

Las Figuras. 4.35 y 4.36 muestran el enlace Refugio Cotopaxi y ESPE (Edificio Administrativo). La primera corresponde a una presentación de 3D de

Google Earth, ya que gracias al software Sirenet, los objetos y elementos radioeléctricos del estudio se pueden exportar al conocido sistema de información geográfica *Google Earth*, permitiendo explorar de una manera sencilla los datos espaciales georeferenciados. Mientras que la Figura. 4.36 es una captura del enlace mencionado en cartografía digital de la herramienta Sirenet.

A continuación, se muestran los resultados basados en el Software Sirenet utilizando dos puntos de coordenadas diferentes para la estación base ubicada en el Volcán Cotopaxi:

- **Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo**

La Figura. 4.37 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

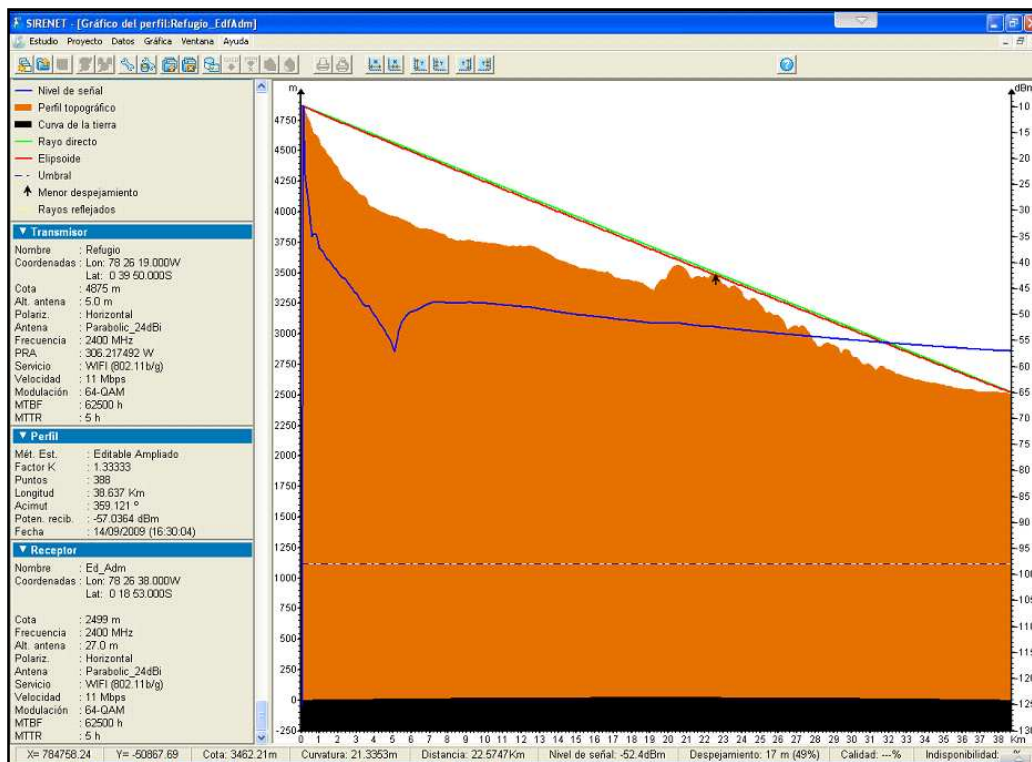


Figura. 4.37. Perfil Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de 17 m (49%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 22.5747 [km] de la estación transmisora. Por lo tanto, con una elección correcta del valor de la altura de las torres de las antena se puede garantizar LOS entre las estaciones base y un 60% de libertad en la primera zona de Fresnel, ya que el valor del despejamiento es aceptable.

- **Cotopaxi 2 – Edificio Administrativo**

La Figura. 4.38 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

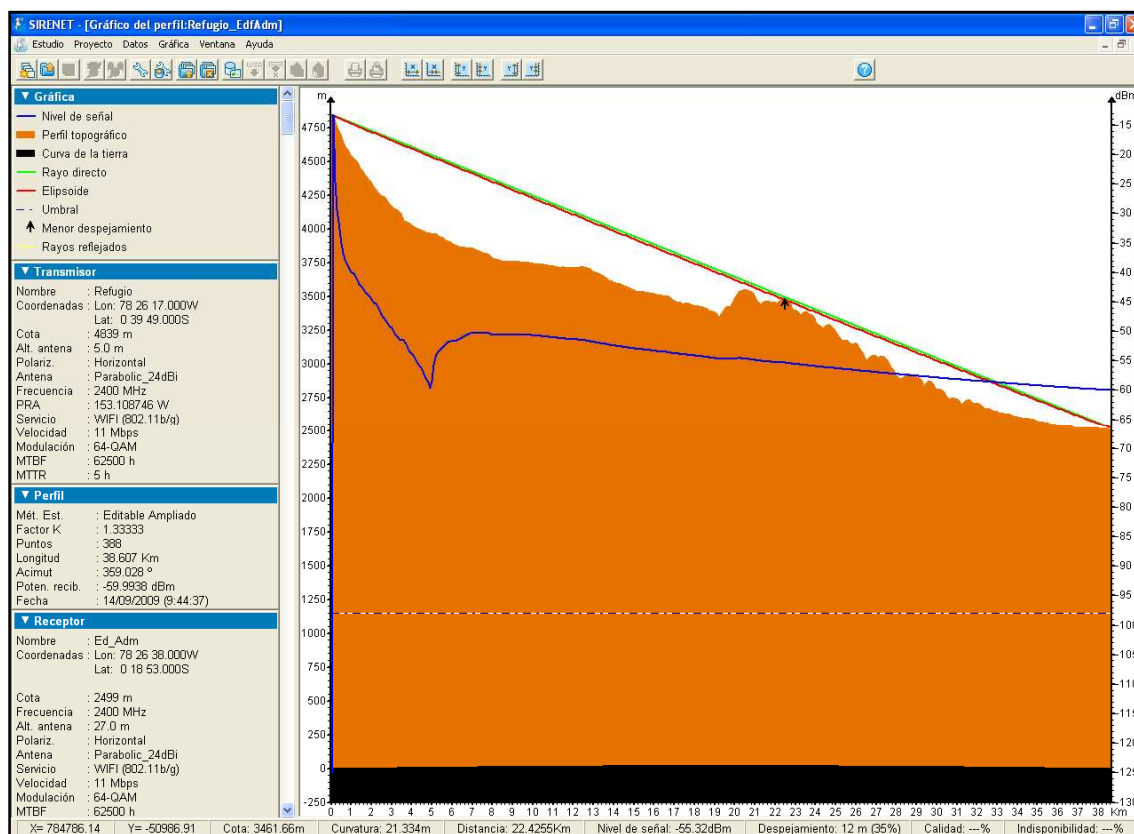


Figura. 4.38. Perfil Cotopaxi 2 – Edificio Administrativo

Como se muestra en la figura anterior, el análisis del perfil del terreno presenta un despejamiento de 12 m (35%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 22.4255 [km] de la estación transmisora. Por lo tanto, dichas posiciones geográficas de las estaciones quedan descartadas, ya que el obstáculo que se encuentra entre ellas no permite garantizar el 60% de libertad en la primera zona de Fresnel y se requeriría un valor excesivo para la altura de las torres de las antenas.

Análisis del Vano

La ventana de análisis del vano que se indican en la Figura. 4.39, contiene los parámetros específicos del estudio.

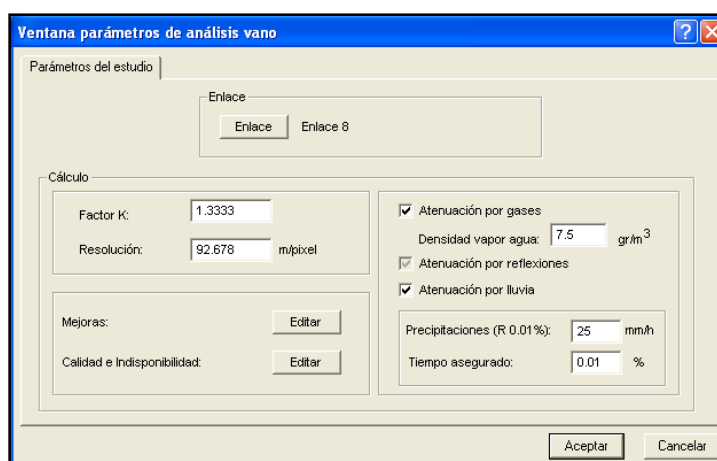


Figura. 4.39. Parámetros de Análisis del Vano

Tras realizar los cálculos, el programa pasa a una nueva pantalla similar a la del perfil como se muestra en la Figura. 4.40, donde se indica que el enlace presenta una potencia recibida de -55.956 [dBm] y una atenuación de 132.035 [dB].

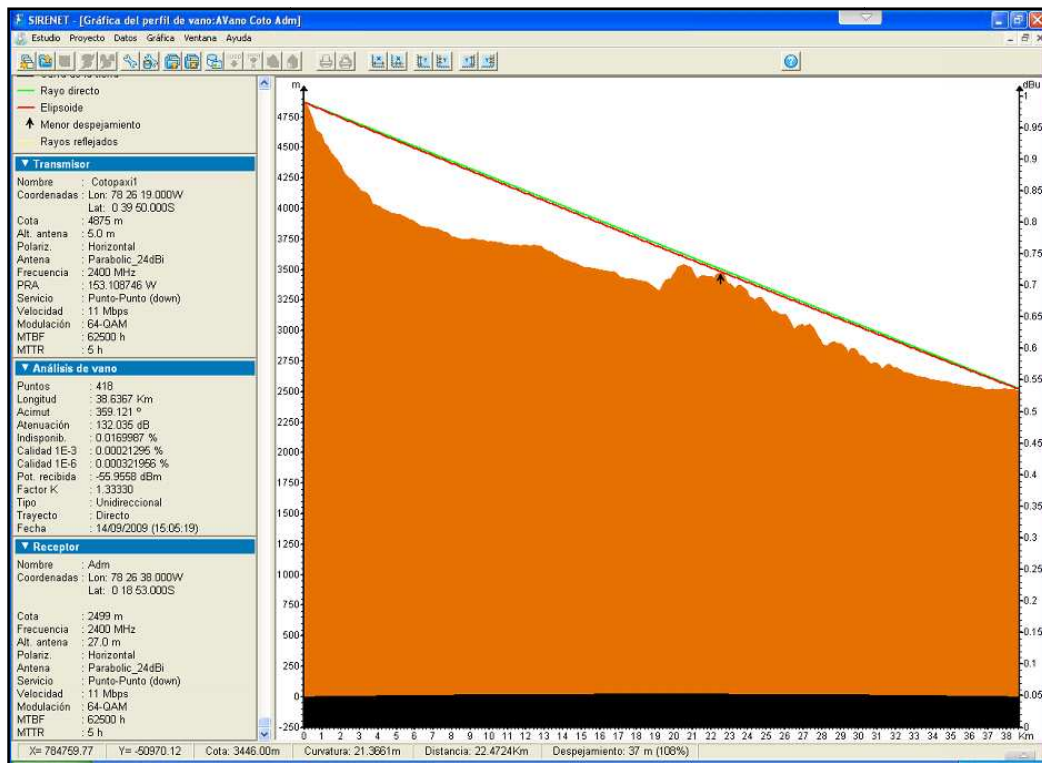


Figura. 4.40. Análisis del Vano Cotopaxi – Edificio Administrativo

Los resultados del estudio incluyen un desglose de los distintos tipos de pérdidas (espacio libre, difracción, reflexiones, atenuación por lluvia, absorción por gases) y hace una estimación de las estadísticas de recepción en términos de calidad del enlace e indisponibilidad. Las Figuras. 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, y 4.45 muestran los resultados obtenidos de la herramienta Sirenet:



Figura. 4.41. Pérdidas del Enlace

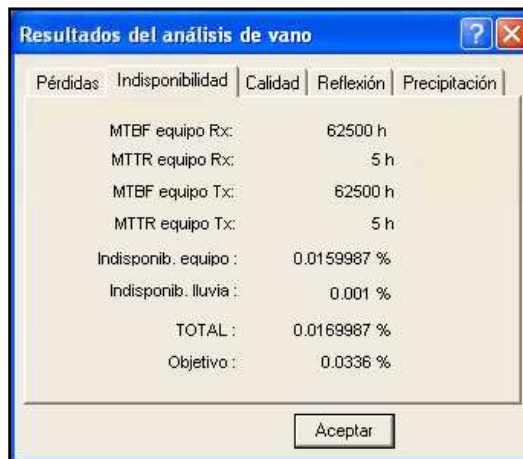


Figura. 4.42. Indisponibilidad del Enlace

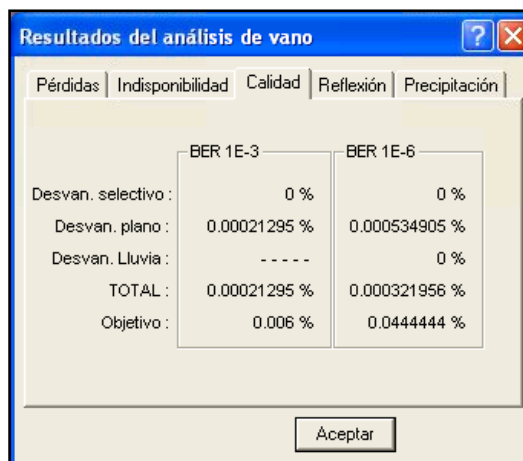


Figura. 4.43. Calidad del Enlace

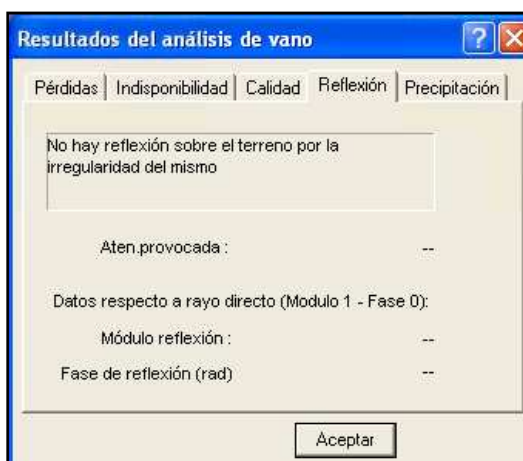


Figura. 4.44. Reflexión del Enlace

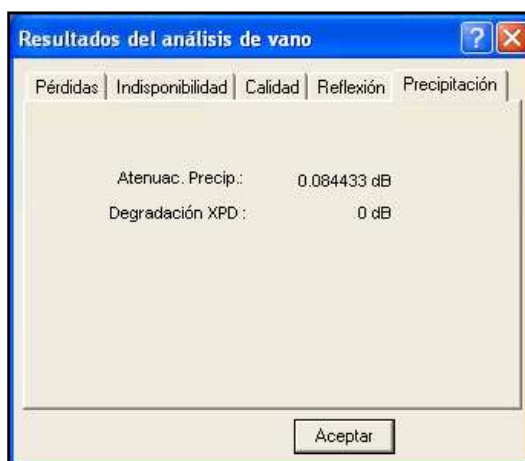


Figura. 4.45. Precipitación del Enlace

- **Altura de las Antenas**

El estudio de Análisis de Vano en Sirenet permite el cálculo automático de la altura del mástil del transmisor y/o del receptor. Para este caso se ha variado sólo altura del receptor y se ha establecido el 60% y el 100% de libertad de la Zona de Fresnel.

Las Figuras. 4.46 y 4.47 muestran los resultados:

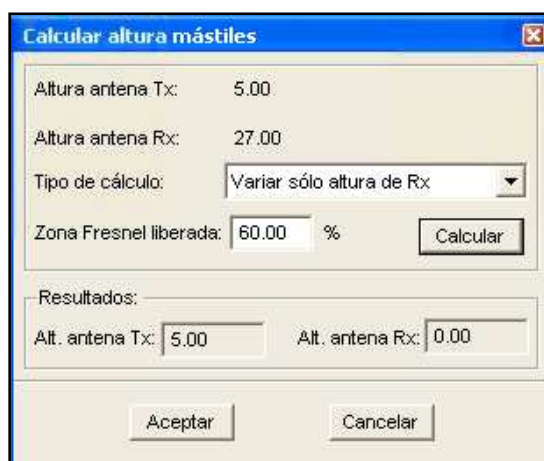


Figura. 4.46. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel

Figura. 4.47. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel

Ejemplo de Cálculos

Para la realización de las pruebas se utilizarán las coordenadas de Cotopaxi 1 y Edificio Administrativo, ya que al apreciar los diferentes resultados de las simulaciones el mejor punto para ubicar la estación base en el Volcán Cotopaxi es el “Cotopaxi1” cuya altura en la simulación alcanza los 4869 m.

Las coordenadas se muestran en la Tabla. 4.27:

Tabla. 4.27. Coordenadas Enlace Refugio Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)

Ubicación	Latitud	Longitud
Tx COTOPAXI1	0°39' 50" S	78°26' 19" O
Rx ESPE – Ed. Administrativo	0°18' 53" S	78°26' 38" O

- **Perfil**

Gracias a las herramientas del software Sirenet 3.0 se pudo obtener las alturas del perfil del trayecto corregidas para un valor de $\frac{4}{3}$ como lo indica la siguiente tabla:

Tabla. 4.28. Perfil Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo

D (Km)	Alt (m)
0	4869
0.1	4834
0.2	4803
0.3	4766
0.4	4726
0.5	4679
0.6	4633
0.7	4627
0.8	4616
0.9	4588
1	4540
1.1	4523
1.2	4510
1.3	4481
1.4	4456
1.5	4442
1.6	4417
1.7	4396
1.8	4373

1.9	4360
2	4322
2.1	4290
2.2	4275
2.3	4255
2.4	4240
2.5	4231
2.6	4220
2.7	4204
2.8	4183
2.9	4170
3	4148
3.1	4134
3.2	4126
3.3	4119
3.4	4112
3.5	4092
3.6	4049
3.7	4025
3.8	4022
3.9	4019
4	4011
4.1	4001
4.2	3992
4.3	3988
4.4	3977
4.5	3970
4.6	3963
4.7	3957
4.8	3950
4.9	3946
5	3943
5.1	3939
5.2	3940
5.3	3932
5.4	3923
5.5	3917
5.6	3909
5.7	3901
5.8	3894
5.9	3887
6	3877
6.1	3867
6.2	3858

6.3	3849
6.4	3844
6.5	3838
6.6	3834
6.7	3833
6.8	3833
6.9	3832
7	3831
7.1	3828
7.2	3821
7.3	3814
7.4	3808
7.5	3801
7.6	3793
7.7	3793
7.8	3786
7.9	3771
8	3761
8.1	3755
8.2	3751
8.3	3747
8.4	3741
8.5	3735
8.6	3739
8.7	3737
8.8	3734
8.9	3736
9	3738
9.1	3745
9.2	3738
9.3	3735
9.4	3731
9.5	3727
9.6	3727
9.7	3728
9.8	3726
9.9	3720
10	3723
10.1	3720
10.2	3713
10.3	3714
10.4	3714
10.5	3711
10.6	3709
10.7	3708

10.8	3702
10.9	3700
11	3698
11.1	3694
11.2	3691
11.3	3687
11.4	3688
11.5	3691
11.6	3688
11.7	3685
11.8	3687
11.9	3688
12	3688
12.1	3684
12.2	3683
12.3	3688
12.4	3690
12.5	3688
12.6	3683
12.7	3683
12.8	3679
12.9	3668
13	3654
13.1	3647
13.2	3643
13.3	3636
13.4	3632
13.5	3620
13.6	3611
13.7	3600
13.8	3590
13.9	3584
14	3575
14.1	3568
14.2	3566
14.3	3561
14.4	3555
14.5	3550
14.6	3544
14.7	3538
14.8	3533
14.9	3528
15	3522
15.1	3513
15.2	3502

15.3	3506
15.4	3506
15.5	3502
15.6	3497
15.7	3495
15.8	3495
15.9	3490
16	3490
16.1	3484
16.2	3479
16.3	3477
16.4	3476
16.5	3473
16.6	3473
16.7	3473
16.8	3465
16.9	3450
17	3439
17.1	3429
17.2	3424
17.3	3421
17.4	3413
17.5	3411
17.6	3415
17.7	3412
17.8	3411
17.9	3407
18	3402
18.1	3396
18.2	3395
18.3	3395
18.4	3392
18.5	3386
18.6	3380
18.7	3371
18.8	3358
18.9	3347
19	3339
19.1	3327
19.2	3315
19.3	3328
19.4	3366
19.5	3390
19.6	3404
19.7	3417

19.8	3410
19.9	3416
20	3441
20.1	3476
20.2	3500
20.3	3517
20.4	3527
20.5	3532
20.6	3530
20.7	3521
20.8	3514
20.9	3501
21	3468
21.1	3440
21.2	3423
21.3	3416
21.4	3421
21.5	3435
21.6	3443
21.7	3434
21.8	3429
21.9	3435
22	3435
22.1	3426
22.2	3423
22.3	3440
22.4	3457
22.5	3465
22.6	3462
22.7	3434
22.8	3399
22.9	3377
23	3369
23.1	3373
23.2	3348
23.3	3329
23.4	3350
23.5	3362
23.6	3363
23.7	3350
23.8	3343
23.9	3325
24	3286
24.1	3268
24.2	3261

24.3	3247
24.4	3234
24.5	3251
24.6	3263
24.7	3261
24.8	3248
24.9	3228
25	3207
25.1	3186
25.2	3161
25.3	3142
25.4	3148
25.5	3150
25.6	3139
25.7	3123
25.8	3120
25.9	3124
26	3123
26.1	3104
26.2	3080
26.3	3053
26.4	3024
26.5	3004
26.6	3006
26.7	3021
26.8	3038
26.9	3043
27	3034
27.1	3022
27.2	3031
27.3	3041
27.4	3031
27.5	3012
27.6	2989
27.7	2959
27.8	2934
27.9	2913
28	2884
28.1	2870
28.2	2866
28.3	2866
28.4	2873
28.5	2888
28.6	2896
28.7	2896

28.8	2889
28.9	2882
29	2881
29.1	2873
29.2	2864
29.3	2835
29.4	2804
29.5	2818
29.6	2846
29.7	2850
29.8	2837
29.9	2808
30	2791
30.1	2781
30.2	2786
30.3	2778
30.4	2753
30.5	2737
30.6	2722
30.7	2721
30.8	2730
30.9	2729
31	2720
31.1	2706
31.2	2690
31.3	2671
31.4	2687
31.5	2705
31.6	2716
31.7	2712
31.8	2689
31.9	2681
32	2685
32.1	2677
32.2	2673
32.3	2660
32.4	2646
32.5	2645
32.6	2644
32.7	2642
32.8	2636
32.9	2629
33	2626
33.1	2619
33.2	2612

33.3	2611
33.4	2606
33.5	2604
33.6	2610
33.7	2600
33.8	2597
33.9	2589
34	2587
34.1	2585
34.2	2581
34.3	2579
34.4	2576
34.5	2575
34.6	2574
34.7	2571
34.8	2568
34.9	2566
35	2561
35.1	2556
35.2	2551
35.3	2550
35.4	2549
35.5	2546
35.6	2540
35.7	2536
35.8	2534
35.9	2531
36	2530
36.1	2529
36.2	2528
36.3	2529
36.4	2528
36.5	2526
36.6	2525
36.7	2521
36.8	2514
36.9	2508
37	2505
37.1	2509
37.2	2513
37.3	2511
37.4	2507
37.5	2508
37.6	2508
37.7	2509

37.8	2511
37.9	2512
38	2511
38.1	2505
38.2	2506
38.3	2508
38.4	2507
38.5	2503
38.6	2499
38.637	2499

A continuación, se muestran los resultados del perfil del terreno:

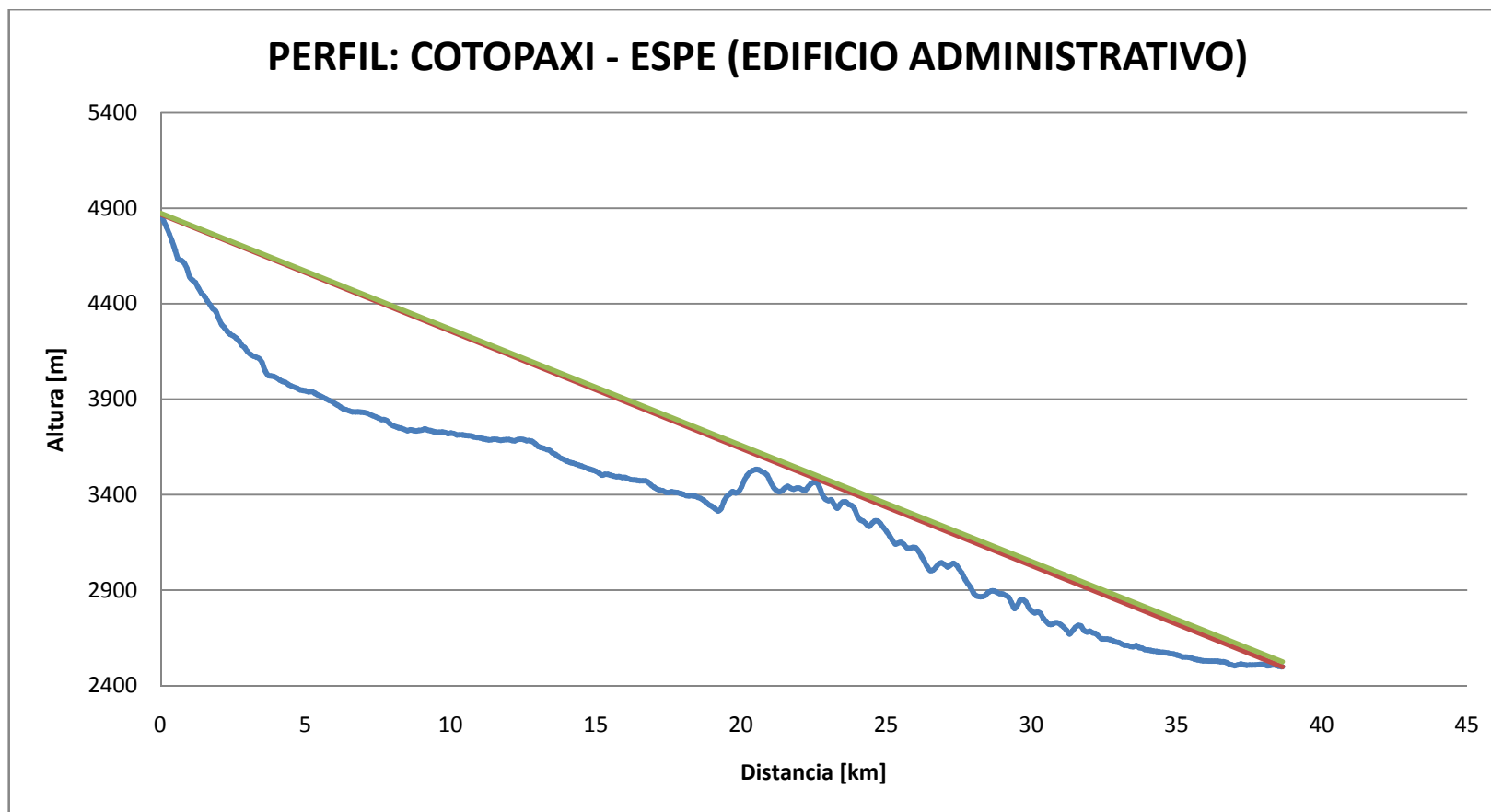


Figura. 4.48. Perfil de Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)

En la figura anterior la línea de color roja muestra el trayecto directo entre el transmisor y el receptor. Mientras que la línea de color verde incluye la altura de las torres de las antenas, por lo que se puede observar que no existe obstrucción en la línea de vista para dicho enlace.

- **Desarrollo de cálculos:**

A continuación, se describe el procedimiento del cálculo del desempeño del radio enlace, basado en el Modelo de Mojoli:

Se presentan tabulados los datos de las características de los equipos a usarse y del perfil de terreno. En la Tabla. 4.30 se indica la posición, distancia y altura de las estaciones y del obstáculo, estos datos fueron obtenidos de la herramienta Sirenet.

Tabla. 4.29. Características del Enlace

DATOS	
Potencia de Transmisión	400 [mW]
Frecuencia de Operación	2.4 [GHz]
Umbral de Recepción	-97 [dBm]
Ganancia de la Antena ($G_{Tx} = G_{Rx}$)	24 [dBi]
Altura de la Torre de la Antenas de Tx	5 [m]
Altura de la Torre de la Antenas de Rx	27 [m]
Pérdidas por Línea de Transmisión	0.40622 $\left[\frac{dB}{m}\right]$
Modulación	64QAM
BER	10^{-03}

Tabla. 4.30. Características del Perfil

	DISTANCIA [km]	ALTURA [m]
Transmisor	0	4869
Obstáculo	22.5	3465
Receptor	38.637	2499

- **Análisis del Perfil:**

Una vez conocidos los valores de distancia y altura de las estaciones base y determinado el obstáculo que puede interferir en la trayectoria se procede a:

Calcular:

El margen sobre obstáculo aplicando la ecuación (3.13):

$$c = h_1 + \frac{d_1 \cdot (h_2 - h_1)}{d} - h_{obs}$$

$$c = 2499 + 27 + \frac{(38.637 - 22.5) \cdot (4869 + 5 - 2499 - 27)}{38.637} - 3465$$

$$c = 41.658$$

El valor de c es correcto, ya que es positivo. En caso de que dicho parámetro sea negativo se debe aumentar las alturas de las torres de las antenas.

Calcular:

El radio de la primera zona de Fresnel utilizado la ecuación (3.12):

$$F_1 = 548 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}}$$

$$F_1 = 548 \cdot \sqrt{\frac{(38.637 - 22.5) \cdot 22.5}{2400 \cdot 38.637}}$$

$$F_1 = 34.291$$

Calcular:

El porcentaje de liberación de la primera zona de Fresnel se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{c}{F_{1\%}} = \frac{41.658}{34.291} \cdot 100\%$$

$$\frac{c}{F_{1\%}} = 121.48\%$$

Por lo tanto, el enlace cumple con la libertad del 60% de la Primera Zona de Fresnel.

Comprobación:

$$60\% \cdot F_1 = 34.291 \cdot 0.6$$

$$60\% \cdot F_1 = 20.574$$

$$c = 41.658$$

$$c > 20.574$$

$$\therefore c > 60\% \cdot F_1$$

Con el cumplimiento de dicha condición se determina que la altura de las torres es correcta.

Calcular:

La constante de disposición geométrica del obstáculo en el trayecto en el modelo de filo de cuchillo aplicando la ecuación (3.20):

$$v = \frac{c}{F_1}$$

$$v = -\frac{41.658}{34.291}$$

$$v = -1.215$$

Como $v < -1$, la atenuación debida a un obstáculo filo de cuchillo (función Bessel) se obtiene aplicando la ecuación (3.19):

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) [dB]$$

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(-1.215 - 0.1)^2 + 1} - 1.215 - 0.1 \right)$$

$$J(v) = -2.546 [dB]$$

Por lo tanto, la atenuación por difracción es:

$$A_d = -2.546 [dB]$$

Calcular:

Las pérdidas debido al espacio libre utilizando la ecuación (3.15):

$$A_{Le} = 32.5 + 20\log(f[\text{MHz}]) + 20\log(d[\text{km}])$$

$$A_{Le} = 32.5 + 20\log(2400) + 20\log(38.637)$$

$$A_{Le} = 131.844 [\text{dB}]$$

Calcular:

Las pérdidas de las líneas de transmisión se definen con la ecuación (3.23):

$$L_{Tx} = L_{LTx} \cdot h_{antena}$$

$$L_{Tx} = (0.40622 \cdot 2) + (0.40622 \cdot 2)$$

$$L_{Tx} = 1.625 [\text{dB}]$$

Calcular:

El margen de desvanecimiento con la ecuación (3.28):

$$M = P_{Rx} - \text{Umbral}$$

Donde la P_{Rx} se define como (3.22):

$$P_{Rx}[\text{dB}] = P_{Tx}[\text{dB}] + G_{Tx}[\text{dBi}] + G_{Rx}[\text{dBi}] - A_d - A_{Le} - L_{Tx}$$

$$P_{Rx}[\text{dB}] = 10\log\left(\frac{400 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) + 24 + 24 - 2.546 - 131.844 - 1.625$$

$$P_{Rx}[\text{dB}] = -56.903 [\text{dB}]$$

Por lo tanto,

$$M = P_{Rx} - \text{Umbral}$$

$$M = -56.903 - (-97)$$

$$M = 40.097[\text{dB}]$$

- **Cálculo del Desvanecimiento Plano:**

Se aplica la ecuación (3.36):

$$P_{dp} = P_o \cdot 10^{-M/10}$$

Donde:

$$P_o = k \cdot Q \cdot f \cdot d^3$$

$$P_o = (2.1 \cdot 10^{-5}) \cdot Q \cdot 2.4 \cdot (38.637)^3$$

$$P_o = 2.1 \cdot 10^{-5} \cdot S^{-1.3} \cdot 2.4 \cdot (38.637)^3$$

Calcular:

El coeficiente de rugosidad utilizando la ecuación (3.41).

$$S = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{n}}$$

Donde:

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i}{n}$$

$$\bar{h} = \frac{1299442}{386}$$

$$\bar{h} = 3366.430$$

Por lo tanto,

$$S = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{119076413}{386}}$$

$$S = 555.417$$

Entonces, el factor que depende de la distribución de probabilidad es:

$$P_o = 2.1 \cdot 10^{-5} \cdot S^{-1.3} \cdot 2.4 \cdot (38.637)^3$$

$$P_o = 2.1 \cdot 10^{-5} \cdot 555.417^{-1.3} \cdot 2.4 \cdot (38.637)^3$$

$$P_o = 786.024 \cdot 10^{-6}$$

Con los valores obtenidos podemos encontrar el desvanecimiento plano:

$$P_{dp} = P_o \cdot 10^{-M/10}$$

$$P_{dp} = 786.024 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-40.097/10}$$

$$P_{dp} = 7.687 \cdot 10^{-8}$$

$$P_{dp}(\%) = 7.687 \cdot 10^{-7}\%$$

- **Cálculo del Desvanecimiento Selectivo (3.46):**

$$P_{ds} = 100 \cdot \eta \cdot 4.32 \cdot K \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)^2 \%$$

$$P_{ds} = 100 \cdot \eta \cdot 4.32 \cdot 15.4 \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)^2 \%$$

Calcular:

La probabilidad de desvanecimiento multitrayecto (3.47).

$$\eta = 1 - e^{-0.2 \cdot (P_o)^{3/4}}$$

$$\eta = 1 - e^{-0.2 \cdot (786.024 \cdot 10^{-6})^{3/4}}$$

$$\eta = 938.430 \cdot 10^{-6}$$

Calcular:

El tiempo medio de retardo (3.49).

$$\tau_m = 0.7 \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^{1.3} \text{ [ns]}$$

$$\tau_m = 0.7 \cdot \left(\frac{38.637}{50}\right)^{1.3}$$

$$\tau_m = 0.501 \text{ [ns]}$$

Calcular:

El periodo del símbolo.

$$T_s = 6 \cdot \frac{1}{155.52 \cdot 10^6}$$

$$T_s = 38.580 \text{ [ns]}$$

Con los valores obtenidos podemos encontrar el porcentaje de desvanecimiento selectivo:

$$P_{ds} = 100 \cdot \eta \cdot 4.32 \cdot K \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_s}\right)^2 \%$$

$$P_{ds} = 100 \cdot 938.43 \cdot 10^{-6} \cdot 4.32 \cdot 15.4 \cdot \left(\frac{0.5007}{38.58}\right)^2$$

$$P_{ds}(\%) = 1.051 \cdot 10^{-3} \%$$

- **Cálculo del Desvanecimiento Total (3.51):**

$$P_T = \left(P_{dp}^{\alpha/2} + P_{ds}^{\alpha/2}\right)^{2/\alpha}$$

Para $\alpha = 2$:

$$P_T = \left(7.687 \cdot 10^{-6^{2/2}} + 1.051 \cdot 10^{-3^{2/2}}\right)^{2/2}$$

$$P_T = 1.059 \cdot 10^{-3} \%$$

Para el cálculo de disponibilidad y del tiempo fuera de servicio se realiza el siguiente procedimiento:

- **Disponibilidad:**

$$D(\%) = 100 - 1.059 \cdot 10^{-3}$$

$$D(\%) = 99.9988\%$$

- **Tiempo Fuera de Servicio:**

$$t_{fs} = 365 \text{ días} \cdot \left(\frac{1.059 \cdot 10^{-3} \%}{100 \%} \right) \cdot \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right)$$

$$t_{fs} = 9.150 \cdot 10^{-2} \text{ h}$$

$$\text{Horas} = 0$$

$$\text{Minutos} = 9.150 \cdot 10^{-2} \text{ h} \cdot \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right)$$

$$\text{Minutos} = 5.490 \approx 5$$

$$\text{Segundos} = 0.490 \text{ min} \cdot \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)$$

$$\text{Segundos} = 29.412 \approx 29.4 \text{ s}$$

Por lo tanto, el tiempo fuera de servicio para $\alpha = 2$ se presenta en la Tabla. 4.31.

Tabla. 4.31. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha = 2$

HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS
0	5	29.4

Para $\alpha = 1.5$:

$$P_T = \left(7.687 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{1.5/2} + 1.051 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{1.5/2} \right)^{2/1.5}$$

$$P_T = 1.087 \cdot 10^{-3}$$

Para el cálculo de disponibilidad y del tiempo fuera de servicio se realiza el siguiente procedimiento:

- **Disponibilidad:**

$$D(\%) = 100 - 1.087 \cdot 10^{-3}$$

$$D(\%) = 99.9989134\%$$

- **Tiempo Fuera de Servicio:**

$$t_{fs} = 365 \text{ días} \cdot \left(\frac{1.087 \cdot 10^{-3} \%}{100 \%} \right) \cdot \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right)$$

$$t_{fs} = 9.388 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Horas} = 0$$

$$\text{Minutos} = 9.388 \cdot 10^{-2} \text{ h} \cdot \left(\frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right)$$

$$\text{Minutos} = 5.633 \approx 5 \text{ min}$$

$$\text{Segundos} = 0.633 \text{ min} \cdot \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)$$

$$\text{Segundos} = 37.969 \approx 37.9 \text{ s}$$

Por lo tanto, el tiempo fuera de servicio para $\alpha = 1.5$ se presenta en la Tabla. 4.32.

Tabla. 4.32. Tiempo Fuera de Servicio para $\alpha = 1.5$

HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS
0	5	37.9

- **Alineación de las Antenas:**

Calcular:

El ángulo de elevación.

Si se conocen los valores de: H_1 , H_2 y D como se indica en la Tabla. 4.33, entonces se procede a calcular las incógnitas ΔH y α .

Tabla. 4.33. Altura de Estaciones

		ALTURA [m]	DISTANCIA [km]
H_2	Transmisor	4874	0
H_1	Receptor	2526	38.637

Se determina la variación de alturas (cateto opuesto):

$$\Delta H = H_2 - H_1$$

$$\Delta H = 4874 - 2526$$

$$\Delta H = 2.348[m]$$

Utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene el ángulo de elevación:

$$\text{Tag}(\alpha) = \frac{\Delta H}{D}$$

$$\alpha = \text{Tag}^{-1}\left(\frac{\Delta H}{D}\right)$$

$$\alpha = \text{Tag}^{-1}\left(\frac{2.348}{38.637}\right)$$

$$\alpha = 3.4776^\circ$$

Calcular:

El Azimut.

Para dicho cálculo es necesario determinar el ángulo de apuntamiento de la siguiente forma:

Calcular:

La variación de la longitud.

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{longitud}} &= \text{lon}_{\text{ESPE}} - \text{lon}_{\text{COTOPAXI}} \\ \Delta_{\text{longitud}} &= 78^{\circ}26'38'' - 78^{\circ}26'19'' \\ \Delta_{\text{longitud}} &= 0^{\circ}0'19'' \\ \Delta_{\text{longitud}} &= 0.0053^{\circ}\end{aligned}$$

Calcular:

La variación de la latitud.

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{latitud}} &= \text{lat}_{\text{ESPE}} - \text{lat}_{\text{COTOPAXI}} \\ \Delta_{\text{latitud}} &= 0^{\circ}18'53'' - 0^{\circ}39'50'' \\ \Delta_{\text{latitud}} &= -0^{\circ}21'3'' \\ \Delta_{\text{latitud}} &= -0.3492^{\circ}\end{aligned}$$

Calcular:

El ángulo de apuntamiento.

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1}\left(\frac{\Delta_{\text{latitud}}}{\Delta_{\text{longitud}}}\right) \\ \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{-0.3492}{0.0053}\right) \\ \theta &= -89.13^{\circ}\end{aligned}$$

Calcular:

El ángulo Azimut ESPE.

$$\begin{aligned}AZ_{\text{ESPE}} &= 90^{\circ} + |\theta| \\ AZ_{\text{ESPE}} &= 90^{\circ} + 89.13^{\circ} \\ AZ_{\text{ESPE}} &= 179.13^{\circ}\end{aligned}$$

Calcular:

El ángulo Azimut Cotopaxi.

$$Az_{COTO} = 270^\circ + |\theta|$$

$$Az_{COTO} = 270^\circ + 89.13^\circ$$

$$Az_{COTO} = 359.13^\circ$$

- **ENLACE REFUGIO COTOPAXI – IASA**

A partir de un plano con detalles topográficos se marcaron los puntos extremos del radioenlace, en este caso corresponden al Refugio Cotopaxi y a al IASA que se encuentran ubicados en la provincia del Cotopaxi y la provincia de Pichincha respectivamente.

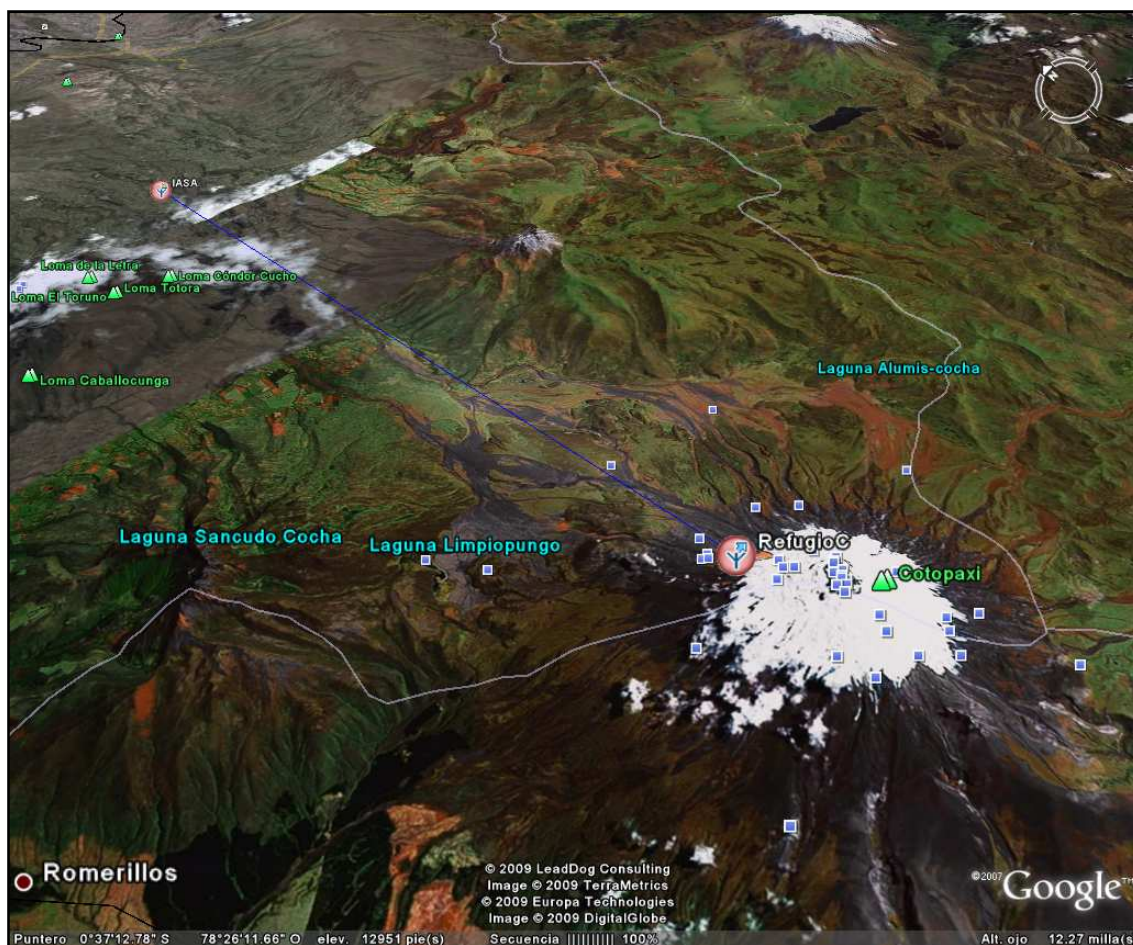


Figura. 4.49. Enlace Cotopaxi – IASA

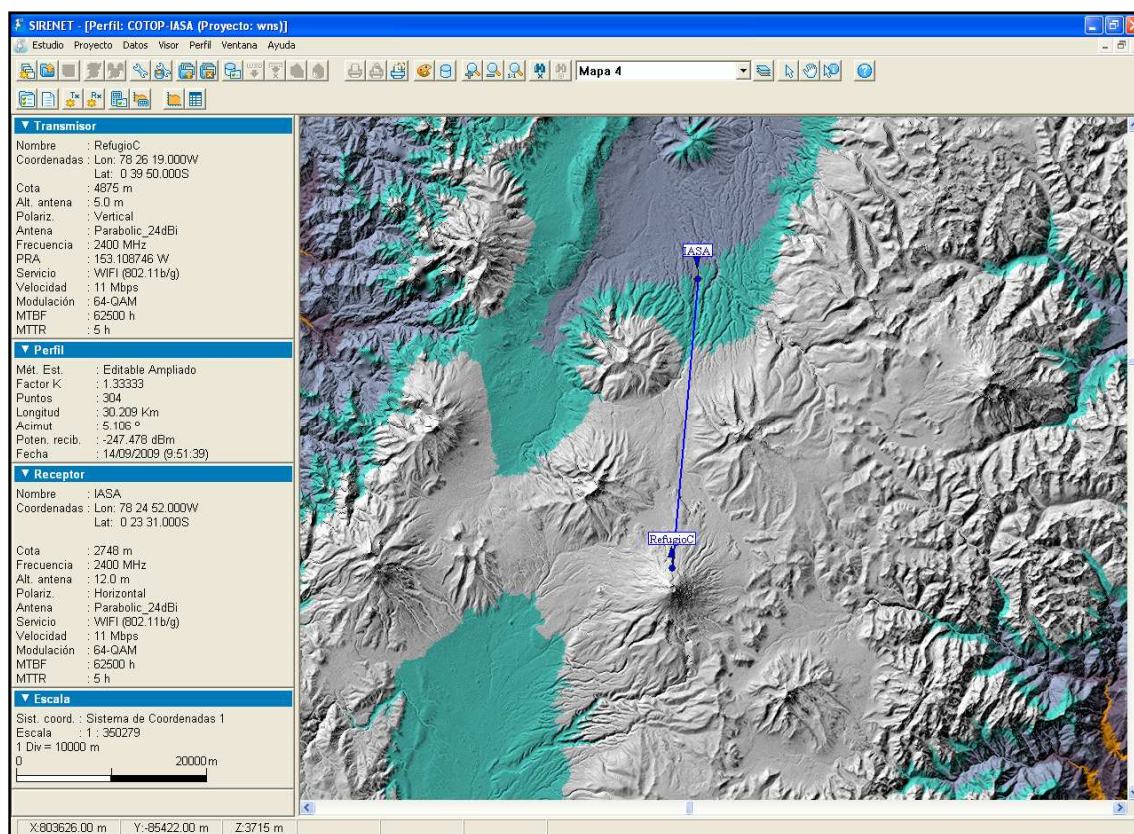


Figura. 4.50. Enlace Cotopaxi – IASA en el Software SIRENET

Las Figuras. 4.49 y 4.50 muestran el enlace Refugio Cotopaxi y ESPE (Bloque D). La primera corresponde a una presentación de 3D de *Google Earth*, ya que gracias al software Sirenet, los objetos y elementos radioeléctricos del estudio se pueden exportar al conocido sistema de información geográfica *Google Earth*, permitiendo explorar de una manera sencilla los datos espaciales georeferenciados. Mientras que la Figura. 4.50 es una captura del enlace mencionado en cartografía digital de la herramienta Sirenet.

A continuación, se muestran los resultados basados en el Software Sirenet utilizando tres puntos de coordenadas diferentes para la estación base ubicada en ESPE-IASA:

- **Cotopaxi 1 – IASA 1**

La Figura. 4.51 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la

derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

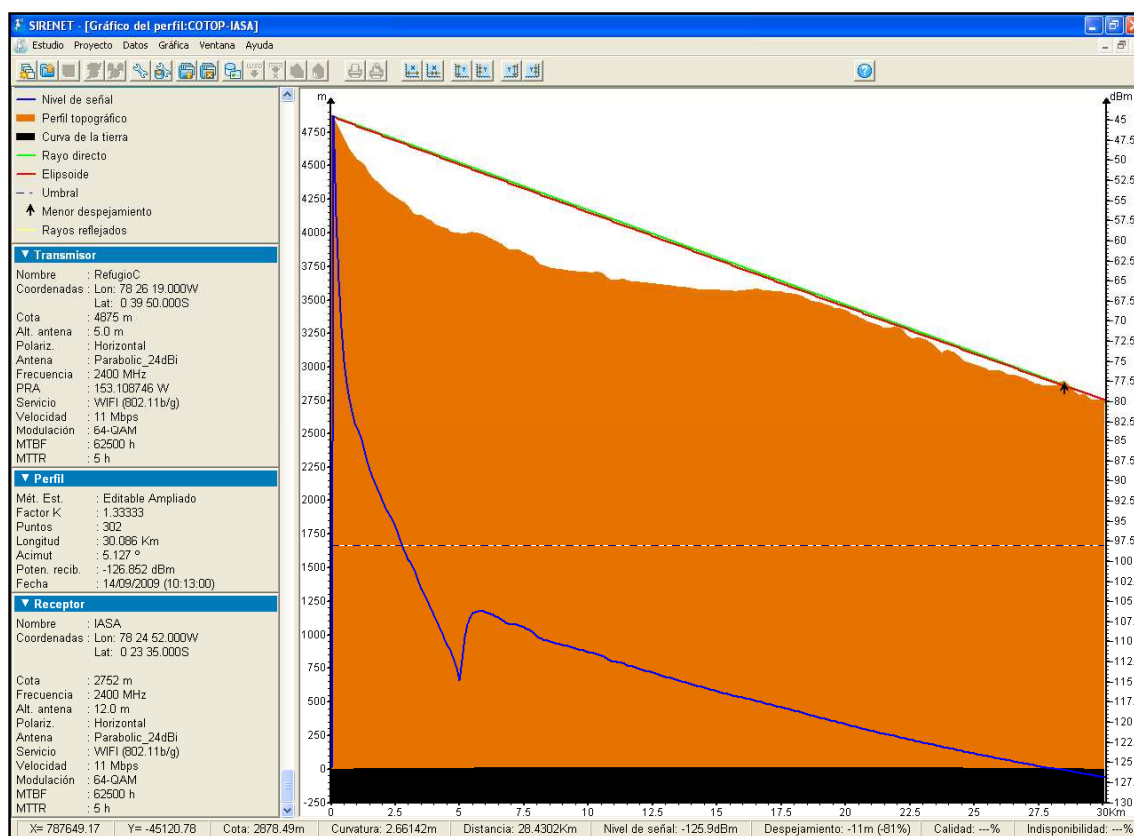


Figura. 4.51. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 1 con una Altura de Rx de 12 [m]

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de -11 m (-81%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 28.4302 [km] de la estación transmisora. Sin embargo, dicho obstáculo no permite garantizar la libertad del 60% de la primera zona de Fresnel.

Por lo planteado anteriormente, se modificó la altura de las torres de las antenas a 20 [m] pero como se observa en la Figura. 4.52, el nivel de despejamiento es de -4 m (-26%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente, por lo que dichas posiciones geográficas de las estaciones quedan descartadas, ya que el obstáculo que se encuentra entre ellas no permite garantizar el 60% de libertad en la primera zona de Fresnel y se requeriría un valor excesivo para la altura de las torres de las antenas.

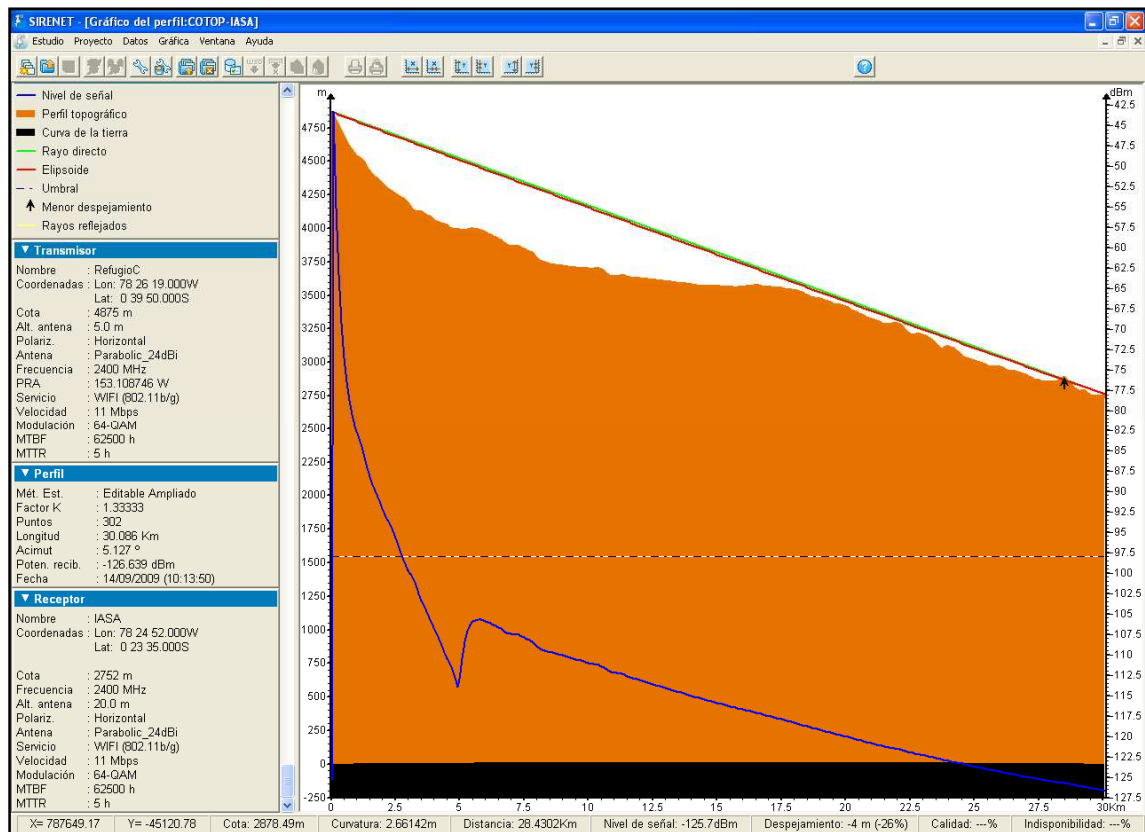


Figura. 4.52. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 1 con una Altura de Rx de 20 [m]

- **Cotopaxi 1 – IASA 2**

La Figura. 4.53 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

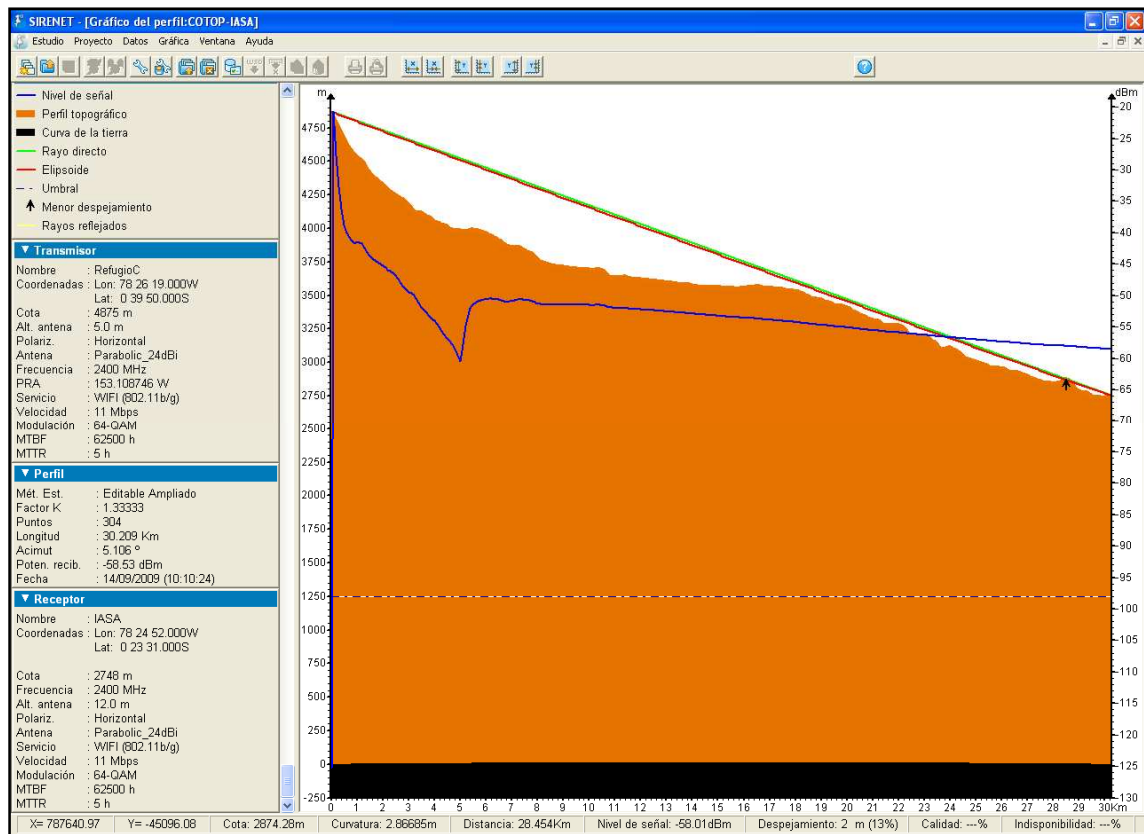


Figura. 4.53. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 2 con una Altura de Rx de 12 [m]

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de 2 m (13%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 28.4196 [km] de la estación transmisora.

Por lo planteado anteriormente, se modificó la altura de las torres de las antenas a 20 [m] como se muestra en la Figura. 4.54, se obtuvo un nivel de despejamiento de 10 m (66%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente, por lo que dichas posiciones geográficas de las estaciones quedan descartadas, ya que el obstáculo que se encuentra entre ellas no permite garantizar el 60% de libertad en la primera zona de Fresnel y se requeriría un valor excesivo para la altura de las torres de las antenas.

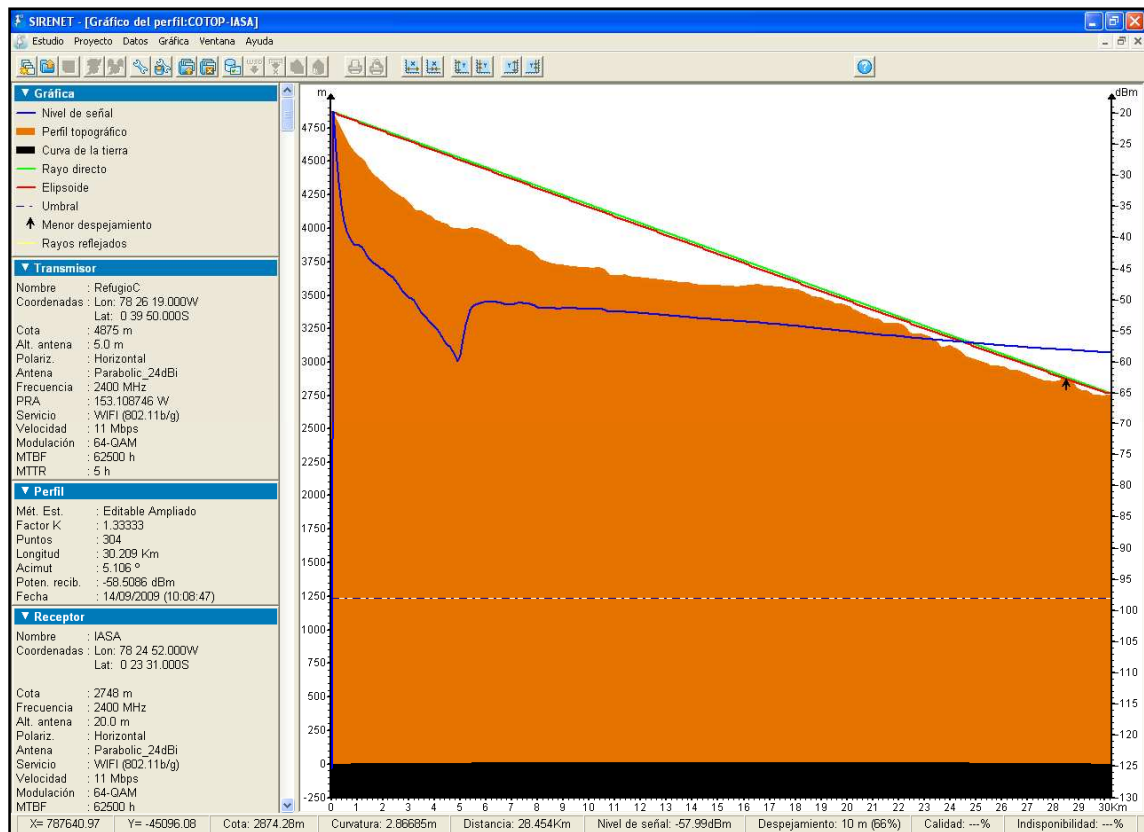


Figura. 4.54. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 2 con una Altura de Rx de 20 [m]

- **Cotopaxi 1 – IASA 3**

La Figura. 4.55 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

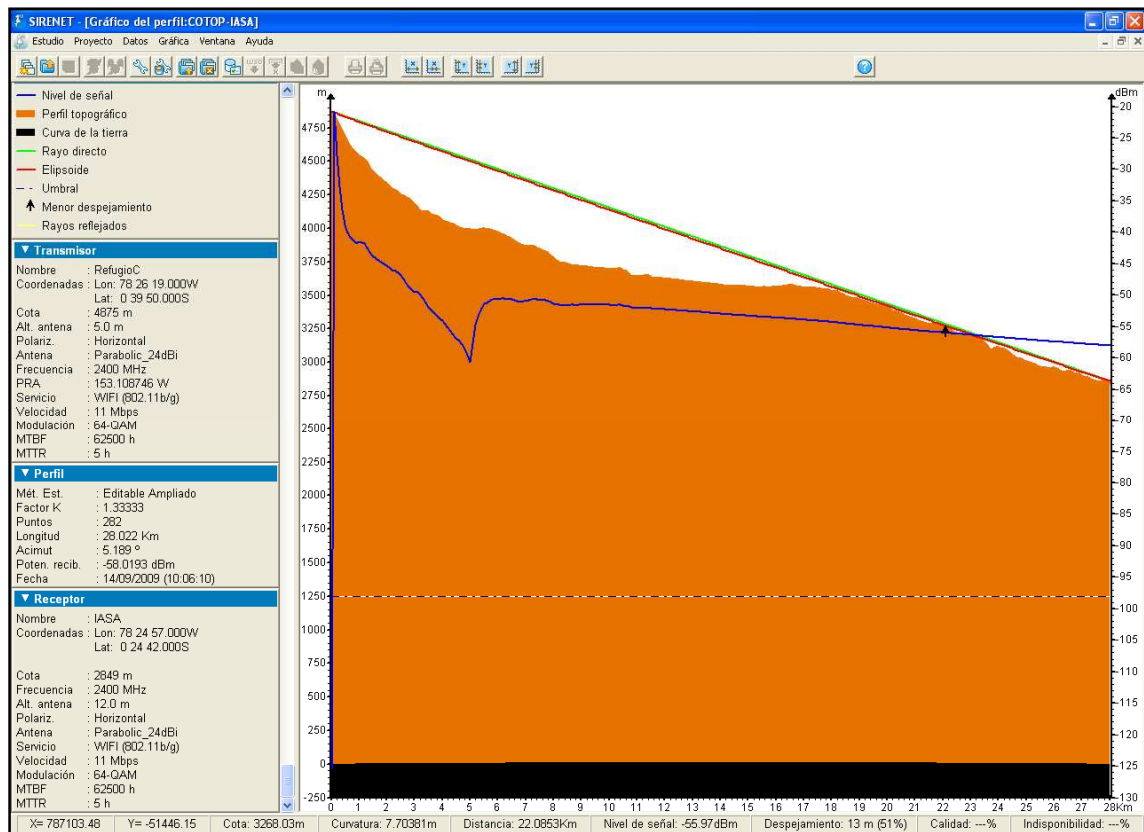


Figura. 4.55. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 3 con una Altura de Rx de 12 [m]

Como se observa en la figura anterior, el análisis del perfil del terreno presenta un despejamiento de 13 m (51%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 22.0853 [km] de la estación transmisora.

Por lo planteado anteriormente, se modificó la altura de las torres de las antenas a 20 [m] como se muestra en la Figura. 4.56, se obtuvo un nivel de despejamiento de 19 m (77%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente, por lo que con dichas alturas se garantizar el 60% de libertad en la primera zona de Fresnel.

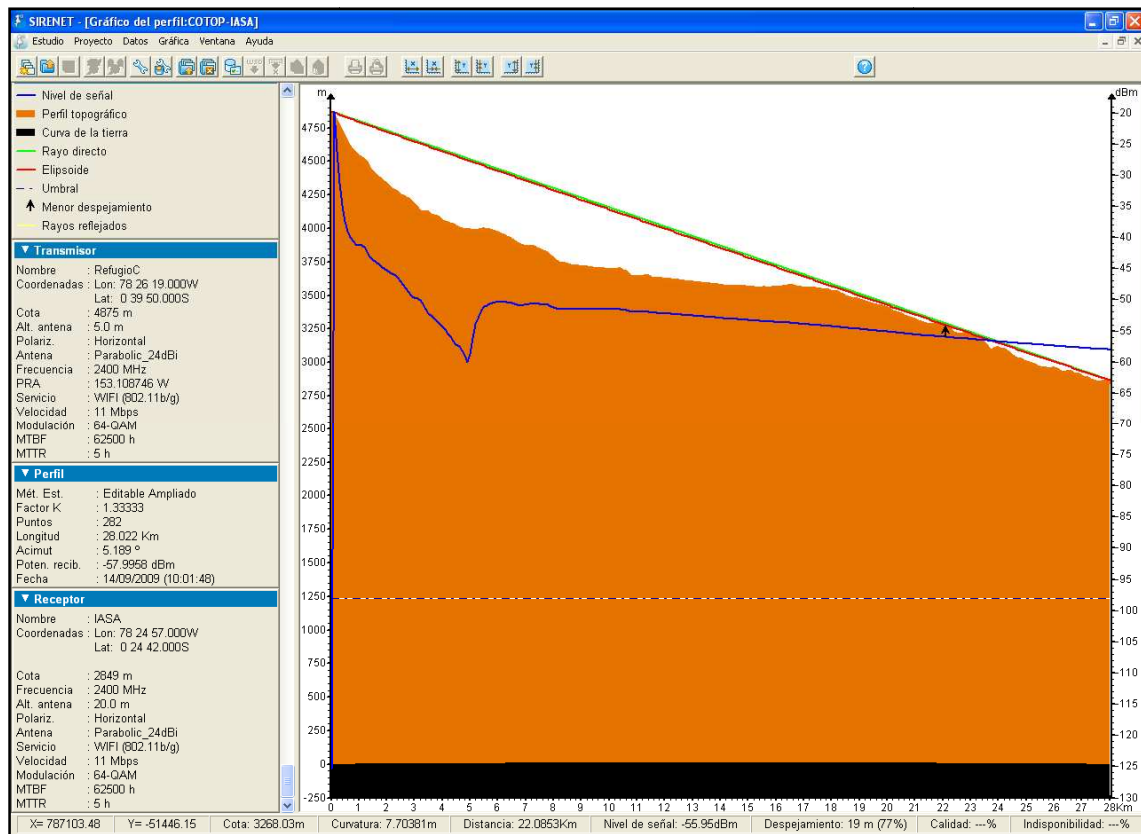


Figura. 4.56. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 3 con una Altura de Rx de 20 [m]

Análisis del Vano

La ventana de análisis del vano que se indican en la Figura. 4.57, contiene los parámetros específicos del estudio.

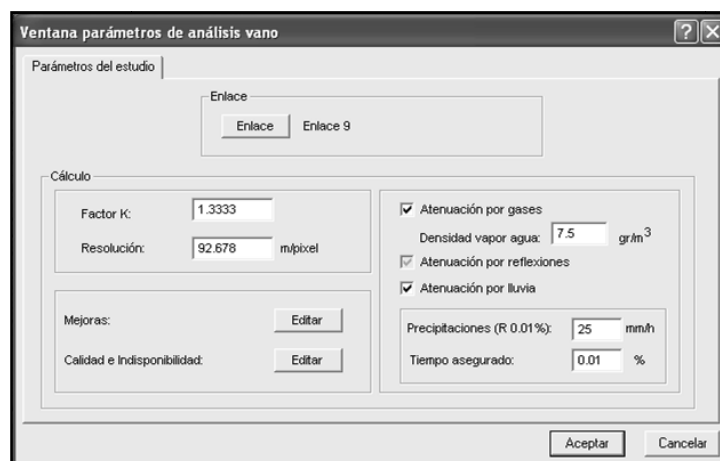


Figura. 4.57. Parámetros de Análisis del Vano

Tras realizar los cálculos, el programa pasa a una nueva pantalla similar a la del perfil como se muestra en la Figura. 4.58, donde se indica que el enlace presenta una potencia recibida de -55.041 [dBm] y una atenuación de 130.635 [dB].

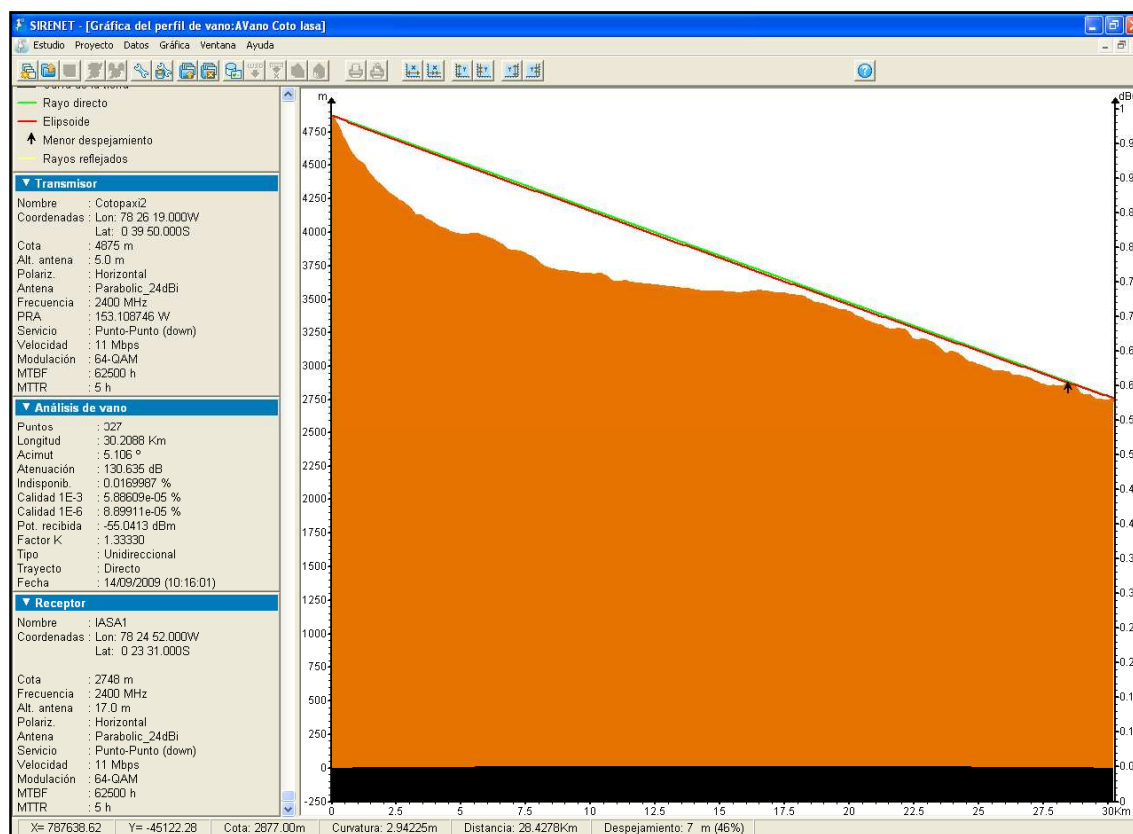


Figura. 4.58. Análisis del Vano Cotopaxi – IASA

Los resultados del estudio incluyen un desglose de los distintos tipos de pérdidas (espacio libre, difracción, reflexiones, atenuación por lluvia, absorción por gases) y hace una estimación de las estadísticas de recepción en términos de calidad del enlace e indisponibilidad. Las Figuras. 4.59, 4.60, 4.61, 4.62 y 4.63 muestran los resultados obtenidos de la herramienta Sirenet:



Figura. 4.59. Pérdidas del Enlace

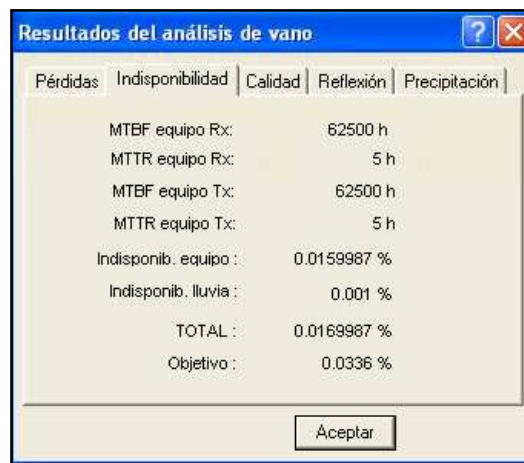


Figura. 4.60. Indisponibilidad del Enlace



Figura. 4.61. Calidad del Enlace

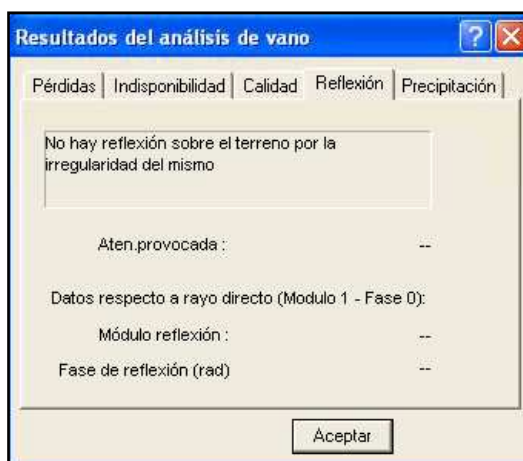


Figura. 4.62. Reflexión del Enlace

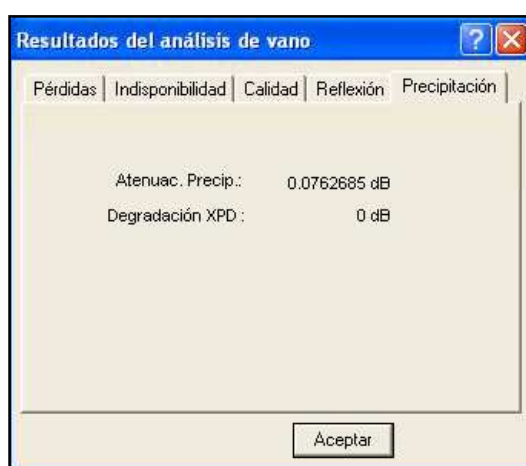


Figura. 4.63. Precipitación del Enlace

- **Altura de las Antenas**

El estudio de Análisis de Vano en Sirenet permite el cálculo automático de la altura del mástil del transmisor y/o del receptor. Para este caso se ha variado sólo altura del receptor y se ha establecido el 60% y el 100% de libertad de la Zona de Fresnel.

Las Figuras. 4.64 y 4.65 muestran los resultados:

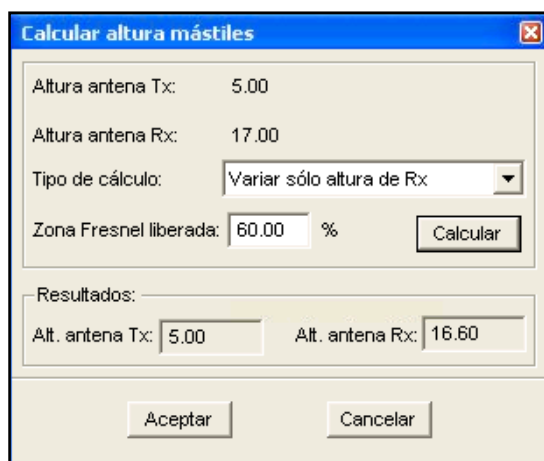


Figura. 4.64. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel

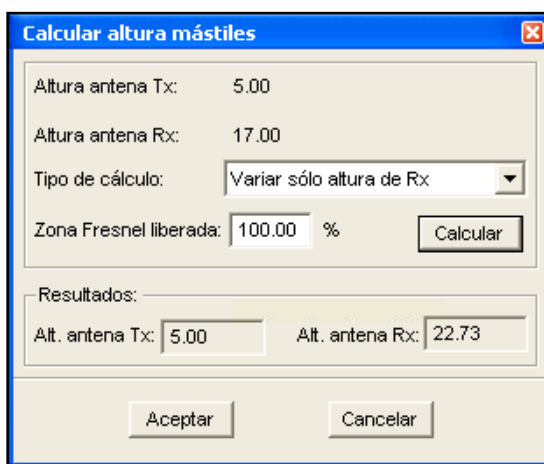


Figura. 4.65. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel

- **Análisis del Perfil**

Gracias a las herramientas del software Sirenet 3.0 se pudo obtener las alturas del perfil del trayecto corregidas para un valor de $4/3$ como lo indica la siguiente tabla:

Tabla. 4.34. Perfil Cotopaxi 1 – IASA 2

D (Km)	Alt (m)
0.00	4869
0.10	4831
0.20	4795
0.30	4754
0.40	4712
0.50	4672
0.60	4636
0.70	4603
0.80	4573
0.90	4545
1.00	4533
1.10	4519
1.20	4506
1.30	4479
1.40	4443
1.50	4417
1.60	4394
1.70	4378
1.80	4359
1.90	4341
2.00	4326
2.10	4308
2.20	4288
2.30	4275
2.40	4260
2.50	4245
2.60	4233
2.70	4223
2.80	4212

2.90	4196
3.00	4176
3.10	4145
3.20	4125
3.30	4116
3.40	4118
3.50	4116
3.60	4098
3.70	4086
3.80	4079
3.90	4066
4.00	4050
4.10	4040
4.20	4033
4.30	4023
4.40	4017
4.50	4010
4.60	3995
4.70	3988
4.80	3982
4.90	3981
5.00	3977
5.10	3973
5.20	3976
5.30	3980
5.40	3985
5.50	3986
5.60	3981
5.70	3978
5.80	3971
5.90	3964
6.00	3955
6.10	3947
6.20	3940
6.30	3928
6.40	3918
6.50	3907
6.60	3896
6.70	3880
6.80	3865
6.90	3860
7.00	3854
7.10	3852
7.20	3852

7.30	3848
7.40	3841
7.50	3830
7.60	3821
7.70	3814
7.80	3803
7.90	3784
8.00	3765
8.10	3748
8.20	3737
8.30	3730
8.40	3725
8.50	3719
8.60	3715
8.70	3709
8.80	3705
8.90	3706
9.00	3703
9.10	3700
9.20	3698
9.30	3694
9.40	3692
9.50	3689
9.60	3686
9.70	3685
9.80	3683
9.90	3683
10.00	3682
10.10	3679
10.20	3682
10.30	3686
10.40	3686
10.50	3675
10.60	3664
10.70	3646
10.80	3630
10.90	3625
11.00	3623
11.10	3624
11.20	3626
11.30	3633
11.40	3630
11.50	3618
11.60	3615
11.70	3613

11.80	3612
11.90	3611
12.00	3609
12.10	3605
12.20	3606
12.30	3603
12.40	3599
12.50	3597
12.60	3595
12.70	3591
12.80	3589
12.90	3588
13.00	3584
13.10	3581
13.20	3581
13.30	3580
13.40	3576
13.50	3573
13.60	3571
13.70	3569
13.80	3570
13.90	3567
14.00	3562
14.10	3559
14.20	3555
14.30	3553
14.40	3553
14.50	3551
14.60	3551
14.70	3551
14.80	3552
14.90	3550
15.00	3549
15.10	3548
15.20	3547
15.30	3541
15.40	3542
15.50	3542
15.60	3543
15.70	3536
15.80	3542
15.90	3543
16.00	3545
16.10	3547
16.20	3550

16.30	3551
16.40	3556
16.50	3558
16.60	3556
16.70	3550
16.80	3547
16.90	3547
17.00	3542
17.10	3541
17.20	3540
17.30	3539
17.40	3537
17.50	3535
17.60	3532
17.70	3526
17.80	3526
17.90	3526
18.00	3517
18.10	3516
18.20	3514
18.30	3504
18.40	3493
18.50	3482
18.60	3474
18.70	3468
18.80	3463
18.90	3460
19.00	3457
19.10	3449
19.20	3438
19.30	3437
19.40	3430
19.50	3421
19.60	3413
19.70	3410
19.80	3412
19.90	3404
20.00	3399
20.10	3391
20.20	3374
20.30	3367
20.40	3360
20.50	3350
20.60	3340
20.70	3331

20.80	3321
20.90	3316
21.00	3307
21.10	3302
21.20	3298
21.30	3288
21.40	3275
21.50	3271
21.60	3267
21.70	3268
21.80	3271
21.90	3274
22.00	3271
22.10	3265
22.20	3251
22.30	3221
22.40	3204
22.50	3197
22.60	3190
22.70	3191
22.80	3193
22.90	3190
23.00	3183
23.10	3177
23.20	3170
23.30	3153
23.40	3142
23.50	3120
23.60	3099
23.70	3089
23.80	3093
23.90	3103
24.00	3102
24.10	3090
24.20	3087
24.30	3073
24.40	3058
24.50	3039
24.60	3025
24.70	3020
24.80	3016
24.90	3007
25.00	3000
25.10	2996
25.20	2990

25.30	2980
25.40	2973
25.50	2961
25.60	2957
25.70	2956
25.80	2955
25.90	2956
26.00	2952
26.10	2948
26.20	2936
26.30	2923
26.40	2923
26.50	2928
26.60	2925
26.70	2915
26.80	2912
26.90	2906
27.00	2896
27.10	2885
27.20	2879
27.30	2868
27.40	2856
27.50	2857
27.60	2847
27.70	2845
27.80	2848
27.90	2846
28.00	2842
28.10	2844
28.20	2843
28.30	2853
28.40	2873
28.50	2874
28.60	2864
28.70	2845
28.80	2817
28.90	2795
29.00	2786
29.10	2776
29.20	2781
29.30	2776
29.40	2760
29.50	2749
29.60	2744
29.70	2741

29.80	2740
29.90	2738
30.00	2740
30.10	2746
30.20	2748
30.209	2747

A continuación, se muestran los resultados del perfil del terreno sin la altura de las torres:

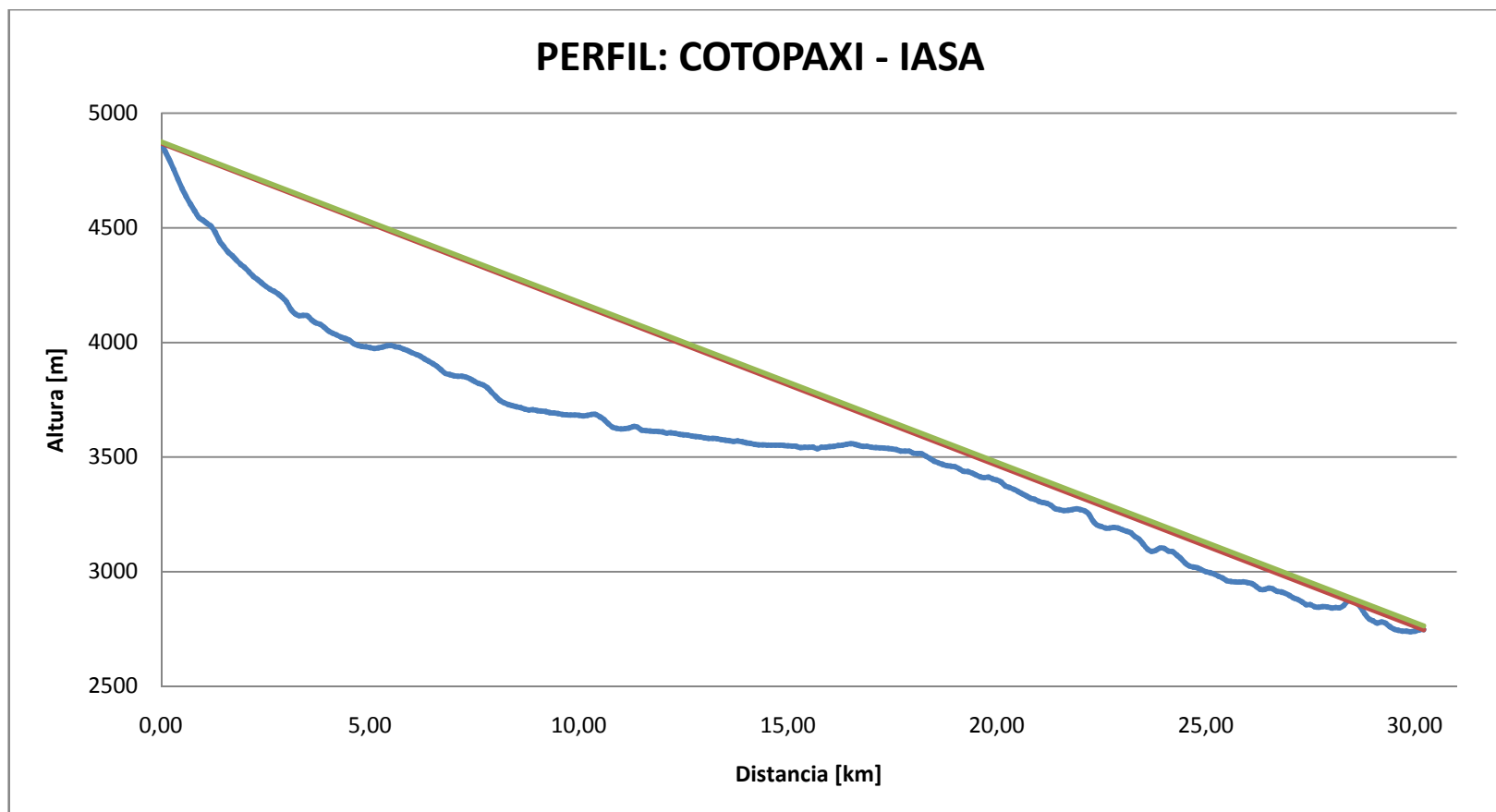


Figura. 4.66. Perfil de Enlace Cotopaxi – IASA

En la figura anterior la línea de color roja muestra el trayecto directo entre el transmisor y el receptor. Mientras que la línea de color verde incluye la altura de las torres de las antenas, por lo que se puede observar que existe obstrucción en la línea de vista para dicho enlace.

En la Tabla. 4.35 se indica la posición, distancia y altura de las estaciones y del obstáculo, estos datos fueron obtenidos de la herramienta Sirenet.

Tabla. 4.35. Características del Perfil

	DISTANCIA [km]	ALTURA [m]
Transmisor	0.00	4869
Obstáculo	28.50	2874
Receptor	30.209	2747

- **Resultado de Cálculos**

Los resultados del cálculo del desempeño del radio enlace basado en el Modelo de Mojoli se muestran en la Tabla. 4.36:

Tabla. 4.36. Resultado de Cálculos del Enlace Cotopaxi 1 – IASA 2

PARÁMETRO	RESULTADO	
Altura de la Torre de Transmisión	5	[m]
Altura de la Torre de Recepción	17	[m]
Margen Sobre Obstáculo (c)	9.368	[m]
Radio de la Primera Zona De Fresnel (F_1)	14.204	[m]
Porcentaje de Liberación de la Primera Zona de Fresnel	65.955	[%]
$c > 60\% \cdot F_1$	Si	
Disposición geométrica del obstáculo (v)	$-659.553 \cdot 10^{-3}$	
Función de Bessel ($J(v)$)	$813.169 \cdot 10^{-3}$	[dB]
Atenuación por Dispersión (A_d)	$813.169 \cdot 10^{-3}$	[dB]
Pérdidas Debido al Espacio Libre (A_{Le})	129.707	[dB]
Pérdidas por Líneas de Transmisión (L_{Tx})	1.625	[dB]
Margen de Desvanecimiento (M)	38.876	[dB]
Desvanecimiento Plano (P_{dp})	$6.076 \cdot 10^{-6}$	[%]
Desvanecimiento Selectivo (P_{ds})	$3.765 \cdot 10^{-4}$	[%]
Desvanecimiento Total (P_T) Para $\alpha=2$	$382.567 \cdot 10^{-6}$	[%]
Disponibilidad (D) Para $\alpha=2$	99.9996174	[%]
Tiempo Fuera de Servicio (t_{fs}) Para $\alpha=2$	00h01'58"	
Desvanecimiento Total (P_T) Para $\alpha=1.5$	$3.994 \cdot 10^{-4}$	[%]
Disponibilidad (D) Para $\alpha=1.5$	99.9996006	[%]
Tiempo Fuera de Servicio (t_{fs}) Para $\alpha=1.5$	00h02'04"	
Variación de Alturas (ΔH)	2.110	[m]
Ángulo de Elevación (α)	4.008	[°]
Ángulo Azimut IASA (Az_{IASA})	174.922	[°]
Ángulo Azimut Cotopaxi (Az_{COTO})	354.922	[°]

- **ENLACE IASA - BLOQUE D**

A partir de un plano con detalles topográficos se marcaron los puntos extremos del radioenlace, en este caso corresponden al Refugio Cotopaxi, IASA y ESPE (Bloque D). Para este caso se ha establecido una repetidora en las

instalaciones del IASA, por lo que el objetivo de esta sección es realizar la segunda parte de dicho enlace, es decir, estudiar la viabilidad de la red de transporte IASA – ESPE (Bloque D).

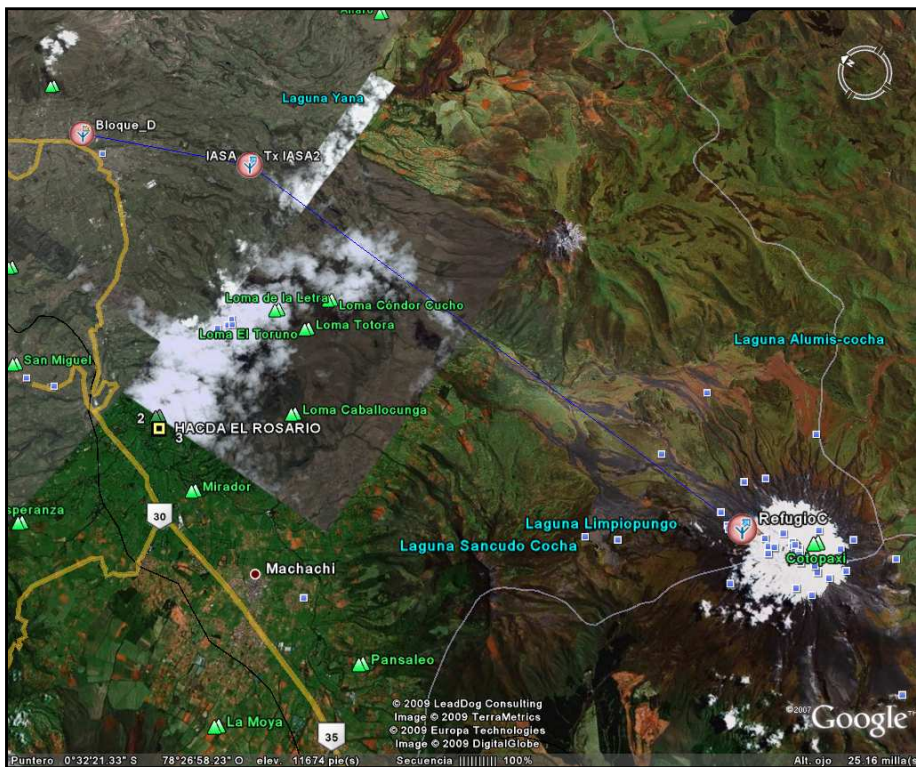


Figura. 4.67. Enlace IASA – Bloque D

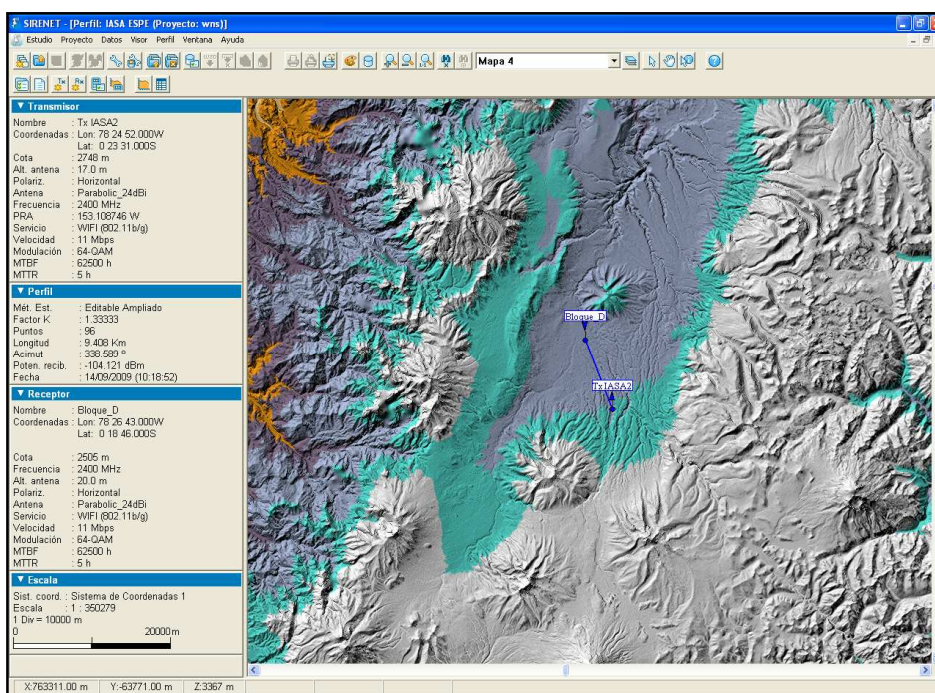


Figura. 4.68. Enlace IASA – ESPE (Bloque D) en el Software SIRENET

Las Figuras. 4.67 y 4.68 muestran el enlace IASA y ESPE (Bloque D). La primera corresponde a una presentación de 3D de *Google Earth*, ya que gracias al software Sirenet, los objetos y elementos radioeléctricos del estudio se pueden exportar al conocido sistema de información geográfica *Google Earth*, permitiendo explorar de una manera sencilla los datos espaciales georeferenciados. Mientras que la Figura. 4.68 es una captura del enlace mencionado en cartografía digital de la herramienta Sirenet.

A continuación, se muestran los resultados basados en el Software Sirenet utilizando tres puntos de coordenadas diferentes para la estación base ubicada en IASA.

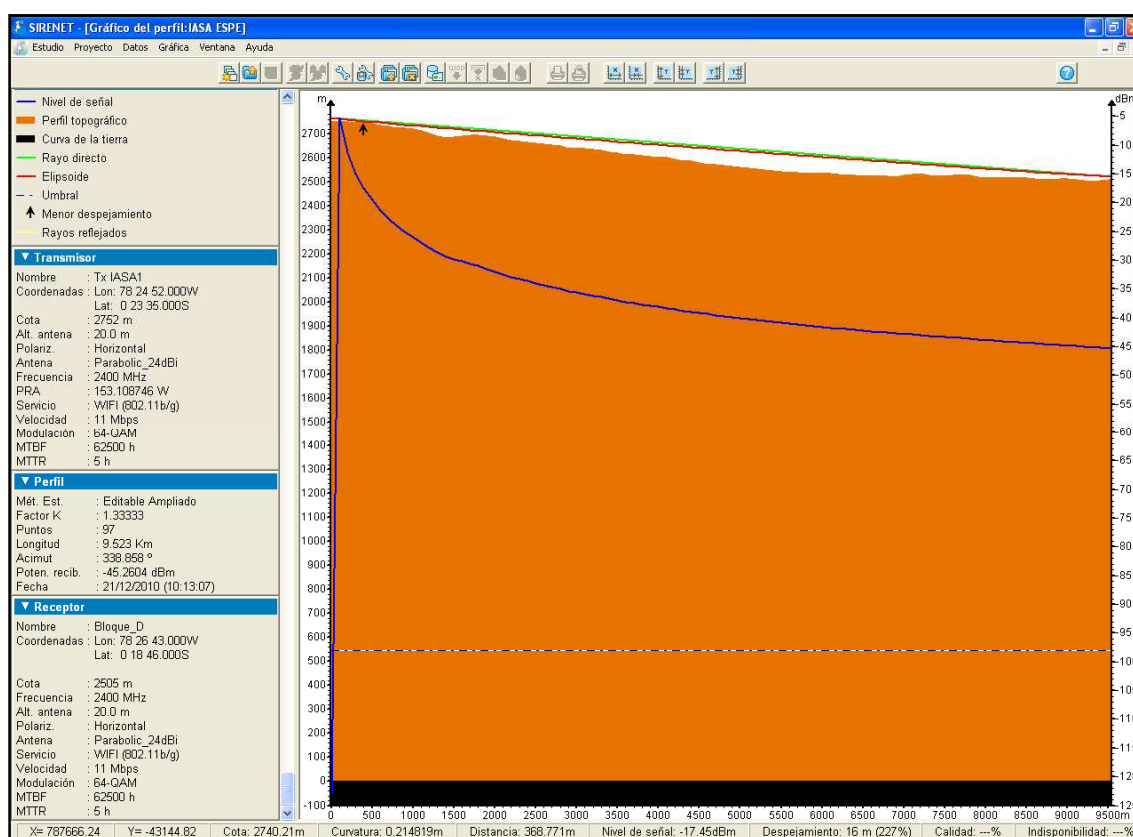


Figura. 4.69. Perfil IASA 1 – Bloque D, con una Altura de Tx de 20 [m]

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de 16 m (227%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 368.771 [m] de la estación repetidora. Por lo tanto, dichas coordenadas presentan LOS entre la

repetidora y la estación base, y garantizan un 60% de libertad en la primera zona de Fresnel.

- **IASA 2 – Bloque D**

La Figura. 4.70 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

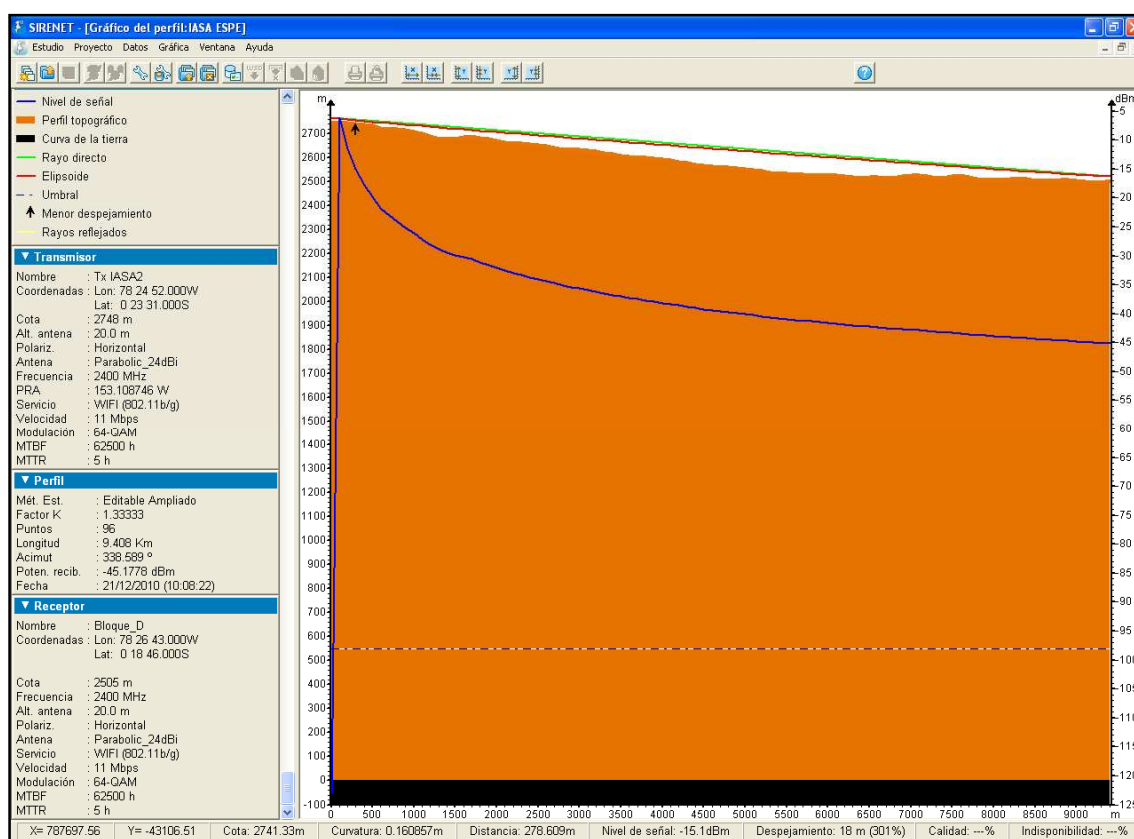


Figura. 4.70. Perfil IASA 2 – Bloque D, con una Altura de Tx de 20 [m]

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de 18 m (301%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 278.609 [m] de la estación repetidora. Por lo tanto, dichas coordenadas presentan LOS entre la repetidora y la estación base, y garantizan un 60% de libertad en la primera zona de Fresnel.

• IASA 3 – Bloque D

La Figura. 4.71 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

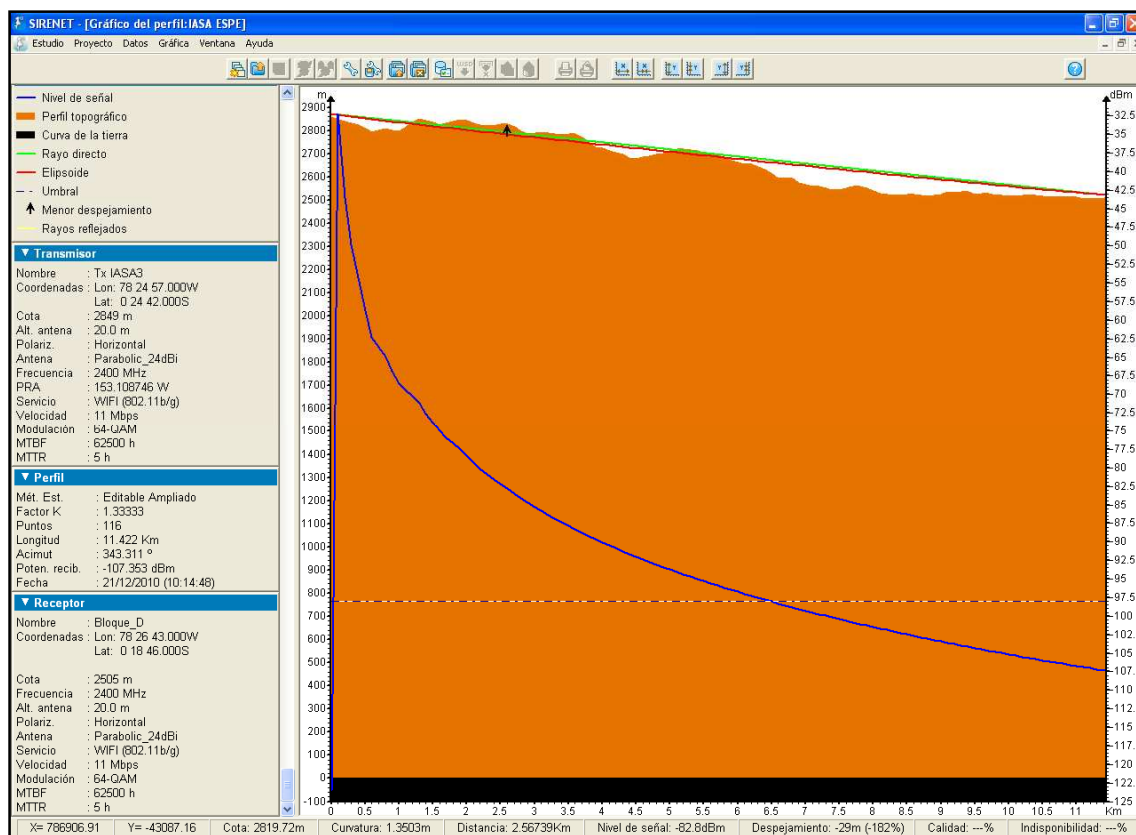


Figura. 4.71. Perfil IASA 3 – Bloque D, con una Altura de Tx de 20 [m]

Como se puede observar en la figura anterior, el análisis del perfil del terreno presenta un despejamiento de -29 m (-182 %) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 2.567 [km] de la estación repetidora. Por lo tanto, dichas posiciones geográficas de las estaciones quedan descartadas, ya que el obstáculo que se encuentra entre ellas no permite garantizar el 60% de libertad en la primera zona de Fresnel y se requeriría un valor excesivo para la altura de las torres de las antenas.

Análisis del Vano

La ventana de análisis del vano que se indican en la Figura. 4.72, contiene los parámetros específicos del estudio.

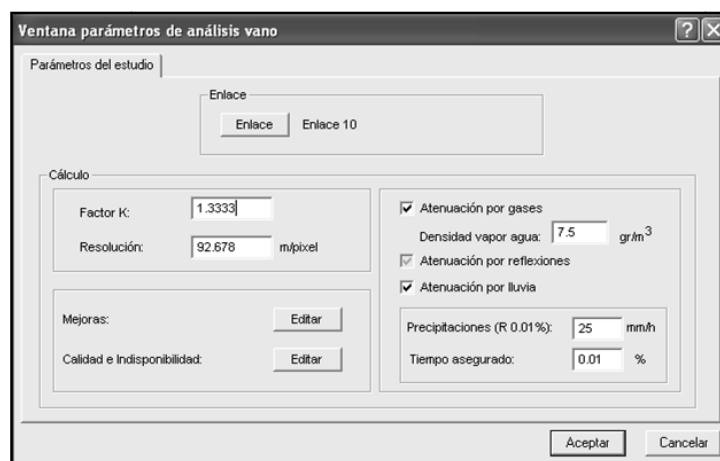


Figura. 4.72. Parámetros de Análisis del Vano

Tras realizar los cálculos, el programa pasa a una nueva pantalla similar a la del perfil como se muestra en la Figura. 4.73, donde se indica que el enlace presenta una potencia recibida de -43.037 [dBm] y una atenuación de 119.583 [dB].

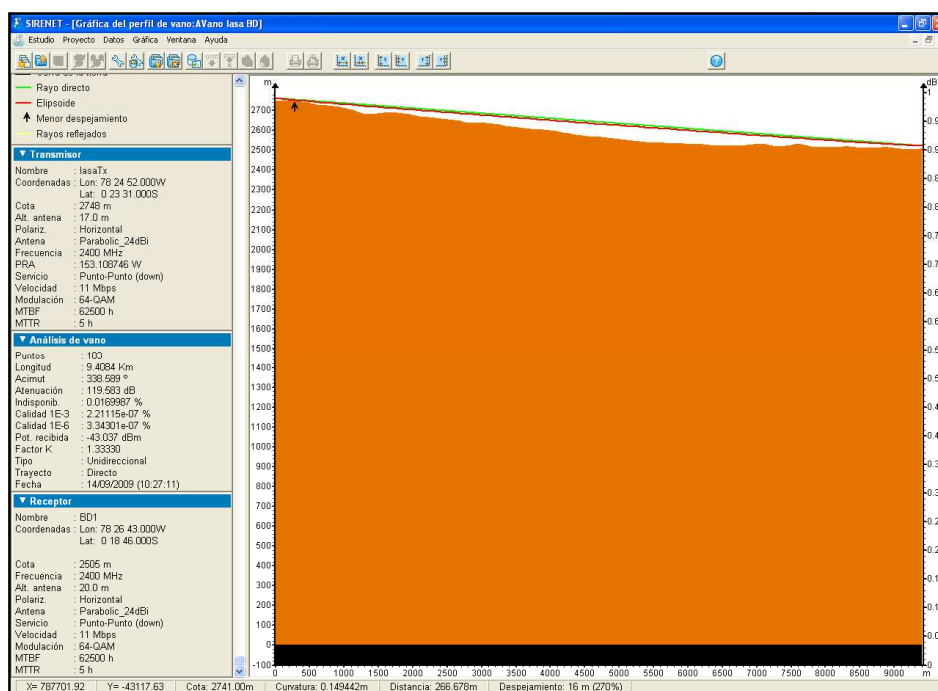


Figura. 4.73. Análisis del Vano IASA – Bloque D

Los resultados del estudio incluyen un desglose de los distintos tipos de pérdidas (espacio libre, difracción, reflexiones, atenuación por lluvia, absorción por gases) y hace una estimación de las estadísticas de recepción en términos de calidad del enlace e indisponibilidad. Las Figuras. 4.74, 4.75, 4.76, 4.77 y 4.78 muestran los resultados obtenidos de la herramienta Sirenet:



Figura. 4.74. Pérdidas del Enlace

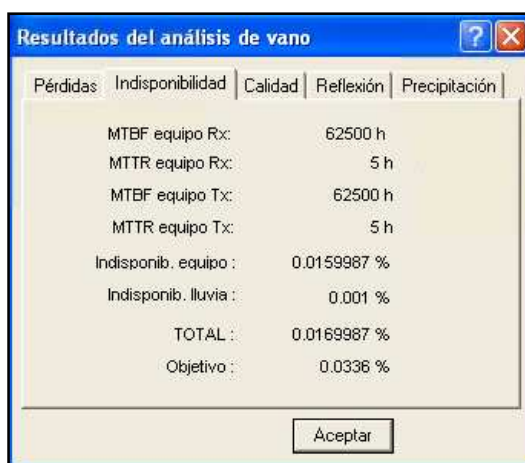


Figura. 4.75. Indisponibilidad del Enlace

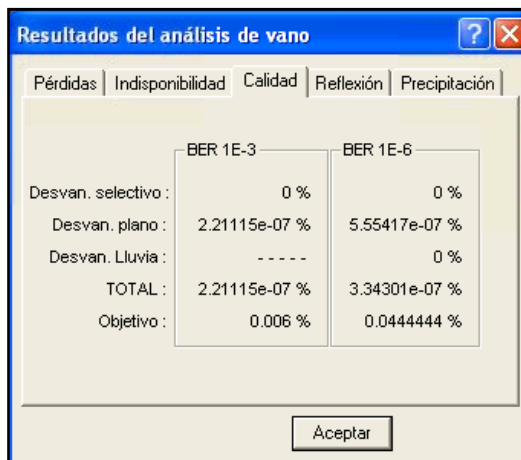


Figura. 4.76. Calidad del Enlace

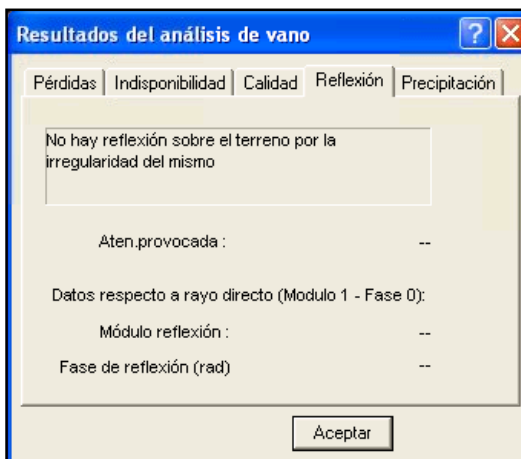


Figura. 4.77. Reflexión del Enlace

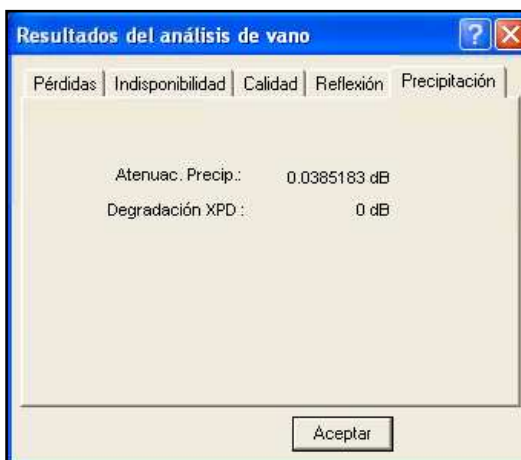
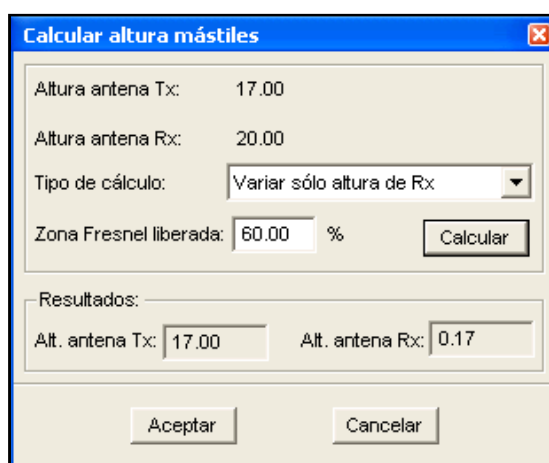


Figura. 4.78. Precipitación del Enlace

- **Altura de las Antenas**

El estudio de Análisis de Vano en Sirenet permite el cálculo automático de la altura del mástil del transmisor y/o del receptor. Para este caso se ha variado sólo altura del receptor y se ha establecido el 60% y el 100% de libertad de la Zona de Fresnel.

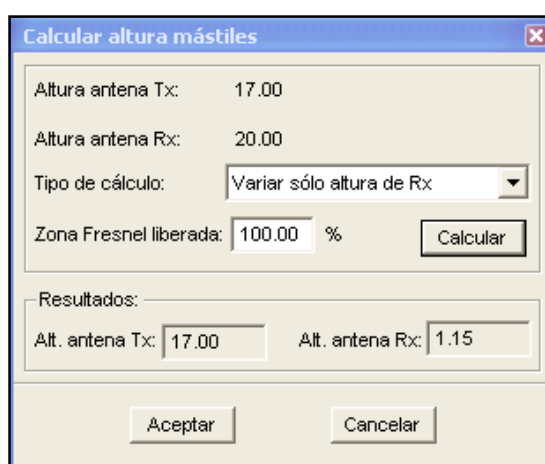
Las Figuras. 4.79 y 4.80 muestran los resultados:



The screenshot shows a dialog box titled "Calcular altura mástiles". It contains the following fields and controls:

- Altura antena Tx: 17.00
- Altura antena Rx: 20.00
- Tipo de cálculo: Variar sólo altura de Rx (dropdown menu)
- Zona Fresnel liberada: 60.00 %
- Calcular button
- Resultados section:
 - Alt. antena Tx: 17.00
 - Alt. antena Rx: 0.17
- Aceptar button
- Cancelar button

Figura. 4.79. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel



The screenshot shows a dialog box titled "Calcular altura mástiles". It contains the following fields and controls:

- Altura antena Tx: 17.00
- Altura antena Rx: 20.00
- Tipo de cálculo: Variar sólo altura de Rx (dropdown menu)
- Zona Fresnel liberada: 100.00 %
- Calcular button
- Resultados section:
 - Alt. antena Tx: 17.00
 - Alt. antena Rx: 1.15
- Aceptar button
- Cancelar button

Figura. 4.80. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel

- **Análisis del Perfil**

Gracias a las herramientas del software Sirenet 3.0 se pudo obtener las alturas del perfil del trayecto corregidas para un valor de $4/3$ como lo indica la siguiente tabla:

Tabla. 4.37. Perfil IASA 2 – Bloque D

D (Km)	Alt (m)				
0.00	2747	3.40	2613	6.90	2521
0.10	2743	3.50	2608	7.00	2527
0.20	2744	3.60	2605	7.10	2527
0.30	2741	3.70	2601	7.20	2521
0.40	2737	3.80	2599	7.30	2515
0.50	2733	3.90	2596	7.40	2516
0.60	2723	4.00	2593	7.50	2521
0.70	2720	4.10	2589	7.60	2527
0.80	2718	4.20	2583	7.70	2520
0.90	2715	4.30	2577	7.80	2513
1.00	2709	4.40	2571	7.90	2509
1.10	2699	4.50	2566	8.00	2510
1.20	2687	4.60	2564	8.10	2509
1.30	2676	4.70	2560	8.20	2511
1.40	2677	4.80	2559	8.30	2515
1.50	2679	4.90	2555	8.40	2511
1.60	2684	5.00	2550	8.50	2505
1.70	2689	5.10	2546	8.60	2504
1.80	2682	5.20	2542	8.70	2504
1.90	2677	5.30	2538	8.80	2509
2.00	2671	5.40	2535	8.90	2508
2.10	2664	5.50	2532	9.00	2504
2.20	2661	5.60	2531	9.10	2500
2.30	2658	5.70	2529	9.20	2498
2.40	2654	5.80	2527	9.30	2499
2.50	2651	5.90	2527	9.40	2503
2.60	2646	6.00	2526	9.408	2503
2.70	2641	6.10	2524		
2.80	2632	6.20	2522		
2.90	2631	6.30	2519		
3.00	2632	6.40	2516		
3.10	2629	6.50	2517		
3.20	2624	6.60	2517		
3.30	2619	6.70	2516		
		6.80	2516		

A continuación, se muestran los resultados del perfil del terreno sin la altura de las torres:

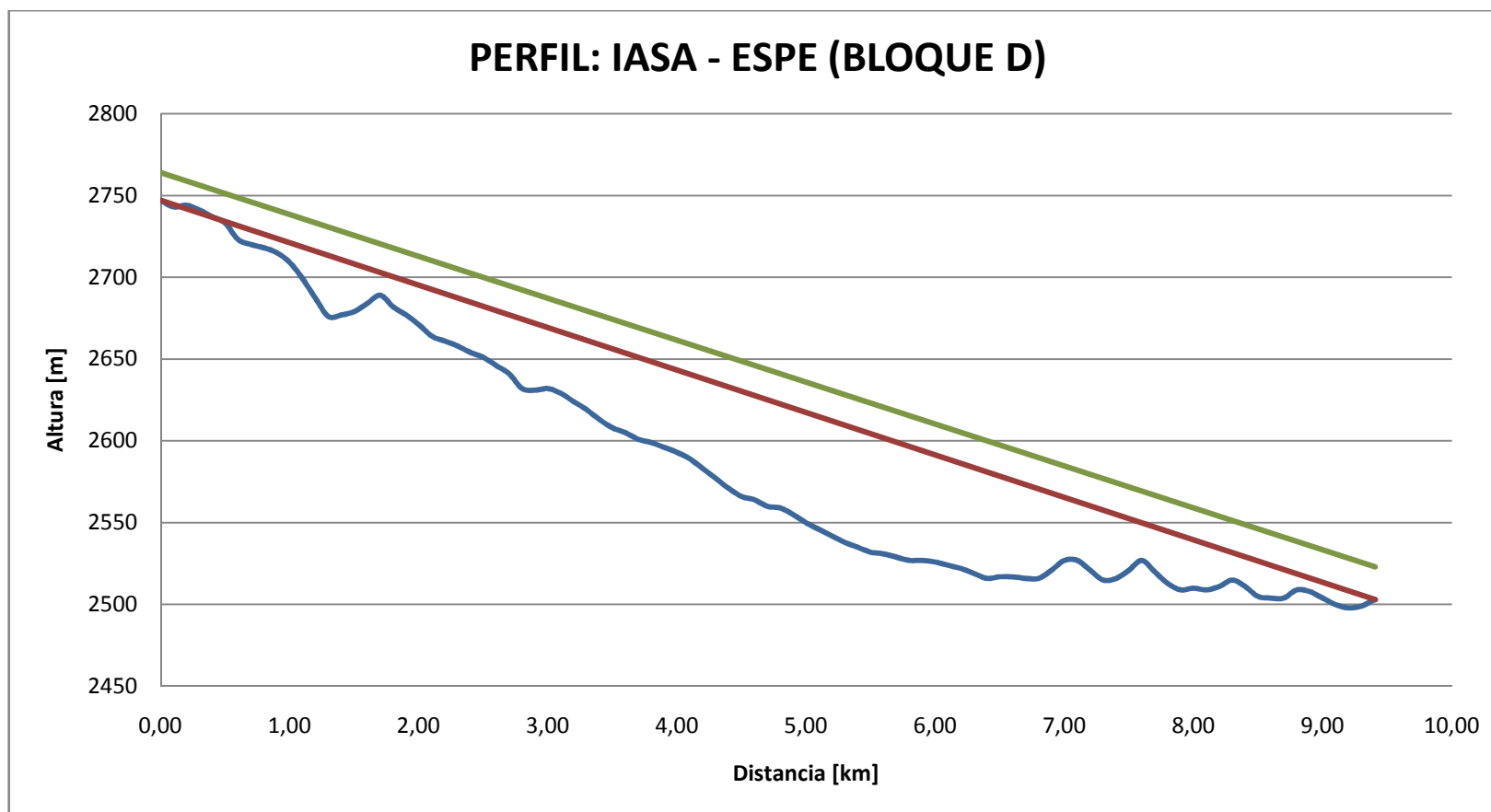


Figura. 4.81. Perfil del Enlace IASA – ESPE (Bloque D)

En la figura anterior la línea de color roja muestra el trayecto directo entre el transmisor y el receptor. Mientras que la línea de color verde incluye la altura de las torres de las antenas, por lo que se puede observar que no existe obstrucción en la línea de vista para dicho enlace al contar con las alturas de las antenas.

En la Tabla. 4.38 se indica la posición, distancia y altura de las estaciones y del obstáculo, estos datos fueron obtenidos de la herramienta Sirenet.

Tabla. 4.38. Características del Perfil

	ALTURA [m]	DISTANCIA [km]
Transmisor	0.00	2747
Obstáculo	0.20	2744
Receptor	9.408	2503

- **Resultado de Cálculos**

Los resultados del cálculo del desempeño del radio enlace basado en el Modelo de Mojoli se muestran en la Tabla. 4.39:

Tabla. 4.39. Resultado de Cálculos del Enlace IASA 2 – ESPE (Bloque D)

PARÁMETRO	RESULTADO	
Altura de la Torre de Transmisión	17	[m]
Altura de la Torre de Recepción	20	[m]
Margen Sobre Obstáculo (c)	14.877	[m]
Radio de la Primera Zona De Fresnel (F_1)	4.949	[m]
Porcentaje de Liberación de la Primera Zona de Fresnel	300.596	[%]
$c > 60\% \cdot F_1$	Si	
Disposición geométrica del obstáculo (v)	-3.006	
Función de Bessel ($J(v)$)	-9.181	[dB]
Atenuación por Dispersión (A_d)	-9.181	[dB]
Pérdidas Debido al Espacio Libre (A_{Le})	119.574	[dB]
Pérdidas por Líneas de Transmisión (L_{Tx})	1.625	[dB]
Margen de Desvanecimiento (M)	59.003	[dB]
Desvanecimiento Plano (P_{dp})	$1.864 \cdot 10^{-8}$	[%]
Desvanecimiento Selectivo (P_{ds})	$7.644 \cdot 10^{-6}$	[%]
Desvanecimiento Total (P_T) Para $\alpha = 2$	$7.662 \cdot 10^{-6}$	[%]
Disponibilidad (D) Para $\alpha = 2$	99.9999923	[%]
Tiempo Fuera de Servicio (t_{fs}) Para $\alpha = 2$	00h00'02"	
Desvanecimiento Total (P_T) Para $\alpha = 1.5$	$7.756 \cdot 10^{-6}$	[%]
Disponibilidad (D) Para $\alpha = 1.5$	99.9999922	[%]
Tiempo Fuera de Servicio (t_{fs}) Para $\alpha = 1.5$	00h00'02"	
Variación de Alturas (ΔH)	0.241	[m]
Ángulo de Elevación (α)	1.468	[°]
Ángulo Azimut Espe (AZ_{ESPE})	158.720	[°]
Ángulo Azimut IASA (AZ_{IASA})	338.720	[°]

- **ENLACE IASA – ESPE (EDIFICIO ADMINISTRATIVO)**

A partir de un plano con detalles topográficos se marcaron los puntos extremos del radioenlace, en este caso corresponden al Refugio Cotopaxi, IASA y ESPE (Edificio Administrativo). Para este caso se ha establecido una repetidora

en las instalaciones del IASA, por lo que el objetivo de esta sección es realizar la segunda parte de dicho enlace, es decir, estudiar la viabilidad de la red de transporte IASA – ESPE (Edificio Administrativo).

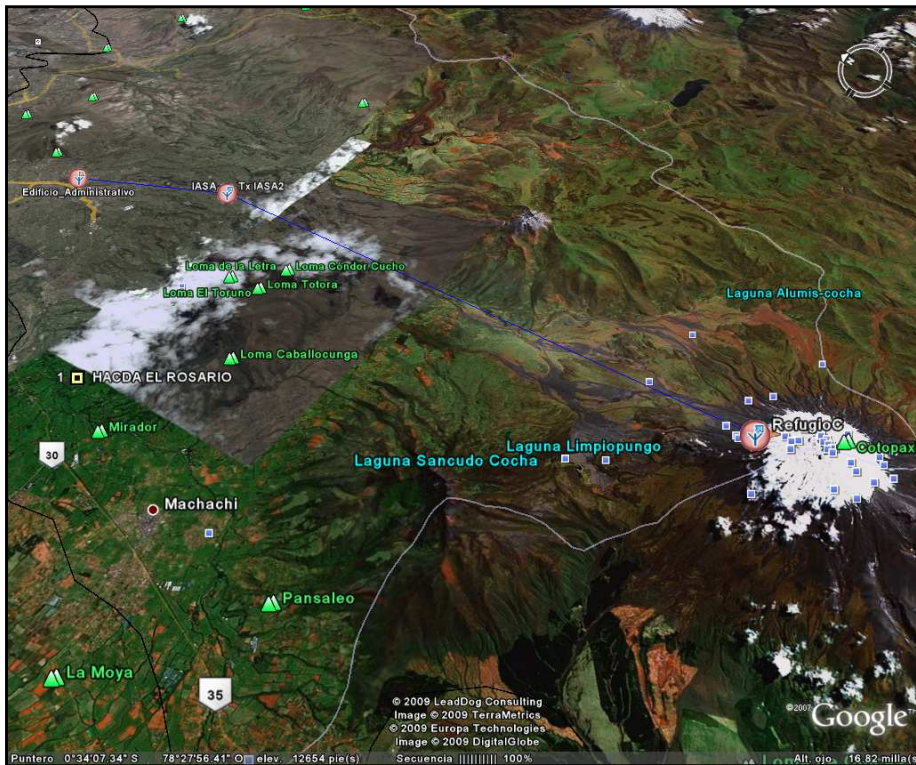


Figura. 4.82. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo)

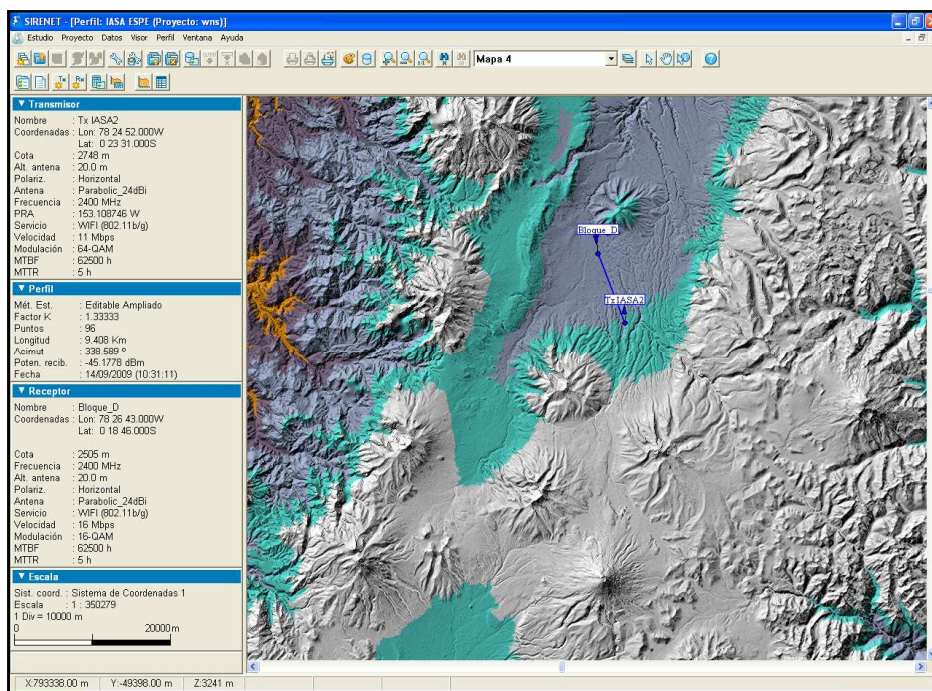


Figura. 4.83. Enlace Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo) en el Software Sirenet

Las Figuras. 4.82 y 4.83 muestran el enlace IASA y ESPE (Edificio Administrativo). La primera corresponde a una presentación de 3D de *Google Earth*, ya que gracias al software Sirenet, los objetos y elementos radioeléctricos del estudio se pueden exportar al conocido sistema de información geográfica *Google Earth*, permitiendo explorar de una manera sencilla los datos espaciales georeferenciados. Mientras que la Figura. 4.83 es una captura del enlace mencionado en cartografía digital de la herramienta Sirenet.

A continuación, se muestran los resultados basados en el Software Sirenet utilizando tres puntos de coordenadas diferentes para la estación repetidora ubicada en el IASA.

- **IASA 1 – Edificio Administrativo**

La Figura. 4.84 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

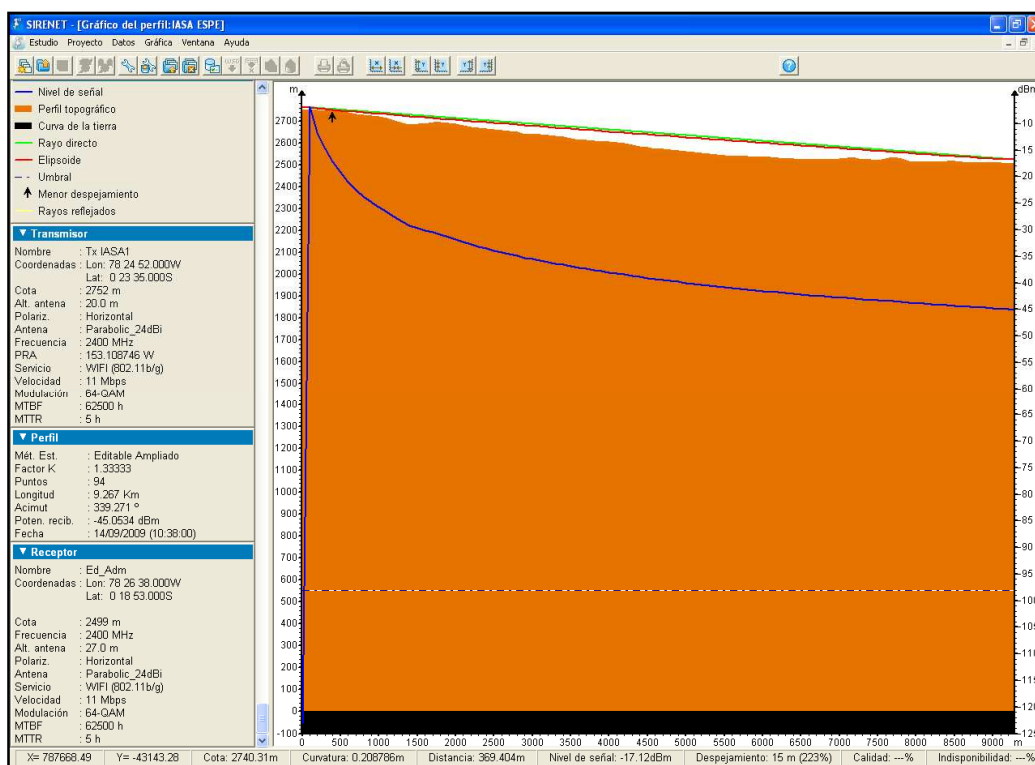


Figura. 4.84. Perfil IASA 1 – Edificio Administrativo, con una Altura de Tx de 20 [m]

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de 15 m (223%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 369.404 [m] de la estación repetidora. Por lo tanto, dichas posiciones geográficas presentan LOS entre la repetidora y la estación base y garantizan un 60% de libertad en la primera zona de Fresnel.

- **IASA 2 – Edificio Administrativo**

La Figura. 4.85 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

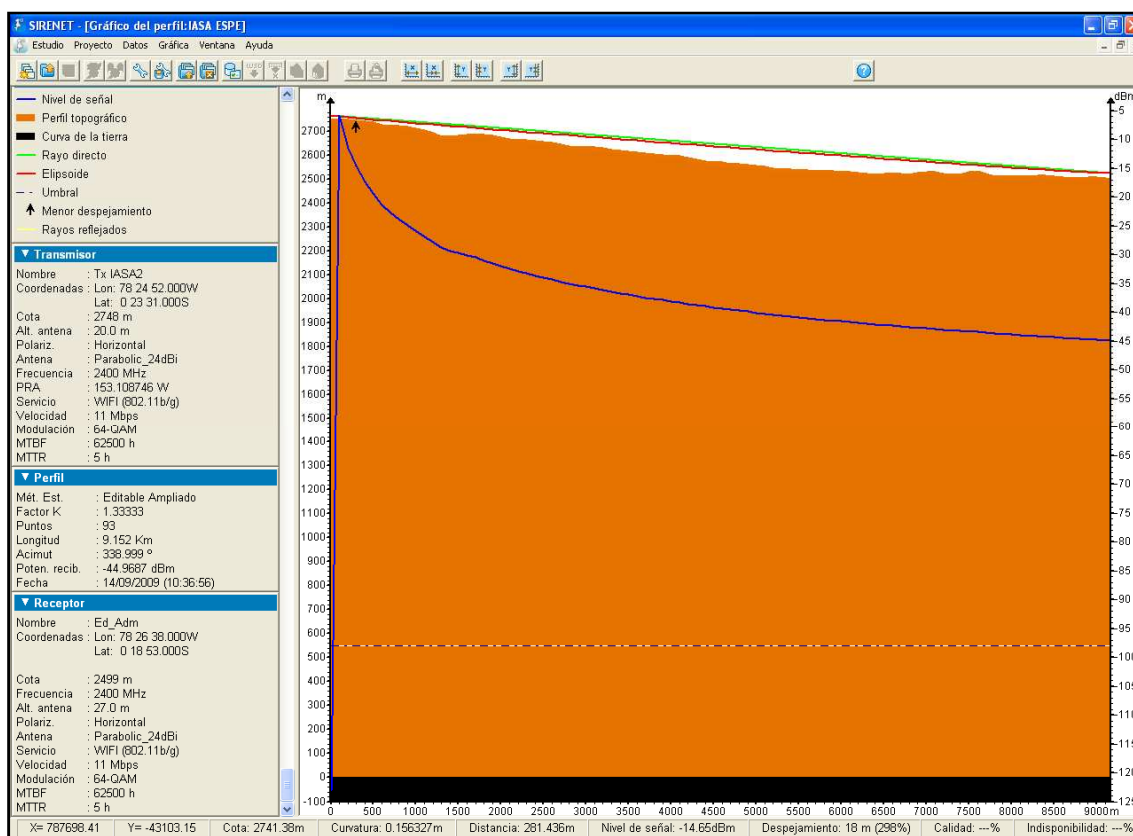


Figura. 4.85. Perfil IASA 2 – Edificio Administrativo, con una Altura de Tx de 20 [m]

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de 18 m (298%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 281.436 [m] de

la estación repetidora. Por lo tanto, dichas posiciones geográficas presentan LOS entre la repetidora y la estación base y garantizan un 60% de libertad en la primera zona de Fresnel.

- **IASA 3 – Edificio Administrativo**

La Figura. 4.86 muestra el corte del terreno entre las estaciones, cuyas coordenadas en el eje izquierdo corresponden a la altura del terreno y en el de la derecha al valor de la potencia. Adicionalmente, en la parte izquierda se ofrece información tanto de la gráfica como del perfil y sus elementos.

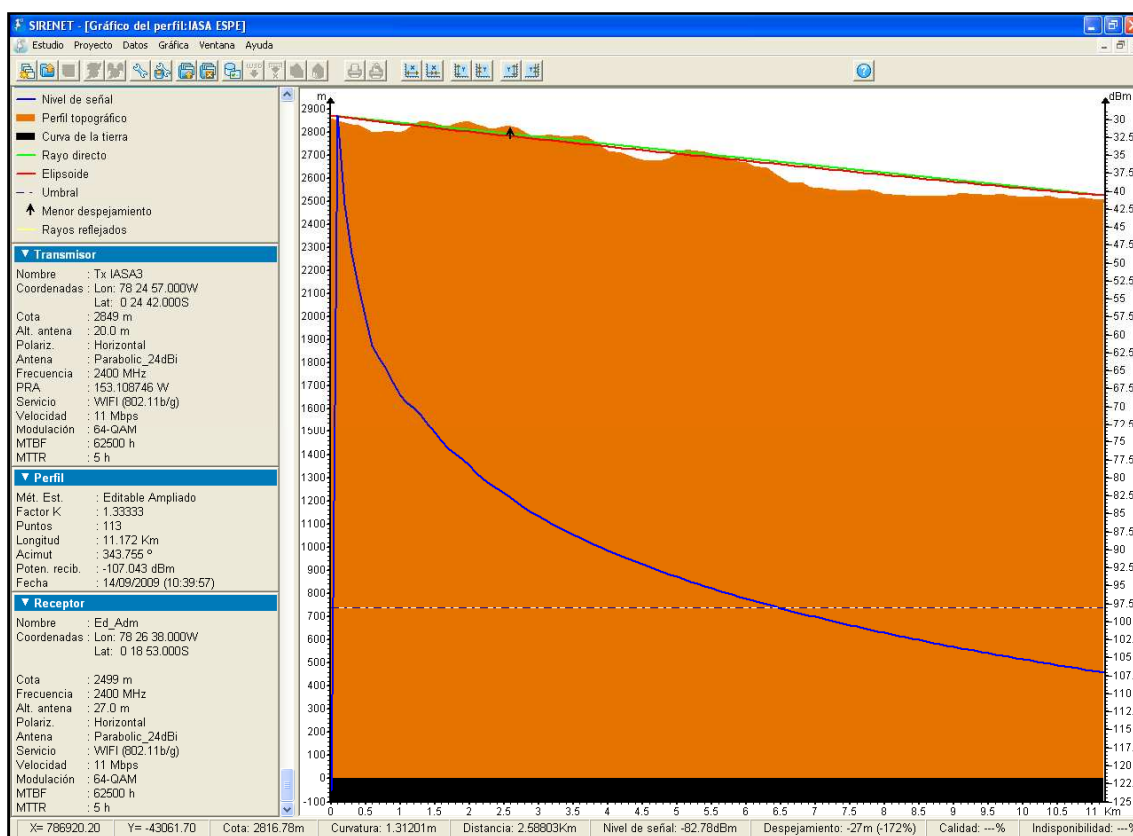


Figura. 4.86. Perfil IASA 3 – Edificio Administrativo, con una Altura de Tx de 20 [m]

Como se puede observar en la figura anterior se realizó un análisis del perfil del terreno que presenta un nivel de despejamiento de -27 m (-172%) con respecto al rayo directo en el obstáculo más prominente que se ubica a los 2.58803 [km] de la estación repetidora. Por lo tanto, dichas posiciones geográficas de las estaciones quedan descartadas, ya que el obstáculo que se encuentra

entre ellas no permite garantizar el 60% de libertad en la primera zona de Fresnel y se requeriría un valor excesivo para la altura de las torres de las antenas.

Análisis del Vano

La ventana de análisis del vano que se indican en la Figura. 4.87, contiene los parámetros específicos del estudio.

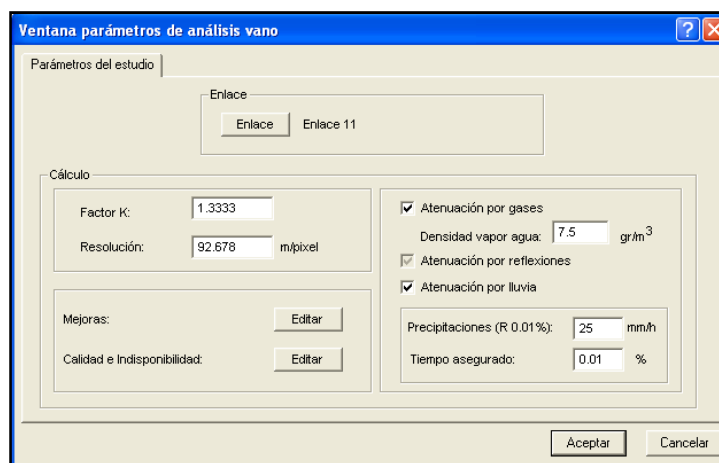


Figura. 4.87. Parámetros de Análisis del Vano

Tras realizar los cálculos, el programa pasa a una nueva pantalla similar a la del perfil como se muestra en la Figura. 4.88, donde se indica que el enlace presenta una potencia recibida de -42.808 [dBm] y una atenuación de 119.341 [dB].

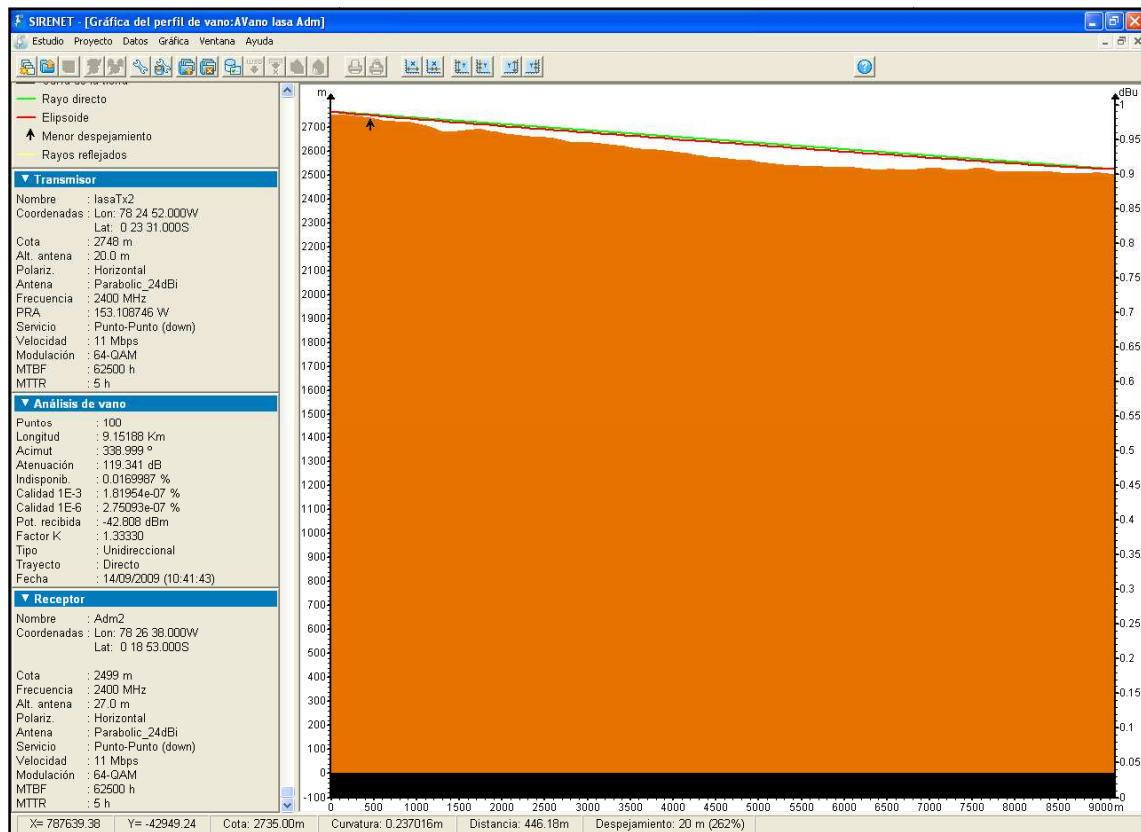


Figura. 4.88. Análisis del Vano IASA – Edificio Administrativo

Los resultados del estudio incluyen un desglose de los distintos tipos de pérdidas (espacio libre, difracción, reflexiones, atenuación por lluvia, absorción por gases) y hace una estimación de las estadísticas de recepción en términos de calidad del enlace e indisponibilidad. Las Figuras. 4.89, 4.90, 4.91, 4.92 y 4.93 muestran los resultados obtenidos de la herramienta Sirenet:



Figura. 4.89. Pérdidas del Enlace

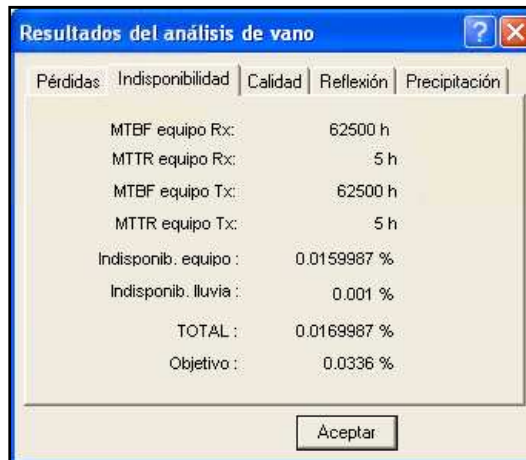


Figura. 4.90. Indisponibilidad del Enlace

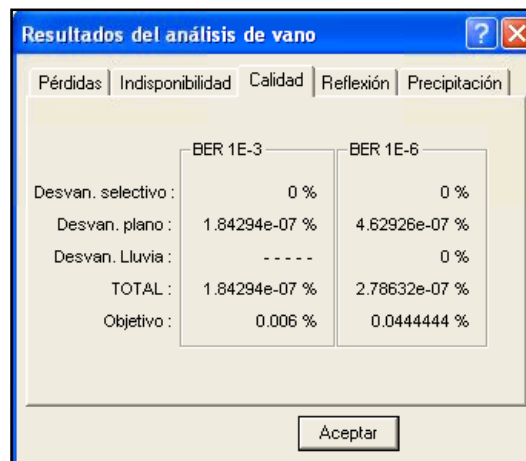


Figura. 4.91. Calidad del Enlace

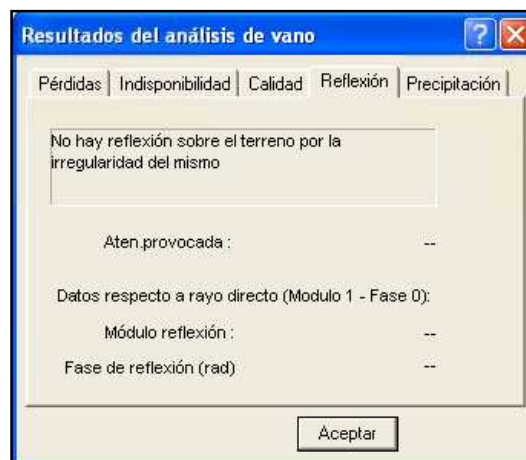


Figura. 4.92. Reflexión del Enlace

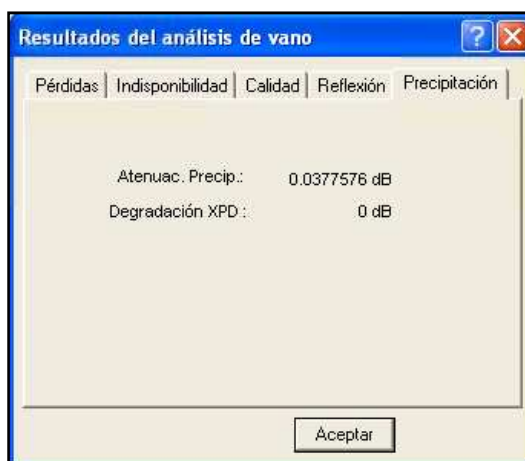


Figura. 4.93. Precipitación del Enlace

- **Altura de las Antenas**

El estudio de Análisis de Vano en Sirenet permite el cálculo automático de la altura del mástil del transmisor y/o del receptor. Para este caso se ha variado sólo altura del receptor y se ha establecido el 60% y el 100% de libertad de la Zona de Fresnel.

Las Figuras. 4.94 y 4.95 muestran los resultados:

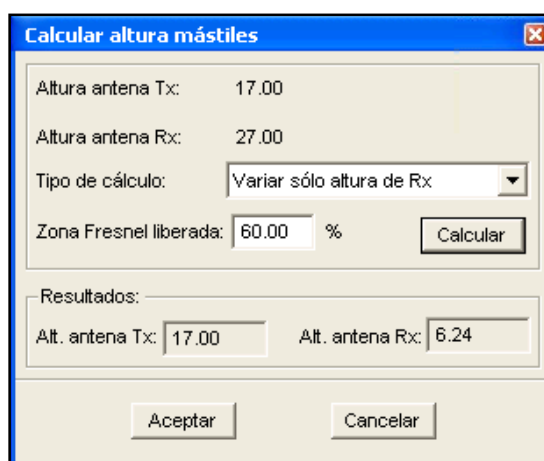


Figura. 4.94. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 60% de Libertad de la Zona de Fresnel

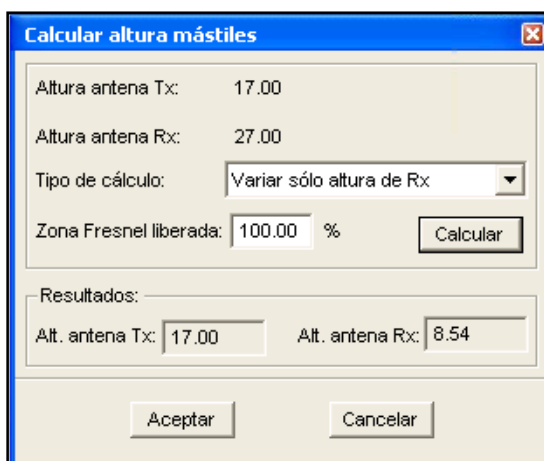


Figura. 4.95. Cálculo de la Altura de las Torres de las Antenas para 100% de Libertad de la Zona de Fresnel

- **Análisis del Perfil**

Gracias a las herramientas del software Sirenet 3.0 se pudo obtener las alturas del perfil del trayecto corregidas para un valor de $4/3$ como lo indica la siguiente tabla:

Tabla. 4.40. Perfil IASA 2 – Edificio Administrativo

D (Km)	Alt (m)
0.00	2747
0.10	2743
0.20	2744
0.30	2741
0.4	2737
0.5	2733
0.6	2723
0.7	2720
0.8	2718
0.9	2715
1.00	2709
1.10	2700
1.20	2689
1.30	2676
1.4	2675
1.5	2677
1.6	2682
1.7	2687

1.8	2682
1.9	2676
2.00	2671
2.10	2665
2.20	2661
2.30	2658
2.4	2654
2.5	2652
2.6	2647
2.7	2642
2.8	2633
2.9	2631
3.00	2631
3.10	2630
3.20	2625
3.30	2620
3.4	2616
3.5	2610
3.6	2605

3.7	2601
3.8	2599
3.9	2597
4.00	2593
4.10	2591
4.20	2585
4.30	2577
4.4	2571
4.5	2567
4.6	2565
4.7	2560
4.8	2558
4.9	2556
5.00	2551
5.10	2547
5.20	2542
5.30	2537
5.4	2535
5.5	2533

5.6	2531
5.7	2530
5.8	2528
5.9	2528
6.00	2527
6.10	2526
6.20	2522
6.30	2519
6.4	2515
6.5	2519
6.6	2518
6.7	2517
6.8	2516
6.9	2522
7.00	2525
7.10	2524
7.20	2517
7.30	2515
7.4	2516

7.5	2524
7.6	2529
7.7	2520
7.8	2508
7.9	2507
8.00	2511
8.10	2508
8.20	2507
8.30	2510
8.4	2510
8.5	2506
8.6	2502
8.7	2502
8.8	2502
8.9	2504
9.00	2503
9.10	2499
9.152	2499

A continuación, se muestran los resultados del perfil del terreno sin la altura de las torres:

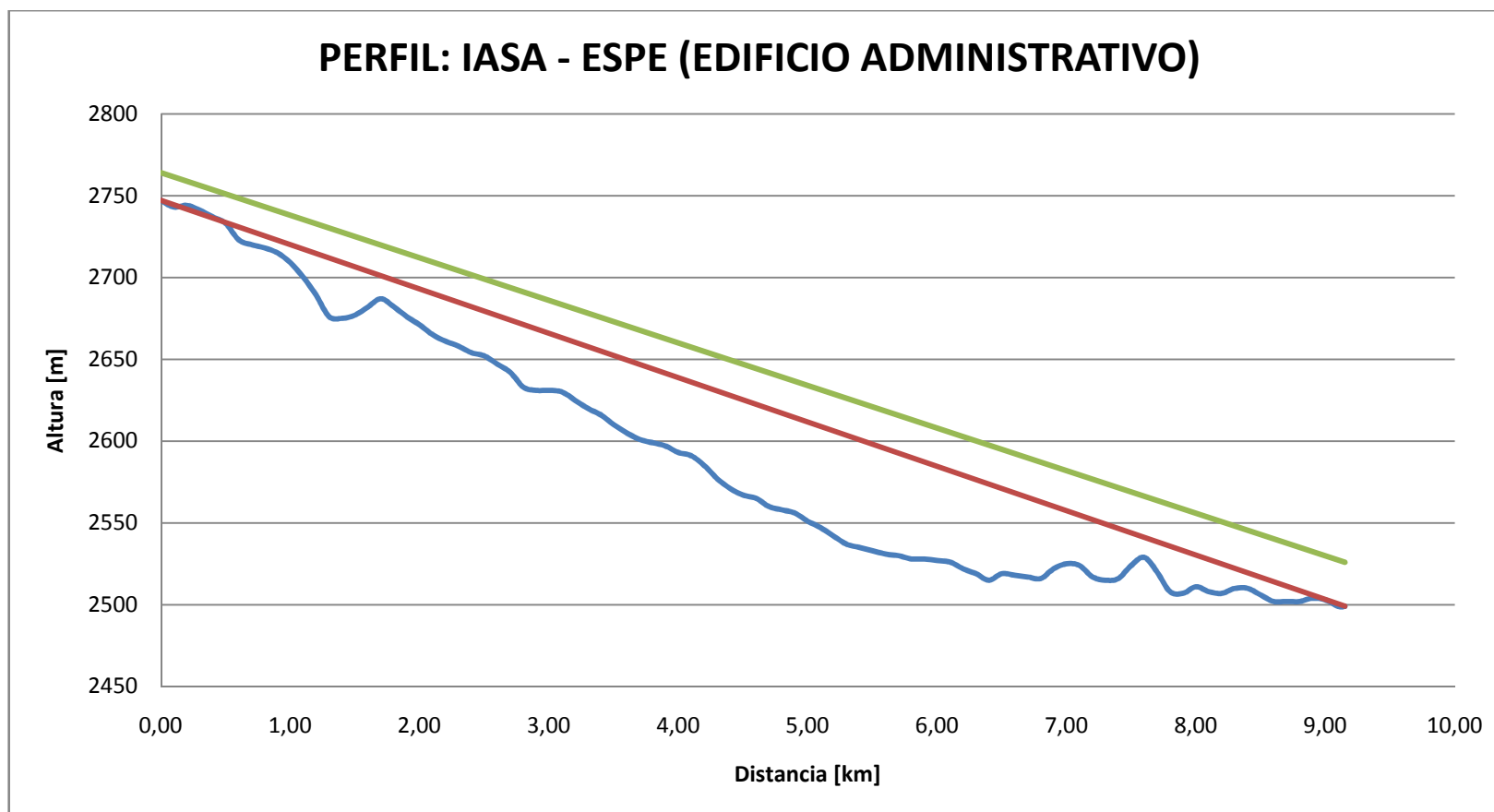


Figura. 4.96. Perfil del Enlace IASA – ESPE (Edificio Administrativo)

En la figura anterior la línea de color roja muestra el trayecto directo entre el transmisor y el receptor. Mientras que la línea de color verde incluye la altura de las torres de las antenas, por lo que se puede observar que no existe obstrucción en la línea de vista para dicho enlace al contar con las alturas de las antenas.

En la Tabla. 4.41 se indica la posición, distancia y altura de las estaciones y del obstáculo, estos datos fueron obtenidos de la herramienta Sirenet.

Tabla. 4.41. Características del Perfil

	ALTURA [m]	DISTANCIA [km]
Transmisor	0.00	2747
Obstáculo	0.20	2744
Receptor	9.152	2499

- **Resultado de Cálculos**

Los resultados del cálculo del desempeño del radio enlace basado en el Modelo de Mojoli se muestran en la Tabla. 4.42:

Tabla. 4.42. Resultado de Cálculos del Enlace IASA 2 – ESPE (Edificio Administrativo)

PARÁMETRO	RESULTADO	
Altura de la Torre de Transmisión	17	[m]
Altura de la Torre de Recepción	27	[m]
Margen Sobre Obstáculo (c)	14.799	[m]
Radio de la Primera Zona De Fresnel (F_1)	4.948	[m]
Porcentaje de Liberación de la Primera Zona de Fresnel	299.116	[%]
$c > 60\% \cdot F_1$	Si	
Disposición geométrica del obstáculo (v)	-2.991	
Función de Bessel ($J(v)$)	-9.142	[dB]
Atenuación por Dispersión (A_d)	-9.142	[dB]
Pérdidas Debido al Espacio Libre (A_{Le})	119.335	[dB]
Pérdidas por Líneas de Transmisión (L_{Tx})	1.625	[dB]
Margen de Desvanecimiento (M)	59.203	[dB]
Desvanecimiento Plano (P_{dp})	$1.641 \cdot 10^{-8}$	[%]
Desvanecimiento Selectivo (P_{ds})	$6.693 \cdot 10^{-6}$	[%]
Desvanecimiento Total (P_T) Para $\alpha = 2$	$6.710 \cdot 10^{-6}$	[%]
Disponibilidad (D) Para $\alpha = 2$	99.9999933	[%]
Tiempo Fuera de Servicio (t_{fs}) Para $\alpha = 2$	00h00'02"	
Desvanecimiento Total (P_T) Para $\alpha = 1.5$	$6.792 \cdot 10^{-6}$	[%]
Disponibilidad (D) Para $\alpha = 1.5$	99.9999932	[%]
Tiempo Fuera de Servicio (t_{fs}) Para $\alpha = 1.5$	00h00'02"	
Variación de Alturas (ΔH)	0.238	[m]
Ángulo de Elevación (α)	1.490	[°]
Ángulo Azimut ESPE (Az_{ESPE})	159.128	[°]
Ángulo Azimut IASA (Az_{IASA})	339.128	[°]

4.4.7 Análisis Adicional [64]

Debido a la importancia que tiene la validación de la estimación teórica del alcance del sistema y demás datos, se va a realizar un análisis adicional valiéndose de la aplicación informática de simulación, *Radio Mobile*, ya que

constituye una herramienta de ayuda en la planificación del enlace de transporte. Este proceso tiene como objetivo ampliar el análisis y la comparación de resultados.

Radio Mobile al igual que *Sirenet* permite predecir el rendimiento de un sistema de radio utilizando datos digitales de elevación del terreno para la extracción automática del perfil de camino entre un emisor y un receptor. Dicho software es libre y fue desarrollado por Roger Coudé VE2DBE para radio aficionados y usos humanitarios.

En esta sección se analizarán los enlaces más adecuados para establecer la red de transporte como lo son:

- Cotopaxi 1 – ESPE (Bloque D)
 - Cotopaxi 1 – ESPE (Edificio Administrativo)
- **ENLACE COTOPAXI 1 – ESPE (BLOQUE D) [65]**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en Radio Mobile:

La Figura. 4.97 hace referencia a las características del moldeamiento y balance del enlace punto a punto. Además, presenta los parámetros de alineación de las antenas, como lo son el azimut y el ángulo de elevación.

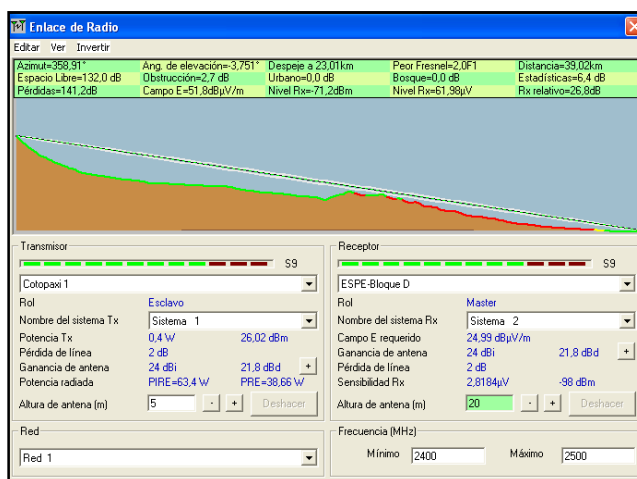


Figura. 4.97. Perfil y Resultados del Enlace Cotopaxi – Bloque D

Las Figuras. 4.98 y 4.99 muestran en detalle las características del enlace y datos del sistema como: rendimiento, distancia, modo de propagación, pérdidas en espacio libre, pérdidas por obstrucción e información para la alineación de las antenas.

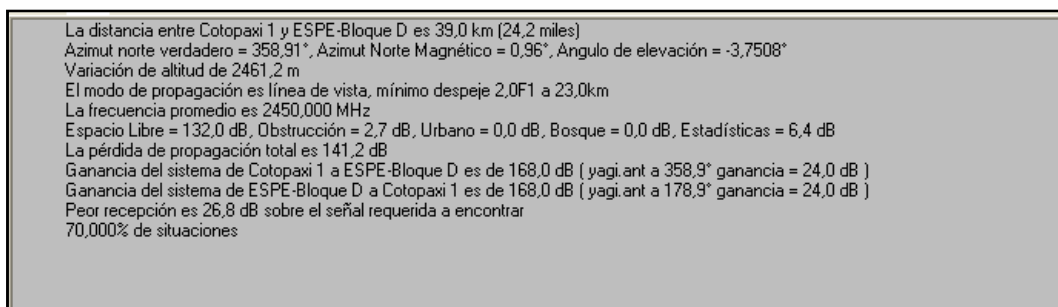


Figura. 4.98. Características del Radioenlace Cotopaxi 1 – Bloque D

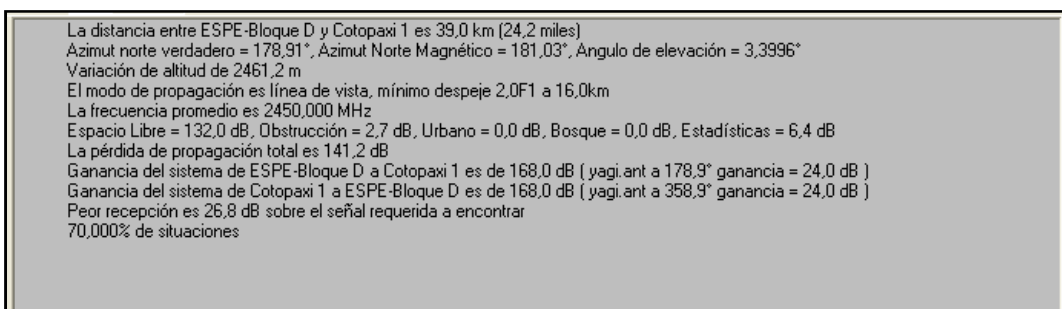


Figura. 4.99. Características del Radioenlace Bloque D - Cotopaxi 1

El umbral de recepción en la herramienta de Radio Mobile es relativo a la sensibilidad del receptor y se presenta en unidades S, es decir, en microvolts, dBm o microvolt/m.

A continuación, Figura. 4.100 muestra los resultados del umbral de recepción para el enlace Cotopaxi – Bloque D en dichas unidades:



Figura. 4.100. Umbral de Recepción

El *S-Meter* representa a la señal recibida, para el recuadro que indica receptor corresponde a una transmisión de izquierda a derecha, mientras que el cuadro definido como transmisor representa el proceso contrario. Donde, cada

una de las luces verdes equivale a una unidad S, y las luces rojas indican un adicional de 10 dB sobre S9.

Para este caso se utiliza el rendimiento de unidades S para frecuencias 30 [MHz], el cual corresponde a: $22.5\text{dB} < \text{Mu} < 27\text{dB}$ como lo indica la Tabla. 4.43.

Tabla. 4.43. Correspondencia Entre los Niveles de Señal Según S y el Margen de Umbral (Mu)

Referencia (unidades S)	Margen de umbral (Mu)
S0	$\text{Mu} \leq -1.5\text{dB}$
S1	$\text{Mu} > -1.5\text{dB}$ and $\text{Mu} < 1.5\text{dB}$
S2	$1.5\text{dB} \leq \text{Mu} \leq 4.5\text{dB}$
S3	$4.5\text{dB} < \text{Mu} < 7.5\text{dB}$
S4	$7.5\text{dB} \leq \text{Mu} \leq 10.5\text{dB}$
S5	$10.5\text{dB} < \text{Mu} < 13.5\text{dB}$
S6	$13.5\text{dB} \leq \text{Mu} \leq 16.5\text{dB}$
S7	$16.5\text{dB} < \text{Mu} < 19.5\text{dB}$
S8	$19.5\text{dB} \leq \text{Mu} \leq 22.5\text{dB}$
S9	$22.5\text{dB} < \text{Mu} < 27\text{dB}$
S9 + 10	$27\text{dB} \leq \text{Mu} < 39\text{dB}$
S9 + 20	$39\text{dB} \leq \text{Mu} < 49\text{dB}$
S9 + 30	$49\text{dB} \leq \text{Mu} < 59\text{dB}$

La Figura. 4.101 muestra el análisis del obstáculo más prominente que perjudica la transmisión del enlace Cotopaxi 1 – Bloque D, el cual se encuentra ubicado a 23.01 [km] de la estación transmisora y cuya altura es de 3428.9 [m]. Además, presenta un nivel de despejamiento de la zona de Fresnel de 69.39 [m] y el porcentaje al que se encuentra liberada la primera zona de Fresnel corresponde a 2.0F1.

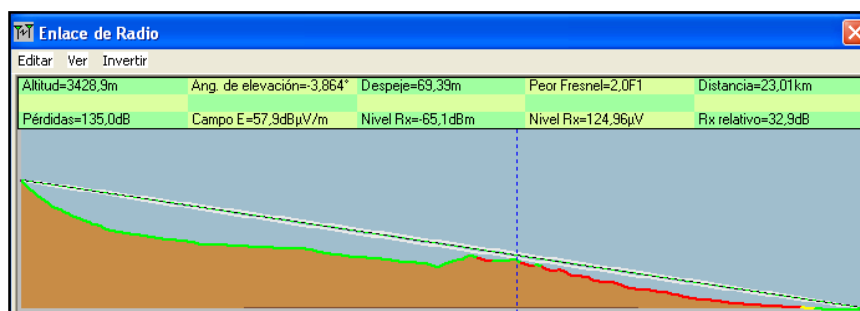


Figura. 4.101. Despeje de la Zona de Fresnel del Enlace Cotopaxi – Bloque D

A continuación, la Figura. 4.102 muestra el nivel de la señal en relación con la distancia, como se puede observar se presentan áreas donde no existe el rendimiento requerido. Sin embargo, en el punto de interés posee cobertura y un nivel de recepción de -71.2 [dBm], el cual es equivalente a la suma de ganancias, menos el valor de las pérdidas totales.

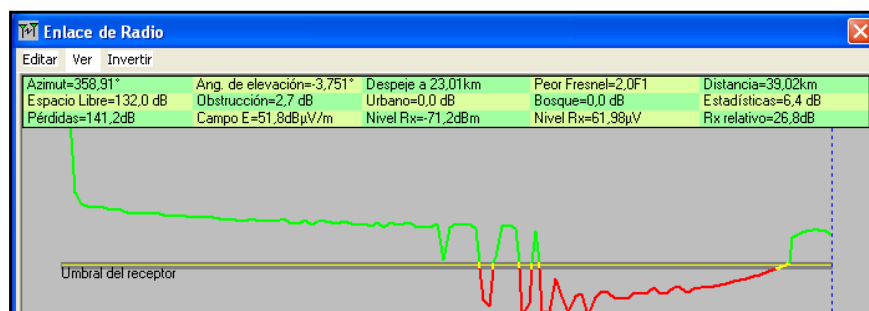


Figura. 4.102. Nivel de la Señal del Enlace Cotopaxi 1 – Bloque D

La Figura. 4.103 indica la distribución estadística relativa al rendimiento del receptor, es decir, el margen de umbral [Mu].

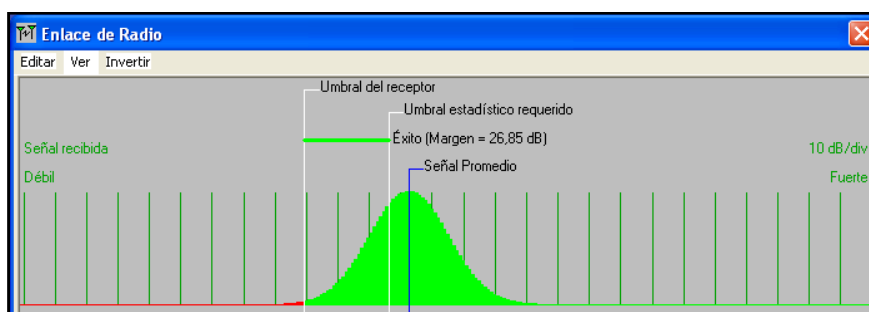


Figura. 4.103. Distribución Estadística del Margen de Umbral

- **ENLACE COTOPAXI 1 – ESPE (EDIFICIO ADMINISTRATIVO) [65]**

La Figura. 4.104 hace referencia a las características del moldeamiento y balance del enlace punto a punto. Además, presenta los parámetros de alineación de las antenas, como lo son el azimut y el ángulo de elevación.

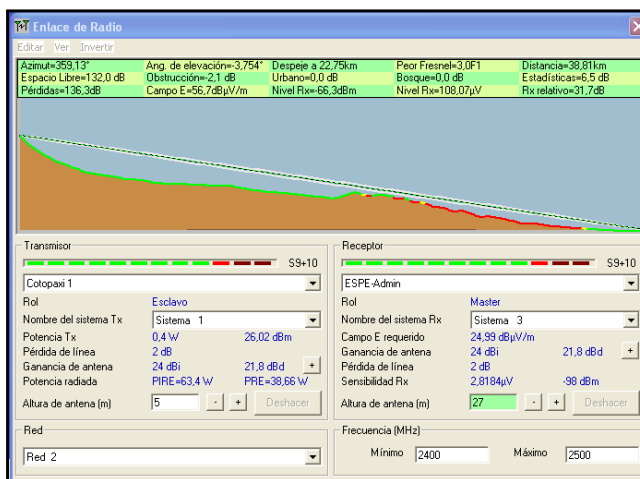


Figura. 4.104. Perfil y Resultados del Enlace Cotopaxi – Edificio Administrativo

Las Figuras. 4.105 y 4.106 muestran en detalle las características del enlace y datos del sistema como: rendimiento, distancia, modo de propagación, pérdidas en espacio libre, pérdidas por obstrucción e información para la alineación de las antenas.

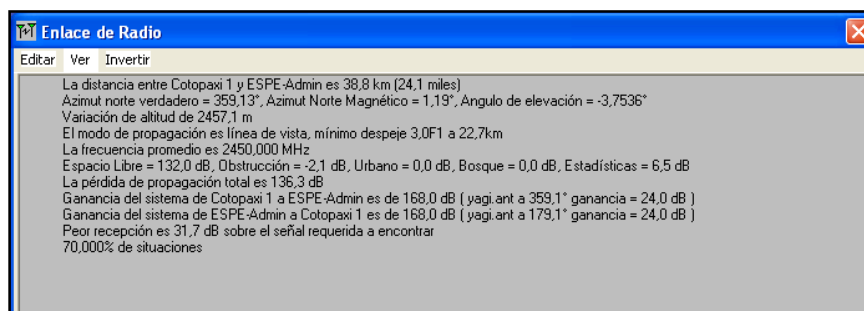


Figura. 4.105. Características del Radioenlace Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo

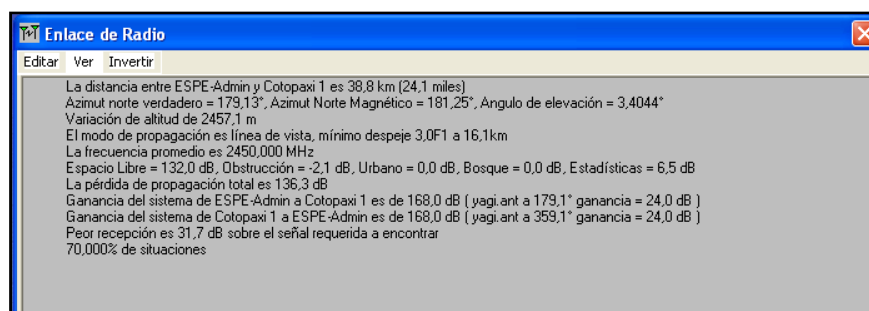


Figura. 4.106. Características del Radioenlace Edificio Administrativo – Cotopaxi 1

A continuación, la Figura. 4.107 presenta los resultados del umbral de recepción para el enlace Cotopaxi – Edificio Administrativo en unidades S:

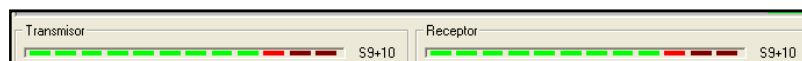


Figura. 4.107. Umbral de Recepción

Para este caso se utiliza el rendimiento de unidades S para frecuencias 30 [MHz], el cual corresponde a: $27 \text{ [dB]} \leq \text{Mu} < 39 \text{ [dB]}$ basándose en la Tabla. 4.43.

La Figura. 4.108 muestra el análisis del obstáculo más prominente que perjudica la transmisión del enlace Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo, el cual se encuentra ubicado a 22.75 [km] de la estación transmisora y cuya altura es de 3413.1 [m]. Además, presenta un nivel de despejamiento de la zona de Fresnel de 100.54 [m] y el porcentaje al que se encuentra liberada la primera zona de Fresnel corresponde a 3.0F1.

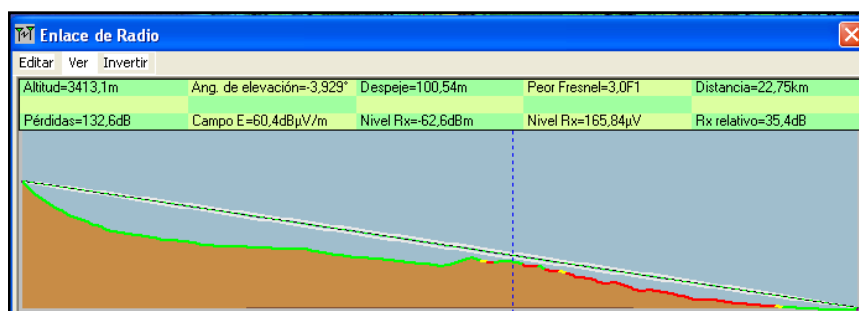


Figura. 4.108. Despeje de la Zona de Fresnel del Enlace Cotopaxi – Edificio Administrativo

A continuación, la Figura. 4.109 muestra el nivel de la señal en relación con la distancia, como se puede observar se presentan áreas donde no existe el rendimiento requerido. Sin embargo, en el punto de interés posee cobertura y un nivel de recepción de -66.3 [dBm], el cual es equivalente a la suma de ganancias, menos el valor de las pérdidas totales.

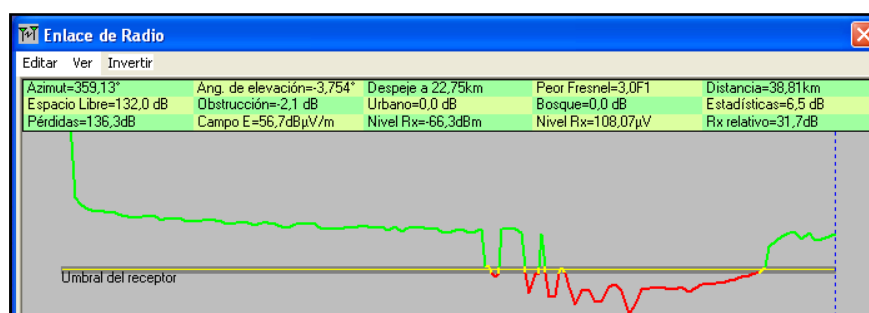


Figura. 4.109. Nivel de la Señal del Enlace Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo

La Figura. 4.110 indica la distribución estadística relativa al rendimiento del receptor, es decir, el margen de umbral [Mu].

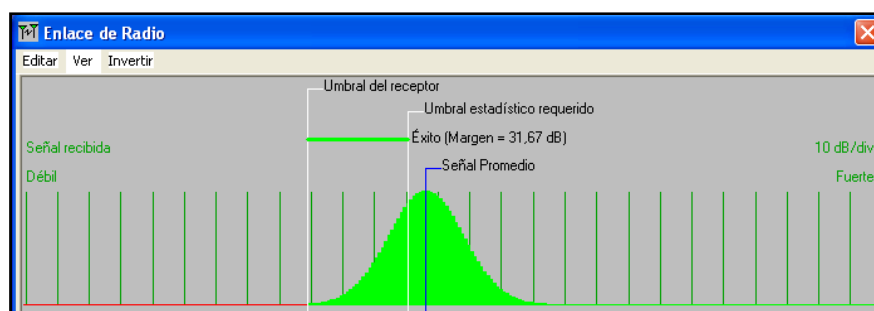


Figura. 4.110. Distribución Estadística del Margen de Umbral

4.4.8 Comparación del Modelo de Cálculo Teórico y el Modelo de Cálculo de un Radioenlace Utilizando los Software Sirenet y Radio Mobile

En la Tabla. 4.44 se despliegan los datos obtenidos en el modelo de cálculo teórico y la información entregada por diferentes herramientas de simulación utilizadas para el enlace Cotopaxi 1 – Edificio Administrativo, ya que dicho enlace presenta la mejor ubicación y características del perfil:

Tabla. 4.44. Comparación Entre el Modelo de Cálculo Teórico y el Modelo de Cálculo con los Software Utilizados

PARÁMETRO	MODELO DE CÁLCULO TEÓRICO	MODELO DE CÁLCULO CON EL SOFTWARE SIRENET	% ERROR	MODELO DE CÁLCULO CON EL SOFTWARE RADIO MOBILE	% ERROR
Ángulo de elevación Cotopaxi – ESPE	-3.478	-3.487	0.259	-3.754	7.936
Azimut Cotopaxi – ESPE	359.13	359.121	0.003	359.130	0.000
Azimut ESPE – Cotopaxi	179.13	179.121	0.005	179.130	0.000
Potencia Recibida	-56.903	-57.036	0.234	-66.300	16.514
Atenuación por espacio libre	131.844	131.794	0.038	132.000	0.118
Pérdidas por obstrucción	-2.546	---	---	-2.100	17.518

La Tabla. 4.45 presenta los resultados de la simulación de las diferentes alternativas de enlace:

Tabla. 4.45. Resultados de Simulación

Enlace	Distancia [km]	Liberación de la Primera Zona de Fresnel [%]	Potencia de Recepción [dBm]	Margen de desvanecimiento [dB]	Desvanecimiento Total [%] $\alpha = 1.5$	Disponibilidad [%]	Tiempo fuera de servicio
Cotopaxi-ESPE (Bloque D)	38.854	77.150	-59.557	37.443	$1.091 \cdot 10^{-3}$	99.99890943	00 h 05' 39"
Cotopaxi- ESPE (Edificio Administrativo)	38.637	121.480	-56.903	40.097	$1.087 \cdot 10^{-3}$	99.99891340	00 h 05' 37"
Cotopaxi-IASA	30.209	65.960	-58.124	38.876	$3.994 \cdot 10^{-4}$	99.99960061	00 h 02' 04"
IASA- ESPE (Bloque D)	9.408	300.600	-37.997	59.003	$7.756 \cdot 10^{-6}$	99.99999220	00 h 00' 02"
IASA - ESPE (Edificio Administrativo)	9.152	299.120	-37.796	59.203	$6.792 \cdot 10^{-6}$	99.99999320	00 h 00' 02"

Por lo tanto, la mejor opción para establecer el enlace de transporte es ubicar la estación base en las cercanías del Refugio José Rivas en el Volcán Cotopaxi y la estación de recepción en el Edificio Administrativo - ESPE, ya que se determinó que existe el despejamiento adecuado y el porcentaje necesario para garantizar la liberación de la Primera Zona de Fresnel. Mientras que, para establecer el enlace redundante se resolvió usar la instalaciones del IASA, donde se requeriría una torre de al menos 17 [m] de altura para asegurar el funcionamiento de dicho enlace, lo cual implicaría más costos. Sin embargo, este enlace garantizaría la disponibilidad de las conexiones o sería un *backup* en caso de ser afectado el enlace principal.

4.5 Network Simulator 2 y TraceGraph [66]

Network Simulator 2 (NS-2) es un software libre que permite simular diferentes eventos discretos de redes telemáticas y validar el desempeño de dichos sistemas. Además, se especializa en el estudio de interacciones multiprotocolo tales como: protocolos de transporte, aplicación, enlace de datos, algoritmos de encaminamiento y control de congestión.

Esta herramienta de alto desempeño fue desarrollada por CONSER (*Collaborative Simulation For Education and Reserch*) y SAMAN (*Simulation Augmented by Measurement and Analysis for Networks*) en lenguaje C++ y su interfaz con el usuario utiliza el lenguaje OTcl (Object Tcl). Las simulaciones se basan en *scripst* cuya programación utiliza ambos lenguajes orientados a objetos, donde se pueden manejar volúmenes de datos de forma rápida durante la simulación. Su procedimiento se muestra en la Figura. 4.111:

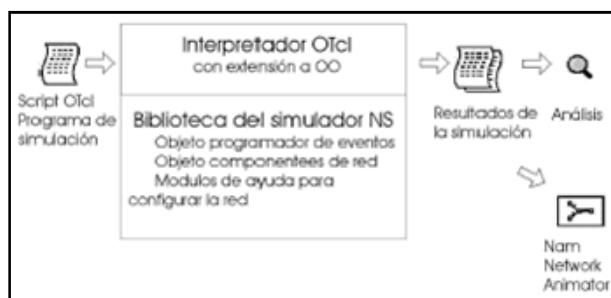


Figura. 4.111. Procedimiento de Simulación

El NS-2 está disponible para múltiples plataformas e inclusive Windows a través de un simulador del Shell de Linux. Se puede descargar el código fuente del simulador, manuales básicos y ayudas en el siguiente link: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.

4.5.1 Funcionamiento de NS-2

El desarrollo de NS-2 ha permitido la implementación tanto de redes fijas como redes inalámbricas, es decir, este software de simulación está orientado a diferentes tipos de redes de comunicaciones como: Ad-Hoc, WPAN (*Wireless*

Personal Area Network), WLAN (*Wireless Local Area Networks*), WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*), lo cual hace que se convierta en una importante herramienta para el desarrollo de este proyecto, ya que se realizará la simulaciones de nodos fijos en entorno WPAN que corresponden al estándar IEEE 802.15.4 y la red WMAN que corresponde a la tecnología Wi-Fi de largo alcance con MAC modificada.

Para el desarrollo de un escenario de simulación es necesario que el programador realice un archivo script basado en lenguaje OTcl, donde se debe definir los eventos y establecer la topología de la red, las funciones necesarias para la simulación, los tiempos de inicio y finalización del tráfico o envío de paquetes, etc. [67].

Las ventajas de este software son notables, ya que posee compatibilidad con cualquier tipo de plataforma y presenta gran variedad de aplicaciones para redes cableadas como inalámbricas, protocolos de enrutamiento, protocolos de transporte. Además, su programación es relativamente fácil y los resultados pueden ser observados en interfaz gráfica. Sin embargo, la corrida y simulación en NS-2 presenta la limitante de que puede generar un gran número de pequeños errores debido a la complejidad del código.

4.5.2 Simulación y Cálculos

Para el desarrollo de las simulaciones y del análisis del desempeño en función del *Throughput* y del *Delay* se empleó la versión 2.33 de *Network Simulator* debido a que esta incluye los módulos para el estándar IEEE 802.15.4, y las librerías necesarias para implementar una *Wireless Personal Area Network* (WPAN).

El principal objetivo de la simulación de la red de monitorización ZigBee, diseñadas para el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi, utilizando el software NS-2, es obtener el *Throughput* (relación entre el número de paquetes recibidos y el tiempo total de envío) entre las estaciones bases y las estaciones de sensamiento, con ello se

podrá determinar la capacidad real de la red y definir el valor de la velocidad de transmisión y ancho de banda que requiere la misma.

La presente sección del proyecto hace referencia al análisis del *Throughput* de la red de sensamiento utilizando el modelo *TwoRayGround*, la cual consiste en el intercambio de información de la estación base y cada uno de los nodos generando transmisiones simultáneas.

4.5.3 Herramientas y Procedimiento para Ejecutar la Simulación

Para el desarrollo y análisis de esta simulación fue necesario utilizar diferentes herramientas como se indican en la Figura. 4.112:



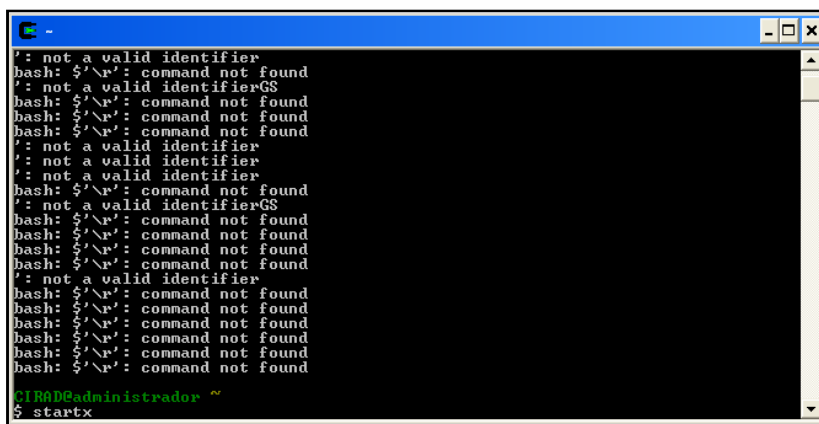
Figura. 4.112. Herramientas Utilizadas

El software Cygwin permite utilizar una consola de Linux en un ambiente de Windows y analizar de forma gráfica los resultados obtenidos de la simulación, así tenemos a NAM (*Network Animator*) de NS-2 que constituye una herramienta de simulación basada en el lenguaje *Tcl/Tk* que permite visualizar las simulaciones obtenidas mediante los ficheros gráficos de salida del simulador NS-2. Otro programa utilizado es el *TraceConverter* que permite adecuar el archivo de traza resultante del simulador NS-2, a un formato compatible con Matlab y que es más fácil de interpretar por parte de *TraceGraph*, disminuyendo el tiempo que toma cargar el archivo *.tr* común.

Adicionalmente, para obtener los datos necesarios para realizar el análisis, se utilizó diferentes herramientas como: *TraceGraph* que fue desarrollado bajo la plataforma de Matlab y que permite visualizar de forma gráfica los datos resultantes de la simulación de los archivos de traza (**.tr*) en un entorno amigable con el usuario.

A continuación, se indicará el uso de cada software:

Como primer paso se procede a abrir la consola de Cygwin, la cual permitirá la ejecución de los programas de *ns* y *nam* de *Network Simulator 2*.

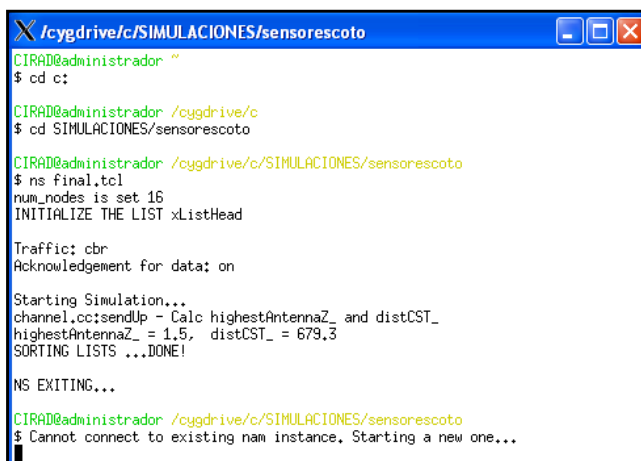


```
': not a valid identifier
bash: $'\r': command not found
': not a valid identifierGS
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
': not a valid identifier
': not a valid identifier
': not a valid identifier
bash: $'\r': command not found
': not a valid identifierGS
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
': not a valid identifier
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
bash: $'\r': command not found
CIRAD@administrador ~
$ startx
```

Figura. 4.113. Iniciando Cygwin

Una vez iniciada la consola Cygwin – X se ingresa el comando *startx* para iniciar el entorno de Linux en ambiente Windows. Dicho proceso se muestra en la Figura. 4.113.

Previamente, guardado el programa de simulación con la extensión *.tcl* se procede a acceder a la ubicación del mismo y utilizando el comando *ns* más el nombre del archivo con su respectiva extensión, se analiza el código y si no existen errores se ejecuta, como se observa en la Figura. 4.114.



```
X /cygdrive/c/SIMULACIONES/sensorescoto
CIRAD@administrador ~
$ cd c:
CIRAD@administrador /cygdrive/c
$ cd SIMULACIONES/sensorescoto
CIRAD@administrador /cygdrive/c/SIMULACIONES/sensorescoto
$ ns final.tcl
num_nodes is set 16
INITIALIZE THE LIST xListHead

Traffic: cbr
Acknowledgement for data: on

Starting Simulation...
channel_cc:sendUp - Calc highestAntennaZ_ and distCST_
highestAntennaZ_ = 1,5, distCST_ = 679,3
SORTING LISTS ...DONE!

NS EXITING...
CIRAD@administrador /cygdrive/c/SIMULACIONES/sensorescoto
$ Cannot connect to existing nam instance. Starting a new one...
```

Figura. 4.114. Corrida del Programa NS

Una vez que se ejecuta el fichero con la información de la red, la herramienta NAM mostrará automáticamente una ventana con el escenario de la simulación como se indica en la Figura. 4.115.

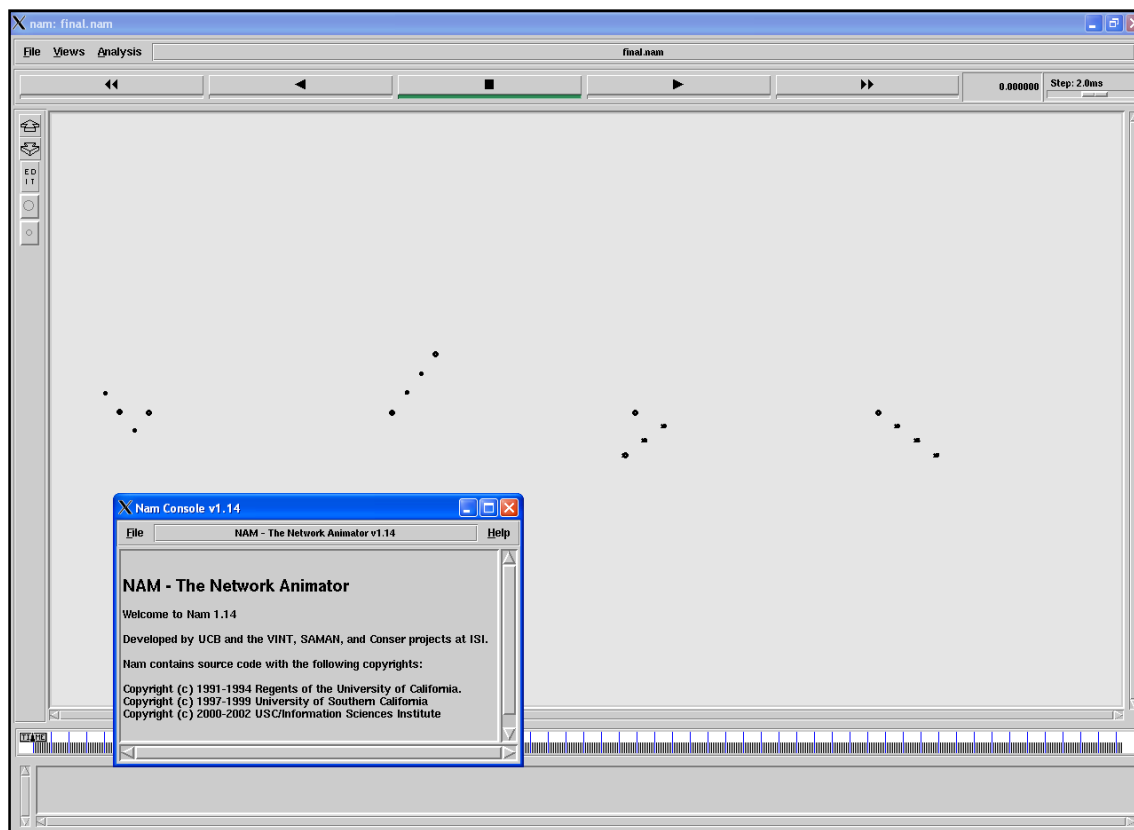


Figura. 4.115. Visualización Gráfica de la Simulación

Debido a la estructura del programa automáticamente se crean los ficheros *.nam* y *.tr*, por lo que utilizando el software *TraceConverter* podemos convertir el formato *.tr* en un tipo de archivo compatible con Matlab para que de esta forma se puedan ver los resultados de forma gráfica en la herramienta *TraceGraph* de Matlab.

Para ello, abrimos el entorno DOS, ingresamos a la ubicación donde se encuentra el programa creado y ejecutamos el comando *trconvert* más el nombre del archivo con extensión *.tr*. *TraceConverter* generará un nuevo archivo tipo *_tg.tr*, el cual se puede leer desde la librería *TraceGraph*. Dicho proceso se muestra en la Figura. 4.116.

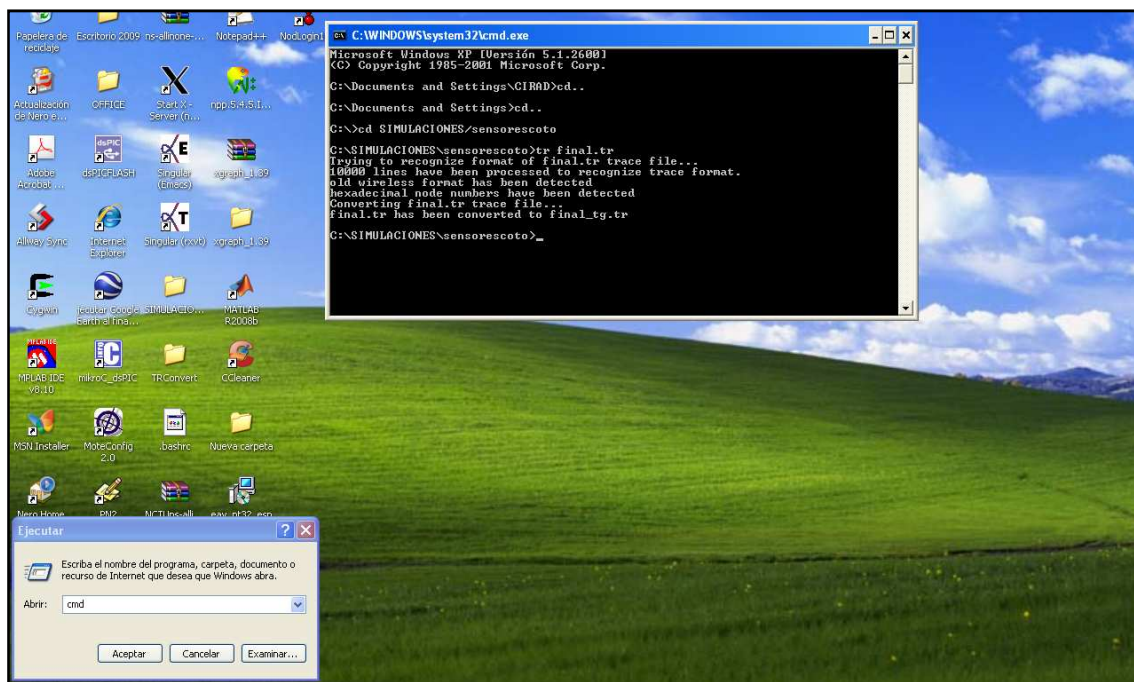


Figura. 4.116. Conversión del Archivo .TR en .TG

Como se observa en la Figura. 4.117, en el software de Matlab se ejecuta el comando *trgraph* para proceder al análisis y visualización de los resultados.

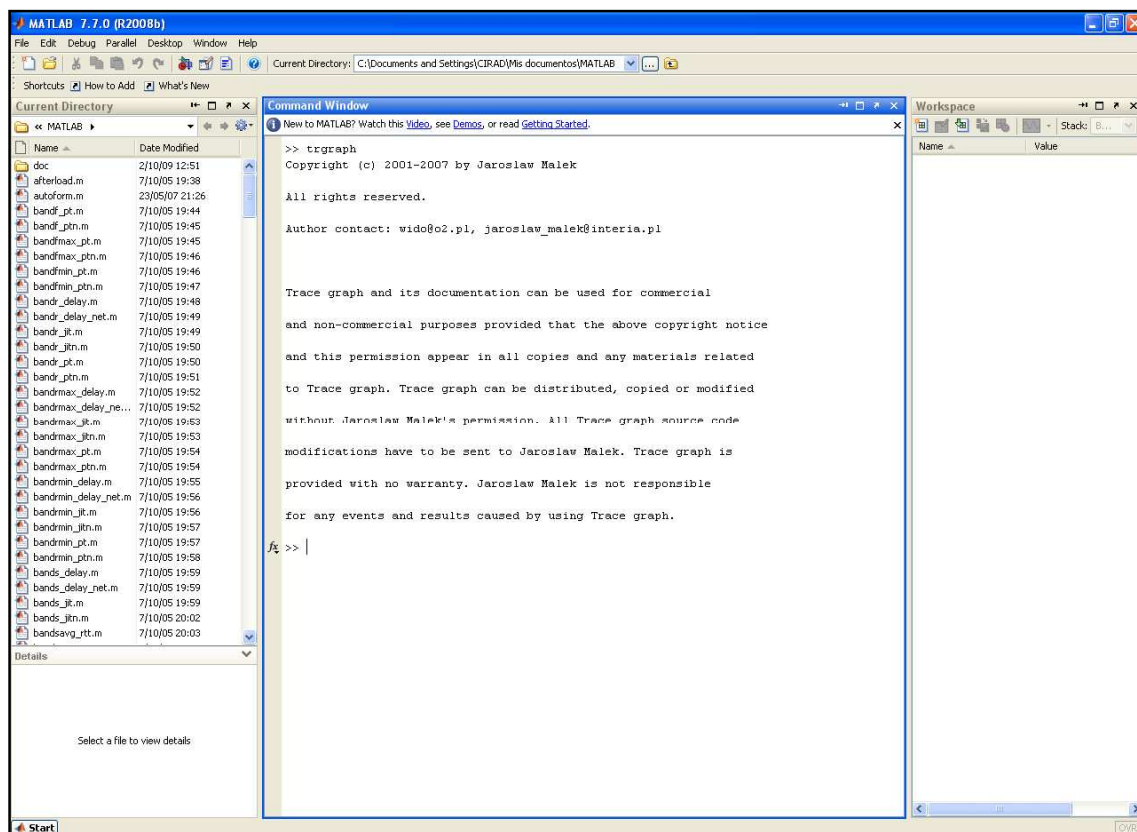


Figura. 4.117. Análisis en Trgraph de Matlab

Automáticamente se abren tres pantallas: *TraceGraph*, *Graph* y *Network Information*, cada una con una función específica.

Se usa *TraceGraph* para examinar y abrir el archivo convertido en *_tg.tr*. Al momento de abrirlo se podrán observar los resultados en las dos restantes pantallas.

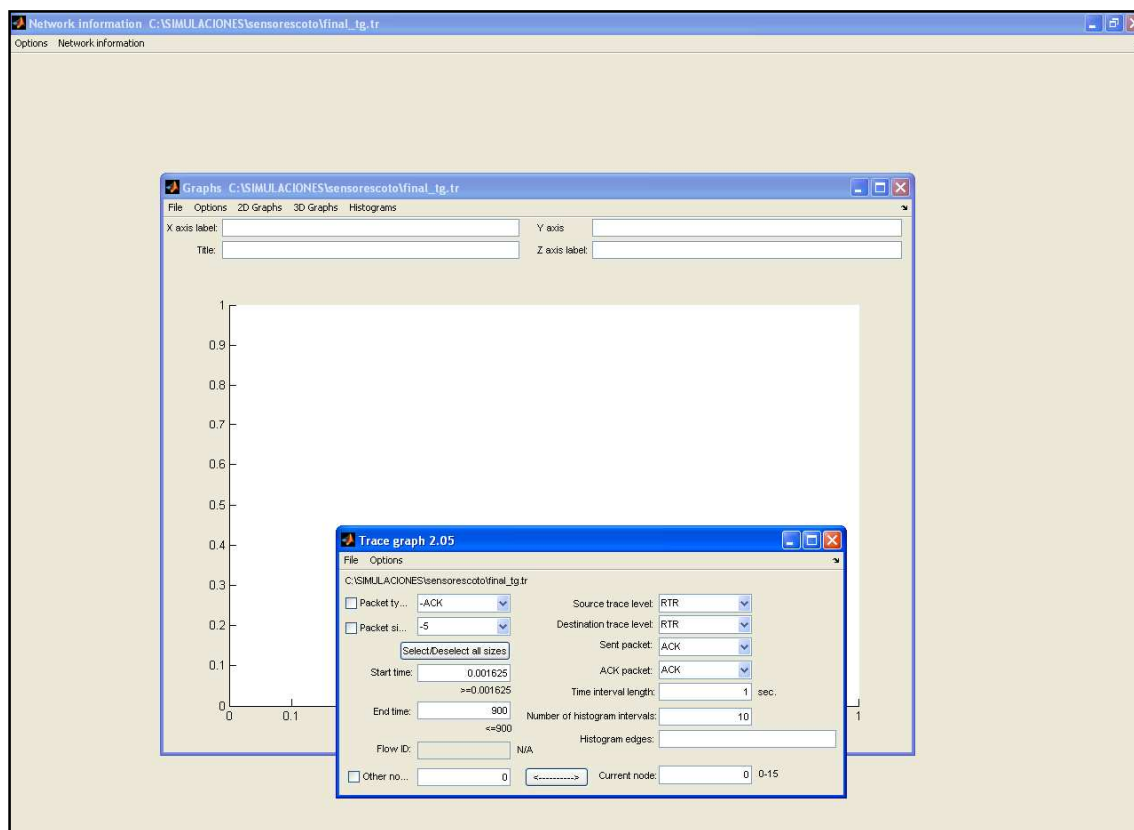


Figura. 4.118. Abriendo el Archivo .Tg

La pantalla de *Network Information* despliega datos y características importantes de la simulación como: número de nodos, número de paquetes generados, número de paquetes recibidos, número de paquetes perdidos, etc.

La ventana *Graph* corresponde a la visualización gráfica de resultados en dos, tres dimensiones o pudiéndose escoger diferentes tipos de histogramas. La Figura. 4.119 a), b) y c) muestra ejemplos de tres alternativas gráficas para desplegar los resultados de simulación.

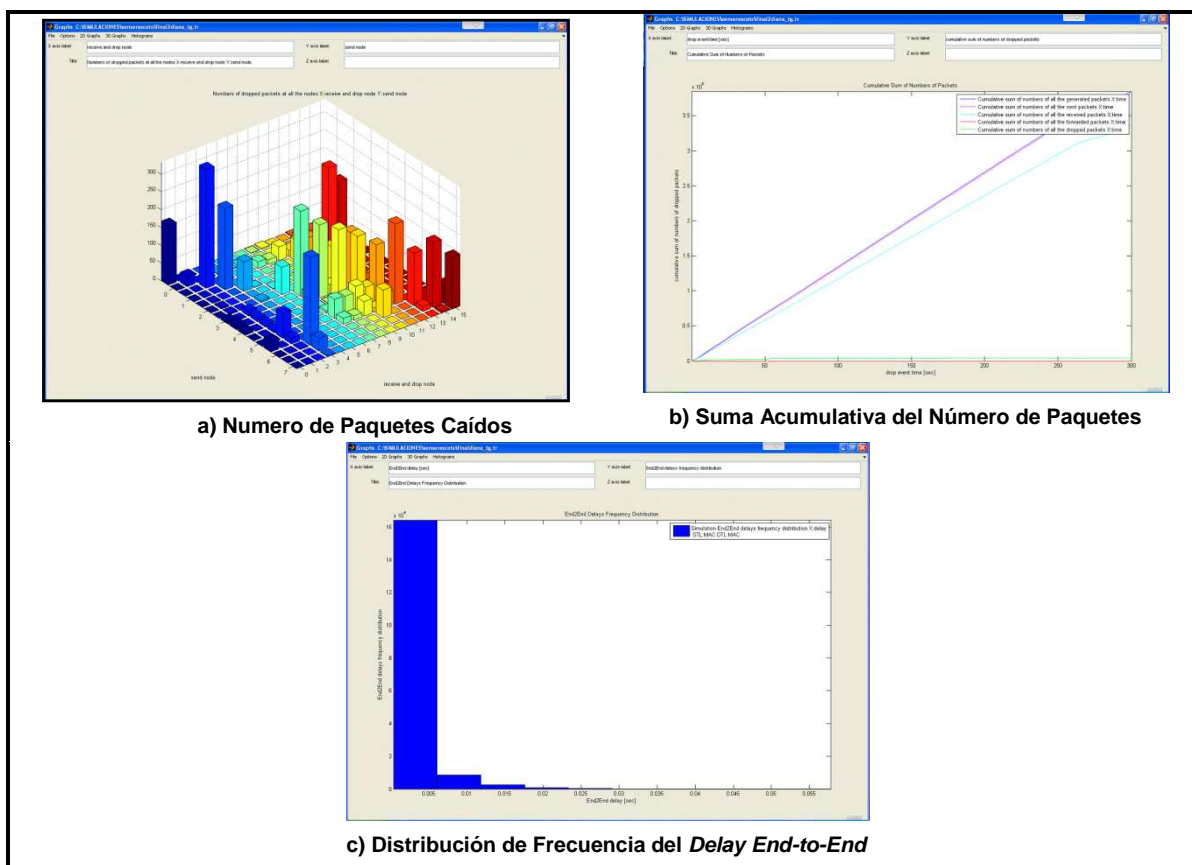


Figura. 4.119. a) Visualización en 3D; b) Visualización en 2D; c) Visualización Mediante Histograma

4.5.4 Red de Sensamiento

El objetivo de esta red es sensar las variables de movimientos sísmicos, temperatura y humedad con las cuales se puede determinar los niveles de actividad volcánica del Cotopaxi, es decir, la WSN se encarga de la colección de datos y de enviar la información más relevante a la estación de monitorización, quien a su vez transmitirá a la estación de vigilancia (ESPE) dichos datos mediante la red de transporte Wi-Fi.

Basados en los resultados obtenidos de la simulación de la transmisión de información variando el número de nodos activos [4], los cuales indican que el *Throughput* real de la red es directamente proporcional al incremento del número de nodos como se muestra en la Figura. 4.120, y del análisis desarrollado en [2] y [3], se deduce que se requieren al menos entre diez a dieciséis nodos en

promedio para obtener información suficiente que ayude a realizar la monitorización de un volcán.

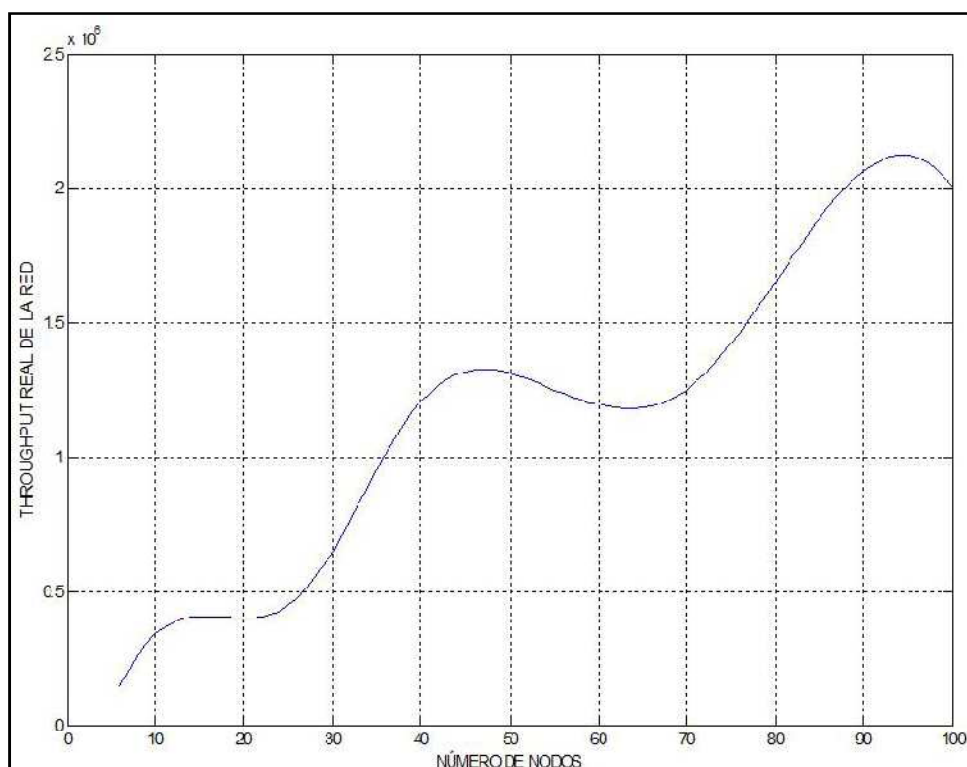


Figura. 4.120. *Throughput* Real de la Red vs. Número de Nodos [4]

Con la finalidad de realizar una generalización se considera el caso de dieciséis nodos bajo el estándar IEEE 802.15, observando la figura anterior se tiene que el *Throughput* real es de 0.4 [Mbps] para esta cantidad de nodos, es decir, a través de la red se cursa información de 400 [kbits] cada segundo, esta información llega al nodo maestro que está conectado a un elemento gestionable de características robustas, si se muestrea y almacena la información cada 300 segundos de acuerdo a lo indicado en [4] las 24 horas del día se requerirá de un almacenamiento diario aproximado:

$$800 \left[\frac{\text{Kbits}}{\text{min}} \right] \cdot 1440 \left[\frac{\text{horas}}{\text{día}} \right] = 1152 \left[\frac{\text{Mbits}}{\text{día}} \right]$$

Como se puede observar la información de la actividad del volcán recogida por los sensores representa una alta densidad y un constante crecimiento, lo que implica que en algún tiempo determinado el almacenamiento de dichos datos en

la estación de monitorización va a llegar a saturarse, por lo que es necesario enviar esa información regularmente para su correcto almacenamiento y posterior estudio en los Laboratorios de Vigilancia Volcánica, donde se puede disponer de elementos de mayor y mejor capacidad desarrollando procedimientos más eficaces y estables para su administración.

Para el desarrollo de la simulación se ha establecido una red de sensores inalámbricos autónomos que presentan una estructura Ad-Hoc y su arquitectura consta de cuatro nodos principales y doce nodos sensores. Estos últimos se encargan de tomar la información del medio y la convierten en señales eléctricas, las cuales se transmiten a su respectivo nodo principal (Nodos 0, 1, 2, 3), quien envía los datos más relevantes a la estación de monitorización. Adicionalmente, también se emplea un *Gateway* que permite la interconexión entre la red de sensores y la red de transporte. El escenario de la simulación para la red de sensores inalámbricos ubicados en el Volcán Cotopaxi se muestra a continuación:

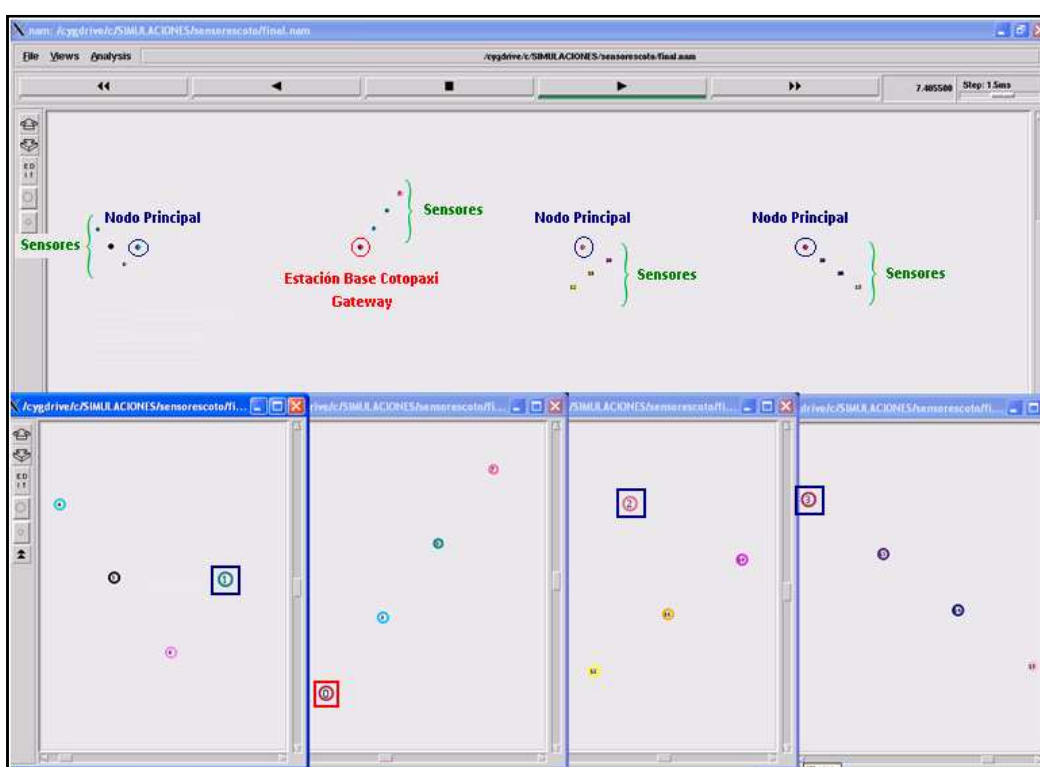


Figura. 4.121. Escenario de Simulación para la Red de Sensores

Para una mejor visualización de la estructura de la red se presenta el escenario de cada nodo principal y de la estación base.

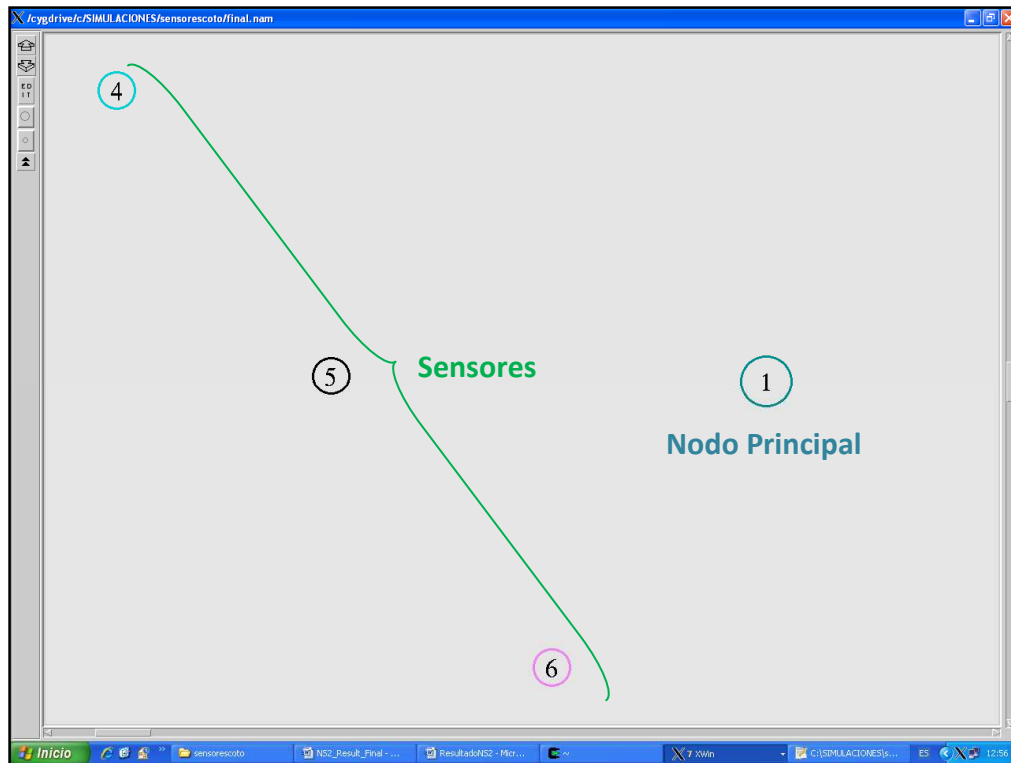


Figura. 4.122. Escenario del Nodo 1

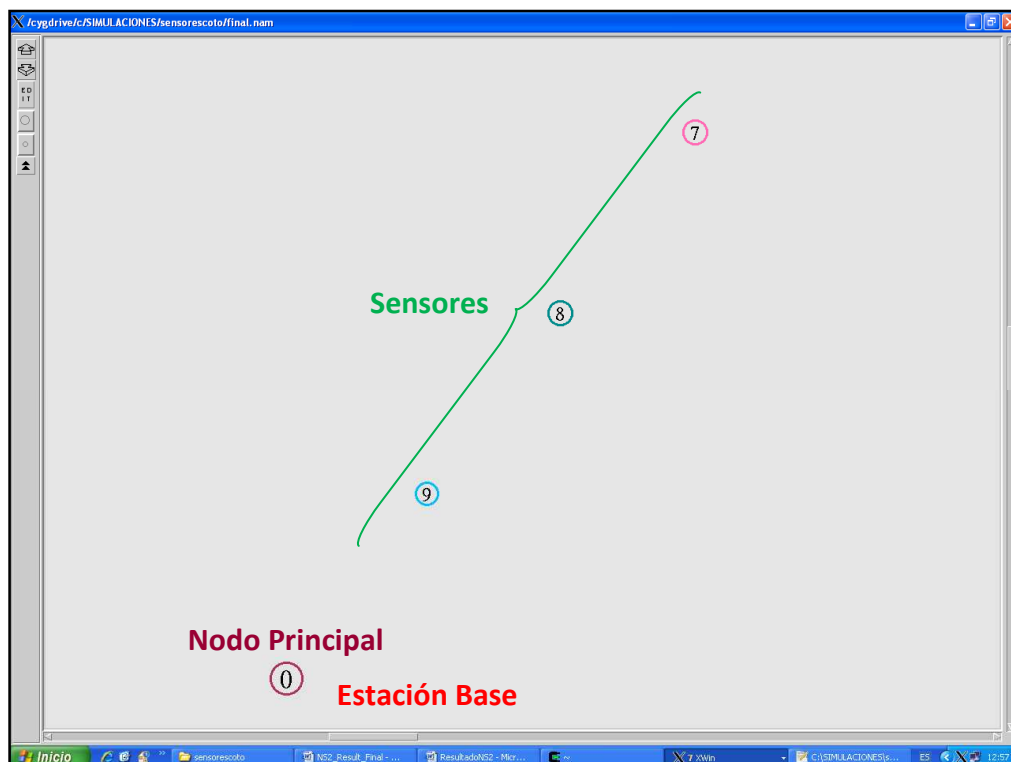


Figura. 4.123. Escenario del Nodo 0

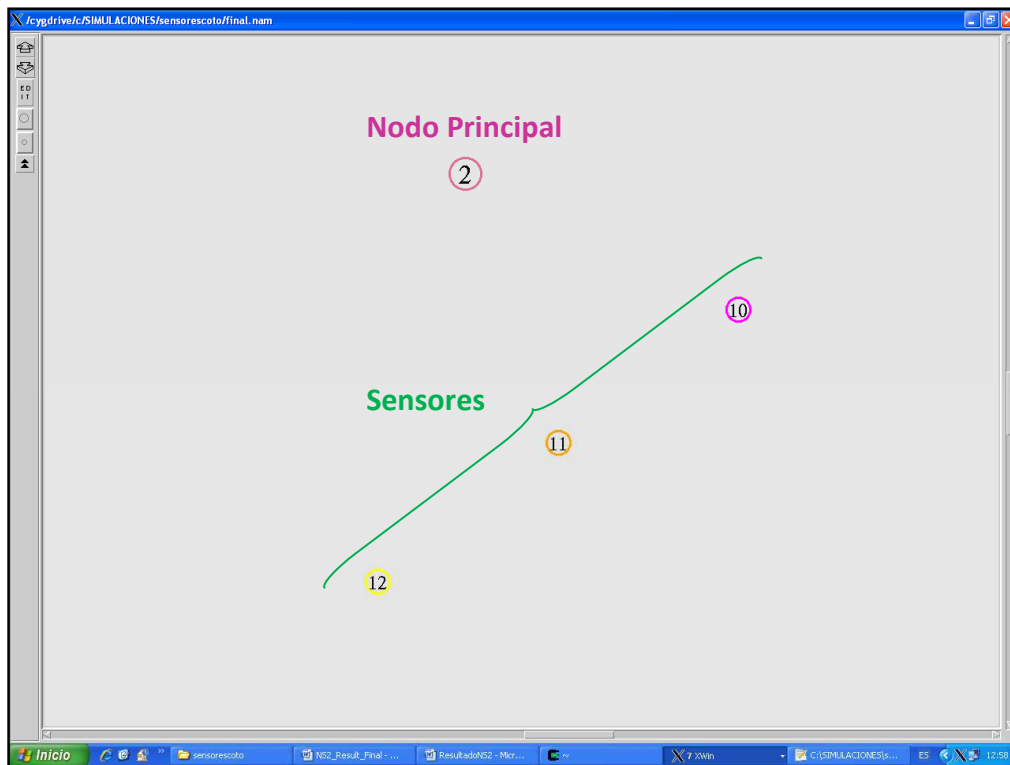


Figura. 4.124. Escenario del Nodo 2

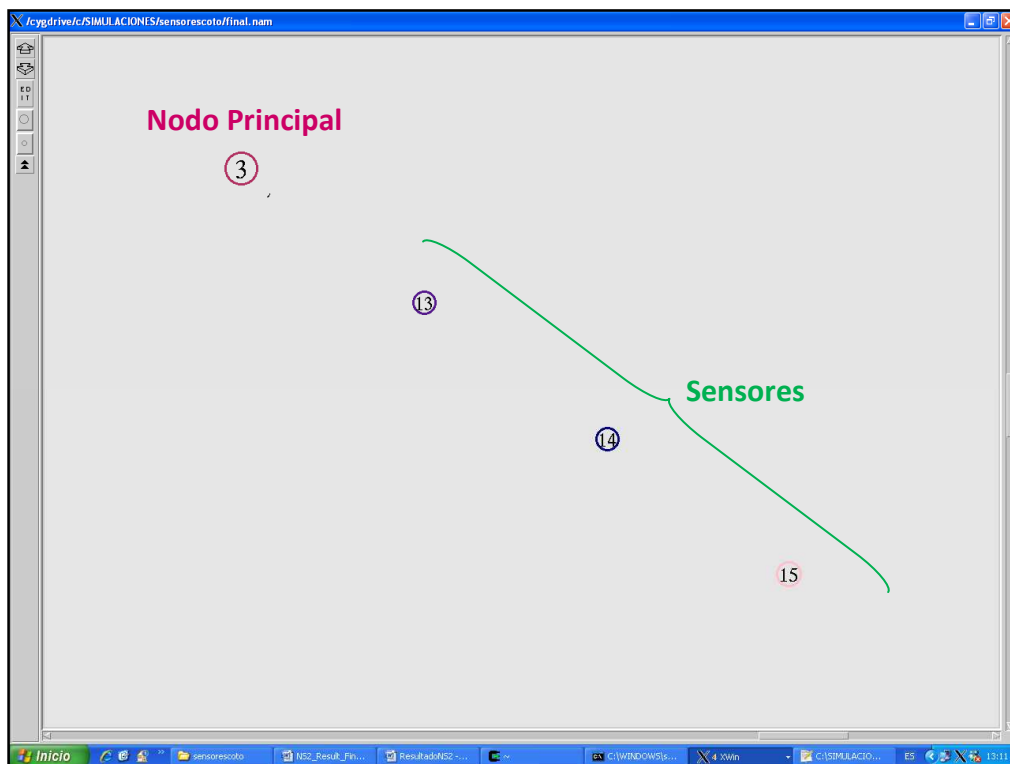


Figura. 4.125. Escenario del Nodo 3

Debido a las características del proyecto se va a analizar dos casos para la red de sensores inalámbricos, cuya diferencia radica en el valor de: la potencia de

transmisión, la potencia de recepción y la distancia entre nodos, por lo tanto, también varía el alcance de cobertura.

Para el Caso I con una potencia de 60 [mW], la distancia máxima es de 500 [m] y la distancia mínima de separación entre nodos sensores es de 49 [m]. Mientras que para el Caso II con una potencia de 1 [mW], corresponde una distancia máxima de 400 [m] y la distancia mínima que se presenta entre los nodos sensores es de 49 [m].

CASO I:

La simulación se establece bajo el modelo de propagación *TwoRayGround*, se genera una tasa de transmisión con la aplicación CBR y contiene el protocolo TCP de transporte de información, dichos parámetros permitirán simular las condiciones del sistema WSN.

Las características de simulación para el Caso I se presentan en la Tabla. 4.46:

Tabla. 4.46. Características de la Red de Sensores para el Caso I

SIMULACIÓN EN NS-2	
Tipo de Canal	WirelessChannel
Modelo de Radio Propagación	TwoRayGround
Network Interface	802.15.4
MAC	802.15.4
Interface Queue*	DropTail/PriQueue
Tipo de Antena	Omnidireccional
Máximo Número de Paquetes	150*
Número de Nodos	16
Protocolo de Enrutamiento	AODV
Capa de Transporte	TCP
Capa de Aplicación	CBR
Umbral de Captura	10 [dB]
Umbral de Sensado de Portadora	4.86e-12 [W]
Umbral de Recepción	4.86e-12 [W]
Potencia de Transmisión	0.060 [W]

SIMULACIÓN EN NS-2	
Frecuencia de Transmisión	2.4 [GHz]
Pérdidas	1 [dB]
Ganancia de la Antena de Transmisión	1 [dBi]
Ganancia de la Antena de Recepción	1 [dBi]
Tamaño del Paquete	127 [Bytes]
Tasa de Transmisión	250 [kbps]
Tiempo de Simulación	300 [s]
Área	2000 x 250 [m]

- **Cálculo de la Potencia de Recepción en Base a la Propagación *Two Ray Ground***

Para el desarrollo de la simulación es necesario determinar el valor de la potencia de recepción bajo el modelo de propagación *TwoRayGround*:

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

Donde:

Tabla. 4.47. Características de la Simulación

CARACTERÍSTICA	DEFINICIÓN	VALOR
Distancia [m]	d	500
Altura de la antena de recepción [m]	h_{Rx}	1.5
Altura de la antena de transmisión [m]	h_{Tx}	1.5
Factor de pérdidas por propagación [dB]	L	1
Ganancia de la antena de recepción [dBi]	G_{Rx}	1
Ganancia de la antena de transmisión [dBi]	G_{Tx}	1
Potencia de transmisión [mW]	P_{Tx}	60

A continuación, se reemplazan los valores en la ecuación y se obtiene:

$$P_{Rx}(d) = \frac{0.06 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (1.5)^2 \cdot (1.5)^2}{(500)^4 \cdot 1}$$

$$P_{Rx}(d) = 4.86 \cdot 10^{-12} [W]$$

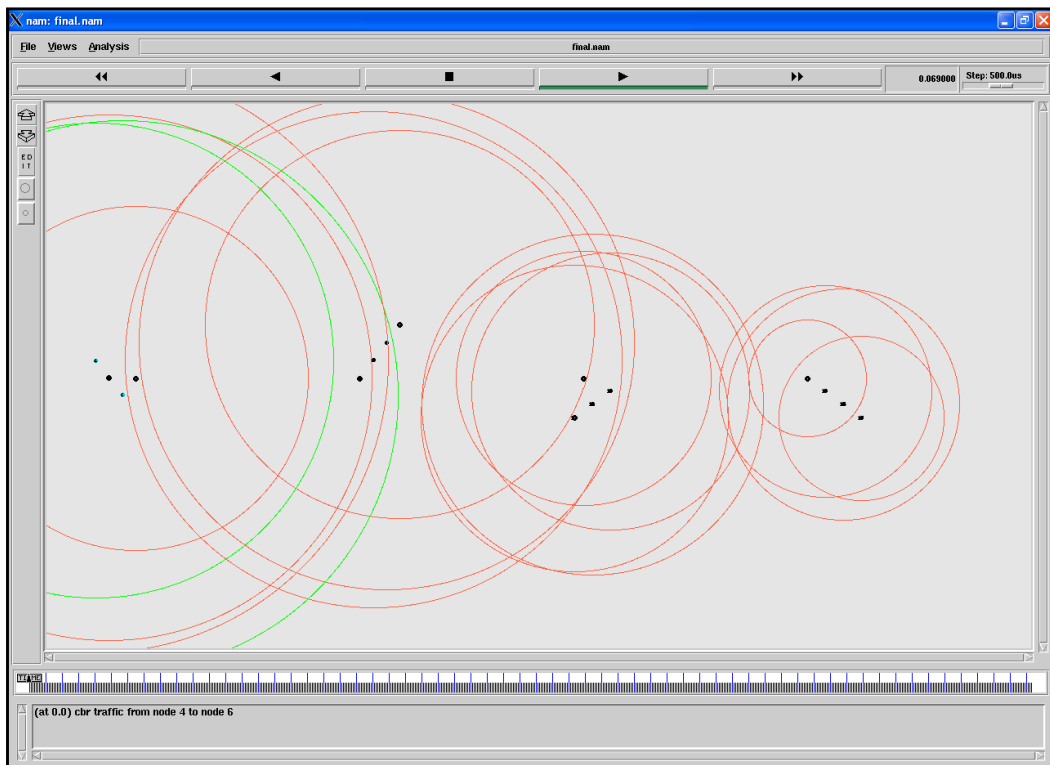


Figura. 4.127. Propagación de Ondas e Intercambio de Paquetes

Además, los resultados se los puede observar en la herramienta *Network Information* de *TraceGraph* bajo la plataforma de Matlab como lo indica la Figura. 4.128.

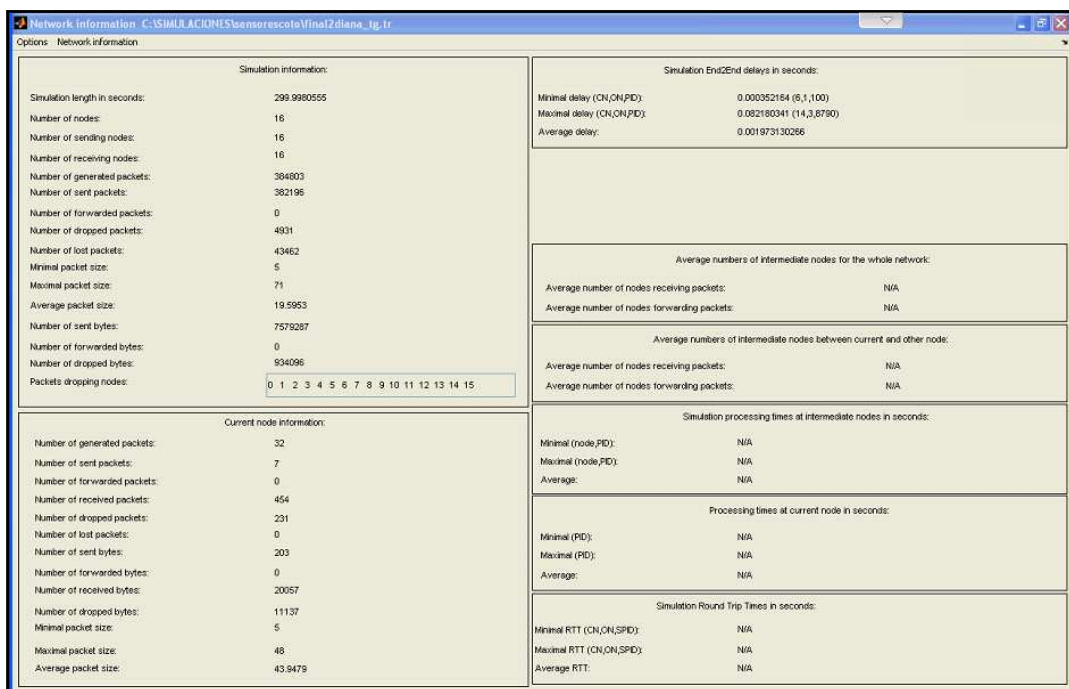


Figura. 4.128. Network Information

Para más información del código de simulación desarrollado para el Caso I ver Anexo 5.

- **Análisis del Caso I**

Las características del programa creado en NS-2 permiten la creación del archivo *.tr* que con ayuda de *TraceConverter* y *TraceGraph* se pueden visualizar los datos contenidos en el archivo traza. La Tabla. 4.48 muestra los resultados obtenidos para este primer caso:

Tabla. 4.48. Resultados Obtenidos

RESULTADOS OBTENIDOS	
Tiempo de Simulación	299.998 [s]
Número de Nodos	16
Número de Nodos Receptores	16
Número de Nodos Transmisores	16
Número de Paquetes Generados	384803
Número de Paquetes Enviados	382196
Número de Paquetes Recibidos	338734
Número de Paquetes Caídos	4931
Número de Paquetes Perdidos	43462
Tamaño Máximo del Paquete	71
Tamaño Mínimo del Paquete	5
Promedio del Tamaño del Paquete	19.5953
Número de Bytes Enviados	7579287
Número de Bytes Recibidos	6717397
Número de Bytes Perdidos	861890
Número de Bytes Caídos	934096
Retardo Mínimo	0.000352164
Retardo Máximo	0.082180341
Retardo Promedio	0.001973130266

Las Figuras. 4.129 y 4.130 muestran los resultados obtenidos en *TraceGraph* de la suma acumulada del número de paquetes y de bytes para diferentes eventos.

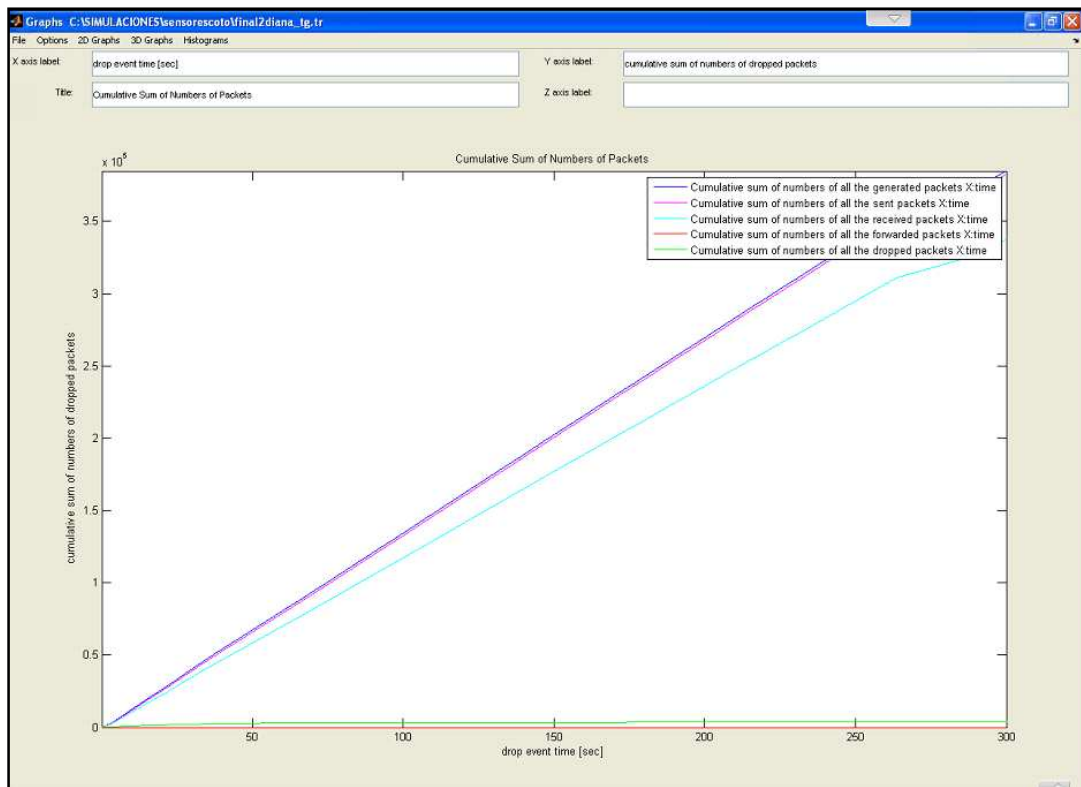


Figura. 4.129. Suma Acumulada del Número de Paquetes

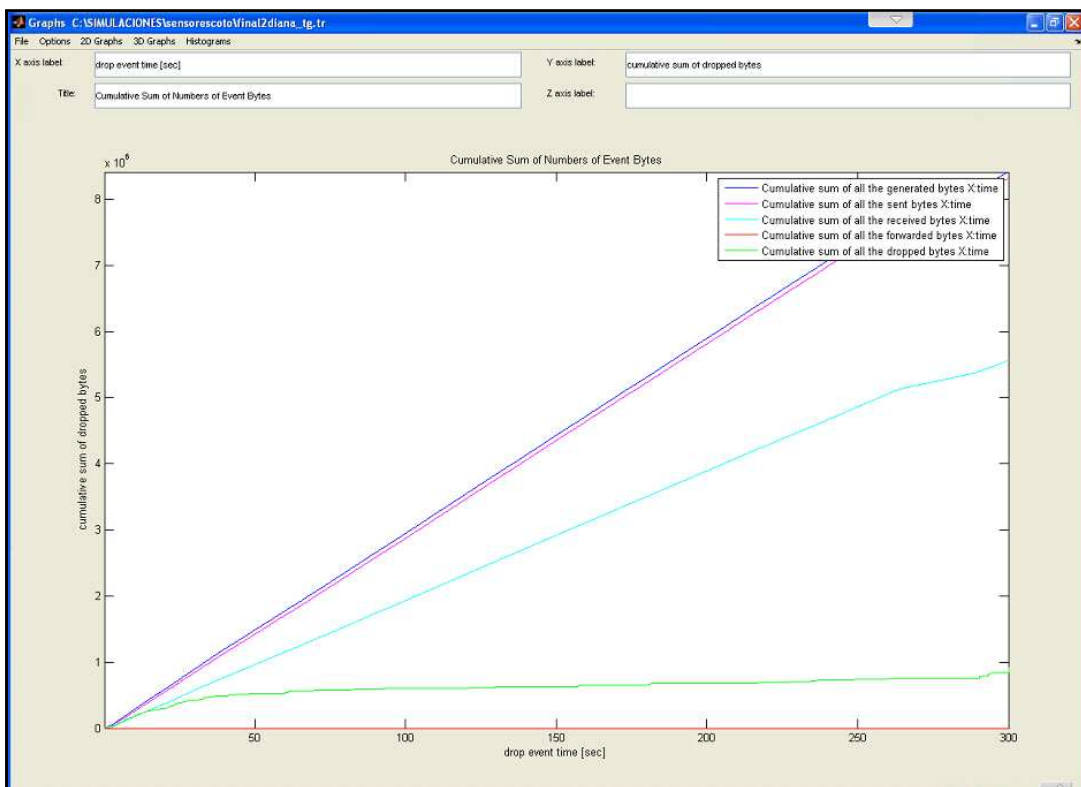


Figura. 4.130. Suma Acumulada del Número de Bytes para Diferentes Eventos

Adicionalmente, se presenta el análisis de diferentes métricas o parámetros de la red inalámbrica (estudiados en el Capítulo 3) que permiten definir su comportamiento o confiabilidad:

- **Análisis del *Throughput* de la Red**

Para establecer la cantidad de información que es entregada en un determinado tiempo sobre un canal de comunicación es necesario realizar el análisis del *Throughput* de la red, para lo cual usaremos los resultados desplegados en *Network Information* de *TraceGraph*. Adicionalmente, se calculan diferentes tipos de *Throughput* estudiados en el Capítulo 3.

El *Throughput* de la red se obtiene aplicando la ecuación (3.1):

$$\textit{Throughput de la Red} = \frac{B_{T_{Tx}}}{t_{Tx}}$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\textit{Throughput de la Red} = \frac{7579287}{299.998}$$

$$\textit{Throughput de la Red} = 25264.454 \left[\frac{\textit{Bytes}}{s} \right]$$

***Throughput* de la Red en Función al Número de Nodos**

El *Throughput* de la red en función al número de nodos se obtiene empleando la ecuación (3.2):

$$\eta = \frac{8 \cdot N_e}{T} \left[\frac{\textit{bits}}{s} \right]$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\eta = \frac{8 \cdot 7579287}{299.998}$$

$$\eta = 202115.630 \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

Throughput Real de la Red en Función al Número de Nodos

Para determinar el *Throughput* real de la red en función al número de nodos se utiliza la ecuación (3.3):

$$\eta' = \frac{8 \cdot N_e \cdot (1 - r)}{\tau} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

Donde:

$$r = \frac{P_p}{P_e}$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\eta' = \frac{8 \cdot 7579287 \cdot (1 - r)}{299.998}$$

$$r = \frac{43462}{382196}$$

$$r = 0.114$$

$$\eta' = \frac{8 \cdot 7579287 \cdot (1 - 0.114)}{299.998}$$

$$\eta' = 179131.743 \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

Throughput Normalizado de la Red en Función al Número de Nodos

El *Throughput* normalizado de la red en función al número de nodos se define en base a la ecuación (3.5):

$$\frac{\eta'}{\eta} = (1 - r)$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\frac{\eta'}{\eta} = (1 - 0.114)$$

$$\frac{\eta'}{\eta} = 0.886$$

El *Throughput* de la red función al número de nodos alcanza un valor de 202115.630 $\left[\frac{\text{bits}}{\text{s}}\right]$, que en relación a la velocidad de transmisión teórica de 250 [kbps], representa el 80.85% de la capacidad máxima de la red, por lo cual los resultados son muy aceptables para una futura implementación de la red. Sin embargo, existen periodos de tiempo en los cuales el rendimiento de la red decrece notablemente.

A continuación, se muestran en las Figuras. 4.131, 4.132, 4.133, 4.134 y 4.135, los resultados y análisis del *Throughput* obtenidas de la herramienta *TraceGraph*:

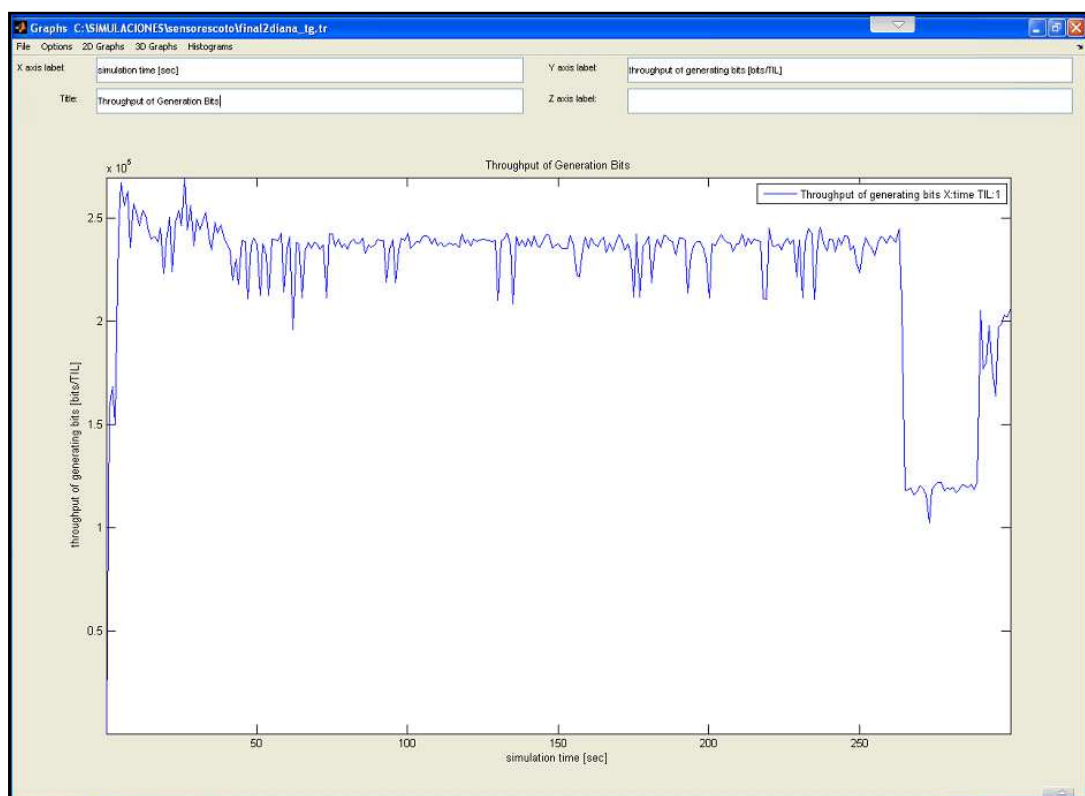


Figura. 4.131. *Throughput* de los Bits Generados

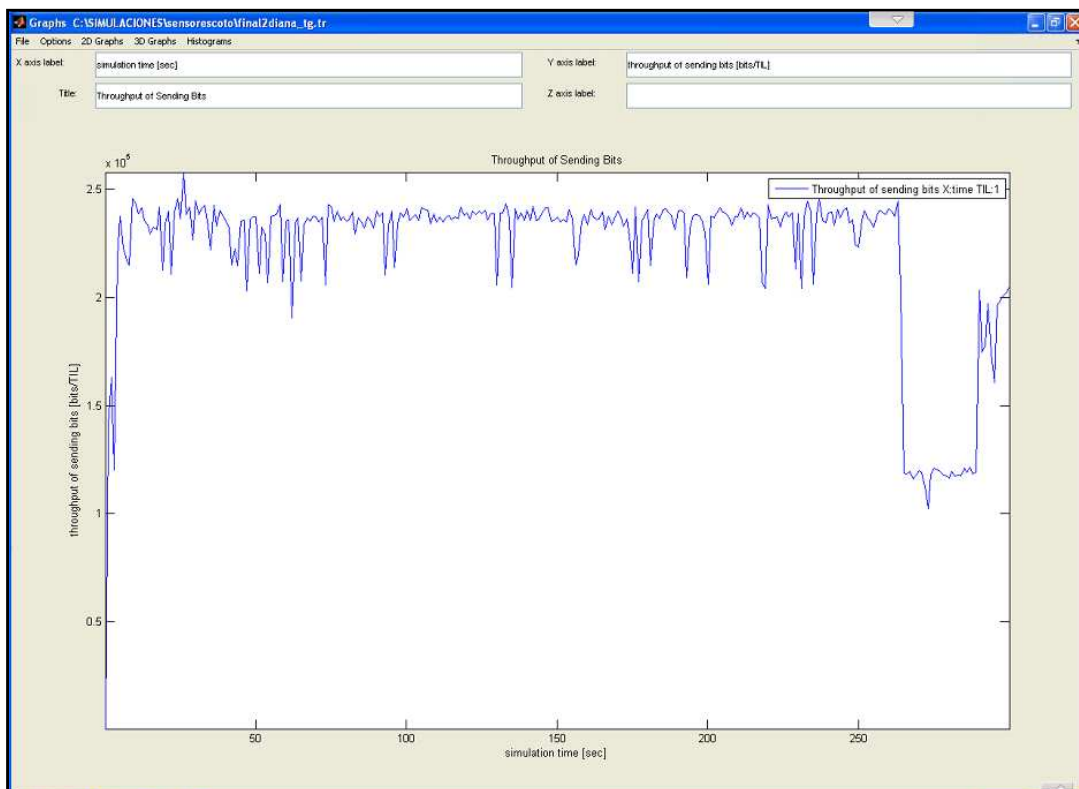


Figura. 4.132. *Throughput* de los Bits Enviados

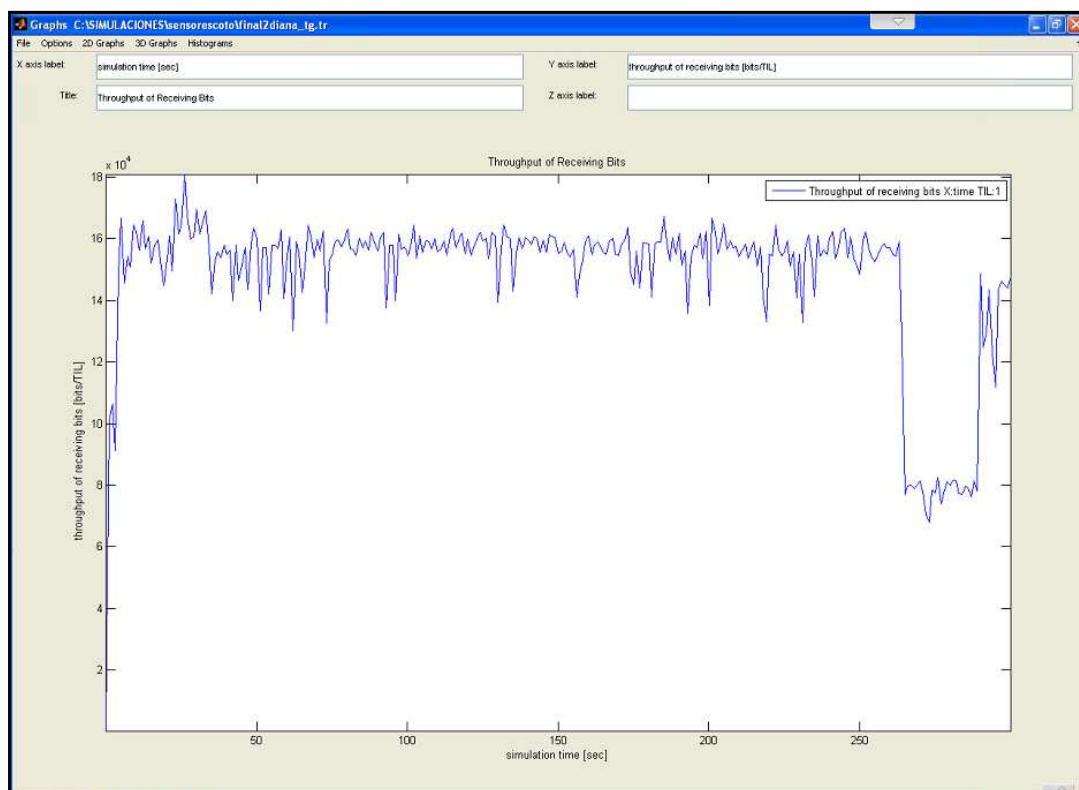


Figura. 4.133. *Throughput* de los Bits Recibidos

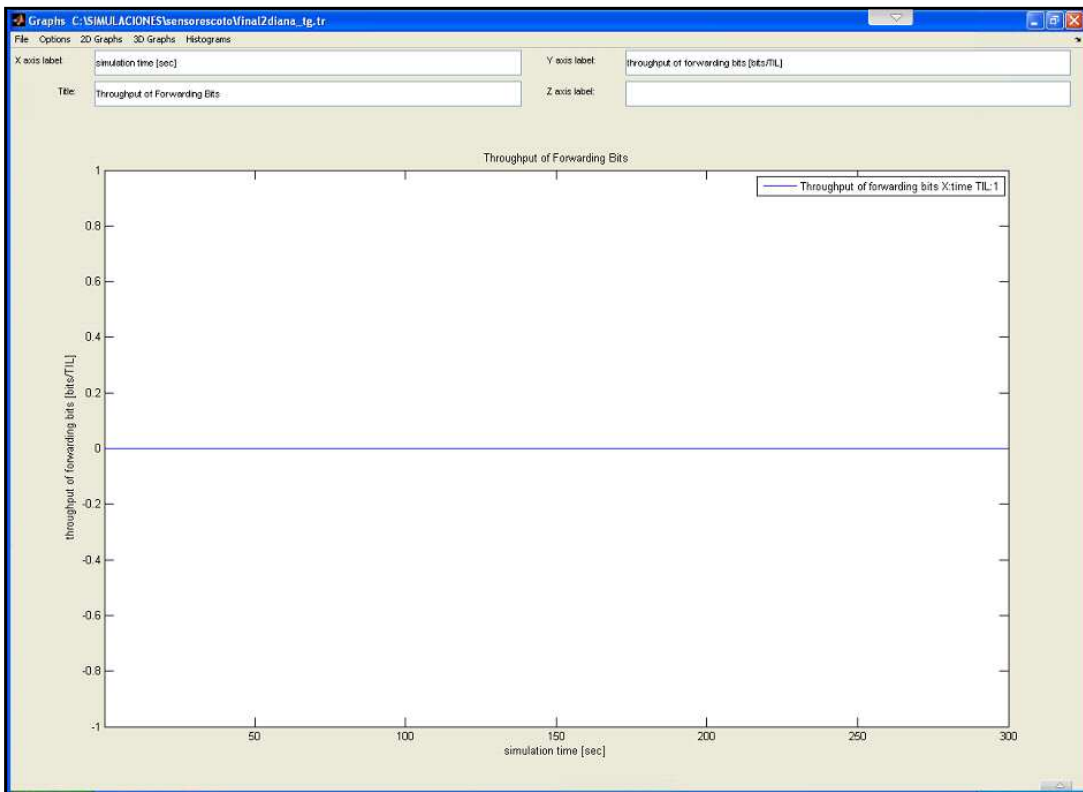


Figura. 4.134. *Throughput* de los Bits Reenviados

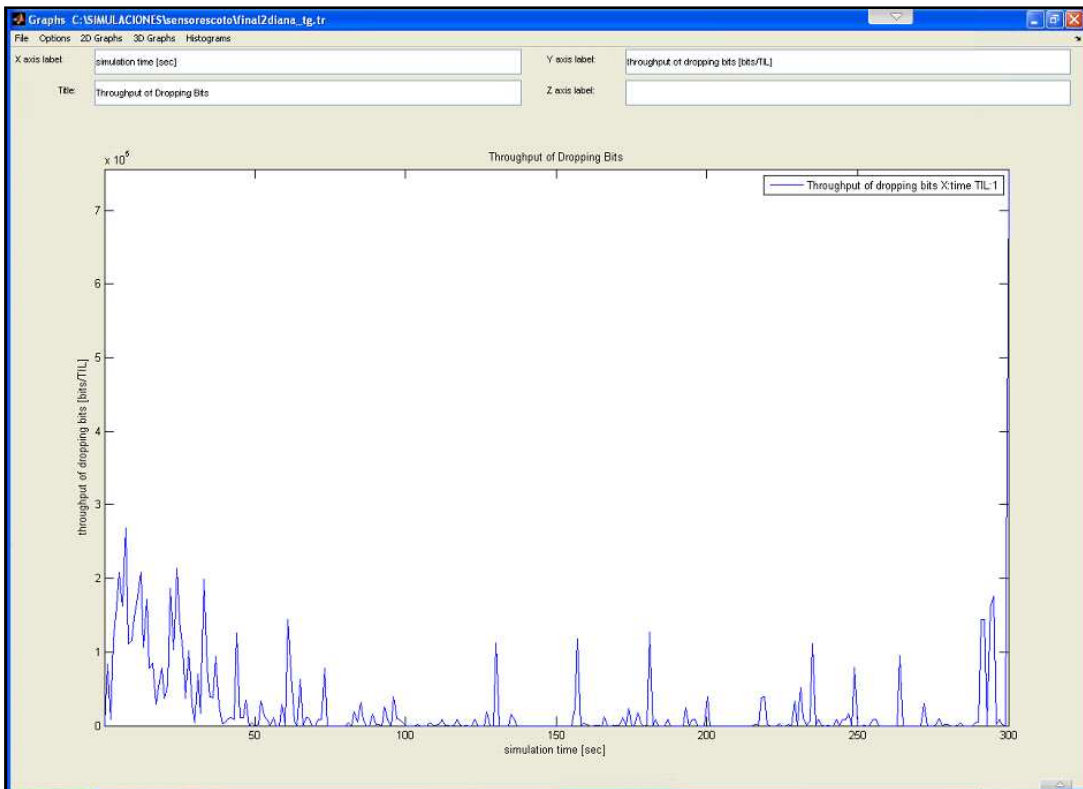


Figura. 4.135. *Throughput* de los Bits Caídos

- **Análisis del *Delay End-to-End***

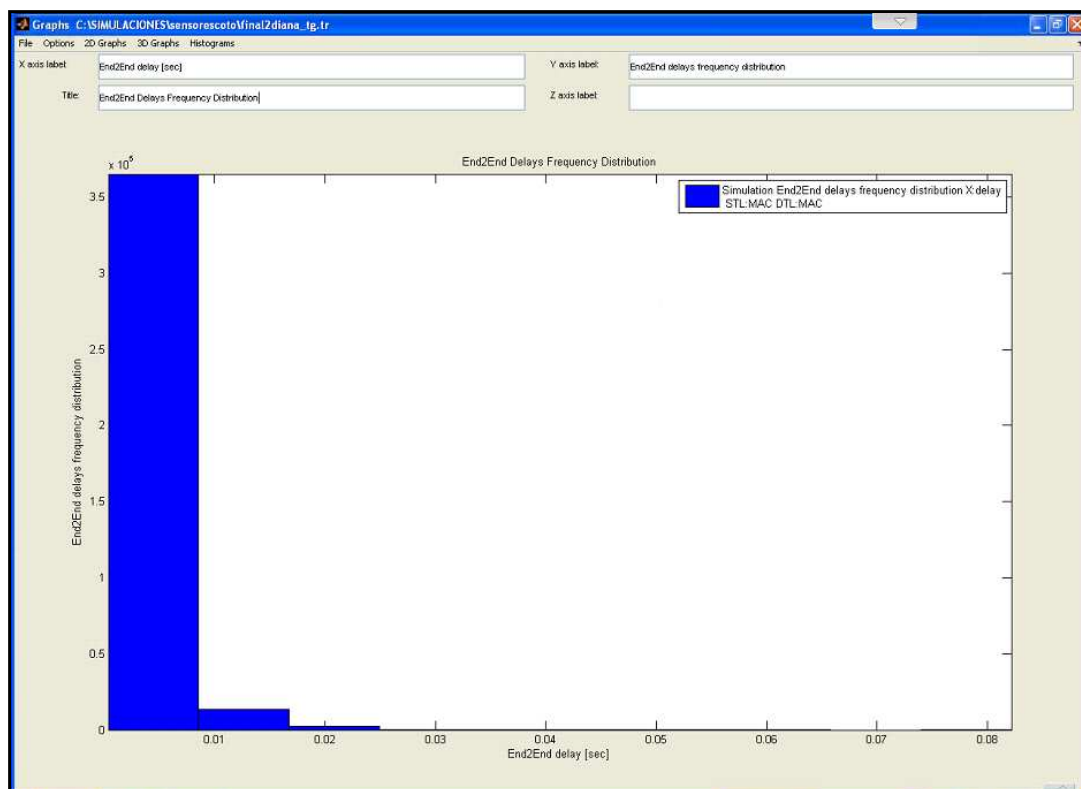


Figura. 4.136. Distribución de Frecuencia de *Delay End-To-End*

Para el análisis del parámetro *Delay End-To-End* se tomaron directamente los valores resultantes del *Network Information* de *TraceGraph*, por lo que no es necesaria la realización de cálculos adicionales. Además, la Figura. 4.136 muestra el histograma de la distribución de la frecuencia de *Delay End-To-End* para el Caso I obtenido del software antes mencionado.

En la Tabla. 4.49 se muestran los datos obtenidos para el Caso I:

Tabla. 4.49. Información del *Delay End-To-End* para el Caso I

<i>Delay End-to-End</i>	
Retardo Mínimo	0.000352164
Retardo Máximo	0.082180341
Retardo Promedio	0.001973130266

- **Análisis de *Delivery Ratio* de la Red**

El análisis del *Delivery Ratio* o relación de entrega permite determinar el nivel de congestión de la red, por lo que este parámetro tiene gran importancia en la definición del desempeño de los paquetes. Para su cálculo se aplica la ecuación (3.7):

$$Delivery\ Ratio(\%) = \frac{Número\ de\ Paquetes\ Recibidos}{Número\ de\ Paquetes\ Enviados} \cdot 100\%$$

$$Delivery\ Ratio(\%) = \frac{338734}{382196} \cdot 100\%$$

$$Delivery\ Ratio(\%) = 88.63\%$$

La Tabla. 4.50 muestra en detalle los valores obtenidos del análisis de *Delivery Ratio* para el Caso I.

Tabla. 4.50. Información del *Delivery Ratio* para el Caso I

<i>Delivery Ratio</i>	
Número de Nodos	16
Número de Paquetes Enviados	382196
Número de Paquetes Recibidos	338734
<i>Delivery Ratio</i> (%)	88.63

Como se puede apreciar en la Tabla. 4.50, el número de paquetes enviados es mayor al número de paquetes recibidos, sin embargo, el parámetro de *Delivery Ratio* es favorable para el desempeño de la red.

- **Análisis de la Cantidad de Paquetes**

Es importante el análisis de la cantidad de paquetes, ya que cada red se comporta de manera diferente y es preciso conocer si los parámetros se han establecidos correctamente, así como el modelo de propagación escogido sea el más óptimo. En la Tabla. 4.51 y en la Figura. 4.137 se muestran el número de paquetes generados, enviados, recibidos, perdidos y caídos resultantes de la simulación para el Caso I.

Tabla. 4.51. Número de Paquetes para el Caso I

CANTIDAD DE PAQUETES	
Número de Nodos	16
Número de Paquetes Generados	384803
Número de Paquetes Enviados	382196
Número de Paquetes Recibidos	338734
Número de Paquetes Perdidos	43462
Número de Paquetes Caídos	4931

El escenario de simulación ha generado 384803 paquetes, de los cuales se han enviado un total de 382196 paquetes. Sin embargo, la cantidad de paquetes que llegaron a su destino de forma exitosa fue de 338734, por consiguiente, una parte de los paquetes que fueron enviados por la red se pudieron caer o perder. La cantidad de paquetes caídos es de 4931, dicha falla se produce cuando un paquete no puede ser entregado debido a que los almacenadores intermedios estaban llenos, por lo que el receptor puede solicitar la retransmisión de dicho paquete. Mientras que la cantidad de paquetes perdidos corresponde a 43462, y se refiere a aquellos paquetes que nunca llegaron a su destino debido a fallas en el sistema.

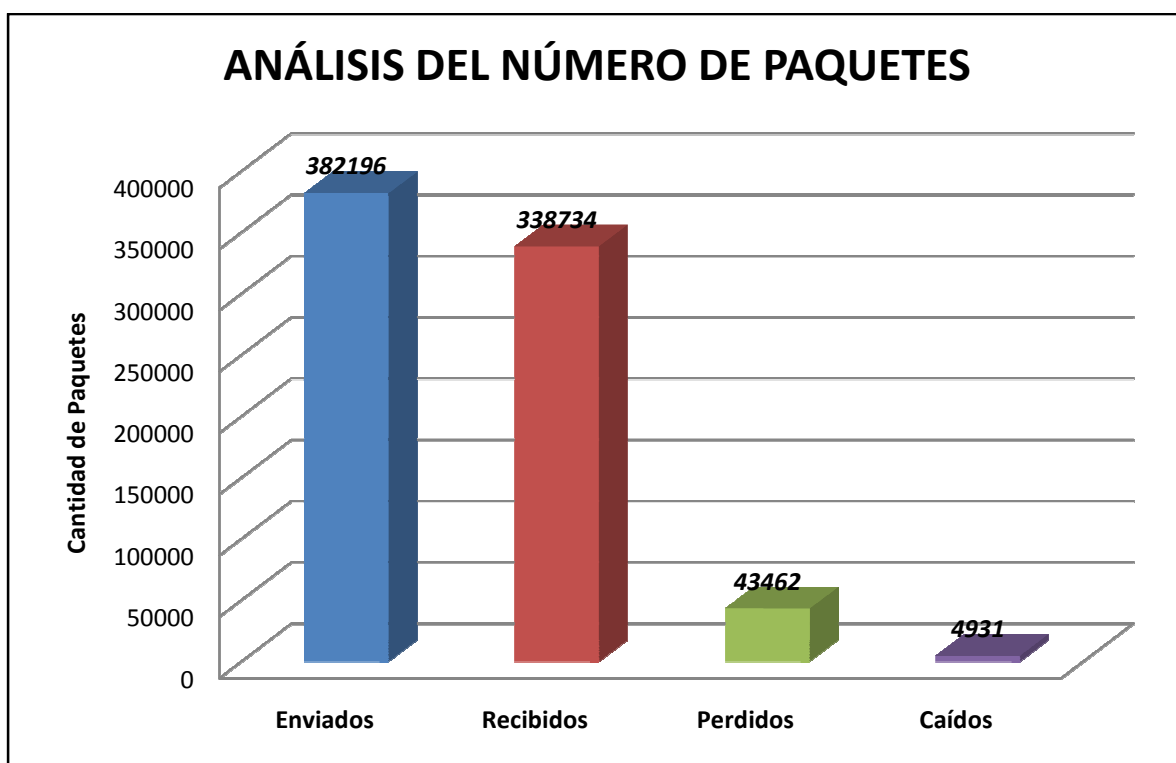


Figura. 4.137. Análisis de los Paquetes para el Caso I

Como se puede apreciar en la Figura. 4.137, el porcentaje más alto de paquetes corresponde a los enviados, sin embargo, los valores de paquetes recibidos, perdidos y caídos son aceptables para el buen funcionamiento y desempeño de la red.

La Tabla. 4.52 muestra los resultados del desempeño de cada uno de los nodos:

Tabla. 4.52. Comportamiento de Cada Nodo WSN para una Potencia de Transmisión de 60 [mW]

RESULTADO DE LA PARTICIPACIÓN DE LOS NODOS EN LA SIMULACIÓN PARA UNA POTENCIA DE TRANSMISIÓN DE 60 [mW]																
NODO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Número de paquetes generados	32	209	85108	99453	295	33	4654	6395	6833	440	77	3372	82025	7885	91843	339
Número de paquetes enviados	7	169	84798	99229	281	33	453	6212	6574	378	37	3128	81740	7725	91536	292
Número de paquetes reenviados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Número de paquetes recibidos	454	188	75334	87638	319	225	470	6160	6431	975	481	3291	72405	6843	80695	493
Número de paquetes caídos	231	34	461	516	90	6	82	358	304	378	509	593	345	399	386	239
Número de paquetes perdidos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de bytes enviados	203	4415	2407902	2821617	4213	5885	10893	94192	176624	10242	671	45604	1235896	117663	1381974	4490
Número de bytes reenviados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0
Número de bytes recibidos	20057	3525	809791	929030	8858	10760	10893	148264	88996	31840	20417	82039	1633927	158159	1816224	16203
Número de bytes caídos	11137	1371	18067	15209	22973	330	9017	145191	42629	29103	33213	149699	187019	77679	150559	36309
Tamaño mínimo del paquete	5	5	5	5	5	28	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Tamaño máximo del paquete	48	48	48	64	48	55	48	48	48	48	48	48	48	64	64	64
Promedio del tamaño del paquete	43.9479	22.2409	20.094	20.0712	21.785	50.1355	21.571	19.5972	20.4245	31.1123	40.7168	19.8852	18.6177	18.9334	18.5692	26.3605

	Valor máximo
	Valor mínimo

CASO II:

La simulación se establece bajo el modelo de propagación *TwoRayGround*, se genera una tasa de transmisión con la aplicación CBR y contiene el protocolo TCP de transporte de información, dichos parámetros permitirán simular las condiciones del sistema WSN.

Las características de simulación para el Caso II se presentan en la Tabla. 4.53:

Tabla. 4.53. Características de la Red de Sensores para el Caso II

SIMULACIÓN EN NS-2	
Tipo de Canal	WirelessChannel
Modelo de Radio Propagación	TwoRayGround
Network Interface	802.15.4
MAC	802.15.4
Interface Queue*	DropTail/PriQueue
Tipo de Antena	Omnidireccional
Máximo Número de Paquetes	150*
Número de Nodos	16
Protocolo de Enrutamiento	AODV
Capa de Transporte	TCP
Capa de Aplicación	CBR
Umbral de Captura	10 [dB]
Umbral de Sensado de Portadora	1.97753906e-13 [W]
Umbral de Recepción	1.97753906e-13 [W]
Potencia de Transmisión	0.001 [W]
Frecuencia de Transmisión	2.4 [GHz]
Pérdidas	1 [dB]
Ganancia de la Antena de Transmisión	1 [dBi]
Ganancia de la Antena de Recepción	1 [dBi]
Tamaño del Paquete	127 [Bytes]
Tasa de Transmisión	250 [kbps]
Tiempo de Simulación	300 [s]
Área	2000 x 250 [m]

- **Cálculo de la Potencia de Recepción en Base a la Propagación *Two Ray Ground***

Para el desarrollo de la simulación es necesario determinar el valor de la potencia de recepción bajo el modelo de propagación *TwoRayGround*:

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

Donde:

Tabla. 4.54. Características de la Simulación

CARACTERÍSTICA	DEFINICIÓN	VALOR
Distancia [m]	d	400
Altura de la antena de recepción [m]	h_{Rx}	1.5
Altura de la antena de transmisión [m]	h_{Tx}	1.5
Factor de pérdidas por propagación [dB]	L	1
Ganancia de la antena de recepción [dBi]	G_{Rx}	1
Ganancia de la antena de transmisión [dBi]	G_{Tx}	1
Potencia de transmisión [mW]	P_{Tx}	1

A continuación, se reemplazan los valores en la ecuación y se obtiene:

$$P_{Rx}(d) = \frac{0.001 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (1.5)^2 \cdot (1.5)^2}{(400)^4 \cdot 1}$$

$$P_{Rx}(d) = 1.9775 \cdot 10^{-13} [W]$$

- **Resultados**

Para la ejecución de la simulación de la tecnología WSN - Caso II basada en el estándar IEEE 802.15.4 se sigue el procedimiento anteriormente descrito:

La Figura. 4.138 muestra apertura del programa con extensión *.tcl* y la comprobación de NS-2 de la inexistencia de errores en el código:

Para más información del código de simulación desarrollado para el Caso II ver Anexo 6.

- **Análisis del Caso II**

Las características del programa creado en NS-2 permiten la creación del archivo *.tr* que con ayuda de *TraceConverter* y *TraceGraph* se pueden visualizar los datos contenidos en el archivo traza. La Tabla. 4.55 muestra los resultados obtenidos para este segundo caso:

Tabla. 4.55. Resultados Obtenidos para el Caso II

RESULTADOS OBTENIDOS	
Tiempo de Simulación	296.502 [s]
Número de Nodos	16
Número de Nodos Receptores	16
Número de Nodos Transmisores	16
Número de Paquetes Generados	178529
Número de Paquetes Enviados	176808
Número de Paquetes Recibidos	156717
Número de Paquetes Caídos	3187
Número de Paquetes Perdidos	20091
Tamaño Máximo del Paquete	79
Tamaño Mínimo del Paquete	5
Promedio del Tamaño del Paquete	19.7792
Número de Bytes Enviados	3551419
Número de Bytes Recibidos	3147865
Número de Bytes Perdidos	403554
Número de Bytes Caídos	430545
Retardo Mínimo	0.000352164
Retardo Máximo	0.057799683
Retardo Promedio	0.001995705716

Las Figuras. 4.140 y 4.141 muestran los resultados obtenidos en *TraceGraph* de la suma acumulada del número de paquetes y de bytes para diferentes eventos.

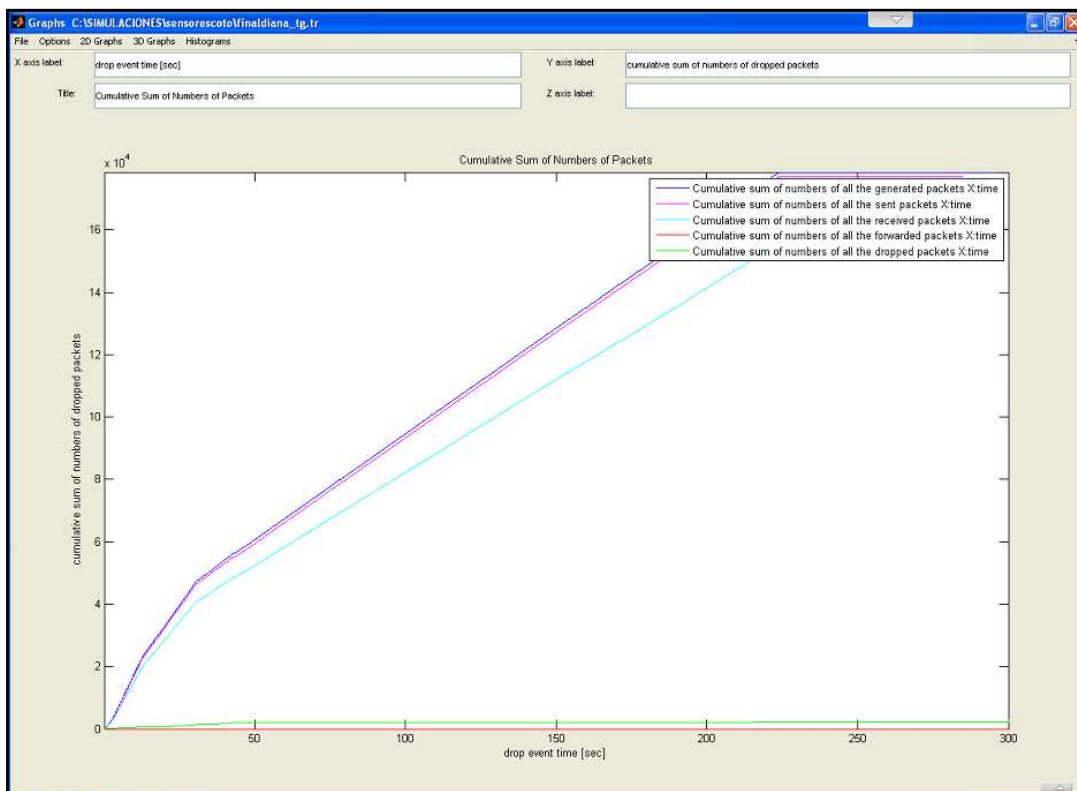


Figura. 4.140. Suma Acumulada del Número de Paquetes

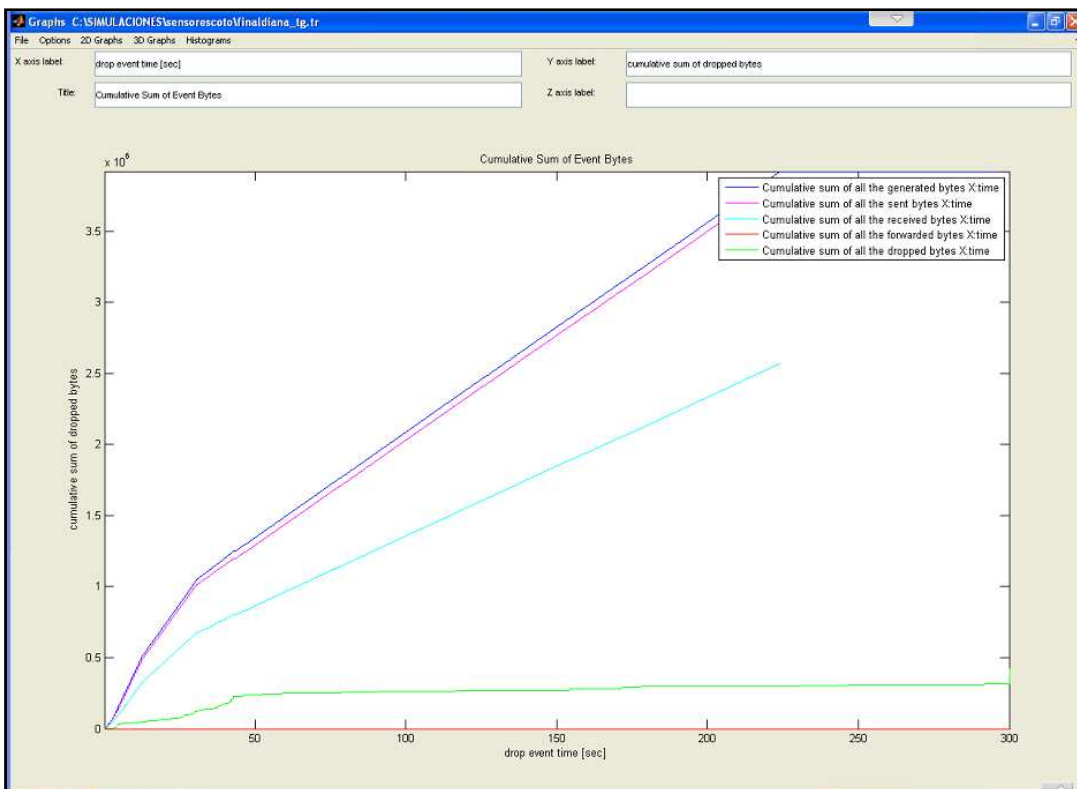


Figura. 4.141. Suma Acumulada del Número de Bytes para Diferentes Eventos

Adicionalmente, se presenta el análisis de diferentes métricas o parámetros de la red inalámbrica (estudiados en el Capítulo 3) que permiten definir su comportamiento o confiabilidad:

- **Análisis del *Throughput* de la Red**

Para establecer la cantidad de información que es entregada en un determinado tiempo sobre un canal de comunicación es necesario realizar el análisis del *Throughput* de la red, para lo cual usaremos los resultados desplegados en *Network Information* de *TraceGraph*. Adicionalmente, se calculan diferentes tipos de *Throughput* estudiados en el Capítulo 3.

El *Throughput* de la red se obtiene aplicando la ecuación (3.1):

$$\textit{Throughput de la Red} = \frac{B_{Tx}}{t_{Tx}}$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\textit{Throughput de la Red} = \frac{3551419}{296.502}$$

$$\textit{Throughput de la Red} = 11977.738 \left[\frac{\textit{Bytes}}{s} \right]$$

***Throughput* de la Red en Función al Número de Nodos**

El *Throughput* de la red en función al número de nodos se obtiene empleando la ecuación (3.2):

$$\eta = \frac{8 \cdot N_e}{\tau} \left[\frac{\textit{bits}}{s} \right]$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\eta = \frac{8 \cdot 3551419}{296.502}$$

$$\eta = 95821.907 \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

Throughput Real de la Red en Función al Número de Nodos

Para determinar el *Throughput* real de la red en función al número de nodos se utiliza la ecuación (3.3):

$$\eta' = \frac{8 \cdot N_e \cdot (1 - r)}{\tau} \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

Donde:

$$r = \frac{P_p}{P_e}$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\eta' = \frac{8 \cdot 3551419 \cdot (1 - r)}{296.502}$$

$$r = \frac{20091}{176808}$$

$$r = 0.114$$

$$\eta' = \frac{8 \cdot 3551419 \cdot (1 - 0.114)}{296.502}$$

$$\eta' = 84933.498 \left[\frac{\text{bits}}{\text{s}} \right]$$

Throughput Normalizado de la Red en Función al Número de Nodos

El *Throughput* normalizado de la red en función al número de nodos se define en base a la ecuación (3.5):

$$\frac{\eta'}{\eta} = (1 - r)$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$\frac{\eta'}{\eta} = (1 - 0.114)$$

$$\frac{\eta'}{\eta} = 0.886$$

El *Throughput* de la red función al número de nodos alcanza un valor de 95821.907 $\left[\frac{\text{bits}}{\text{s}}\right]$, el cual es menor en comparación al caso en que se aplicó una potencia de 60 [mW]. Además, el rendimiento de la red presenta una oscilación decreciente a medida que transcurre el tiempo de simulación.

A continuación, se muestra en las Figuras. 4.142, 4.143, 4.144, 4.145 y 4.146, el análisis del *Throughput* obtenidas de la herramienta *TraceGraph*:

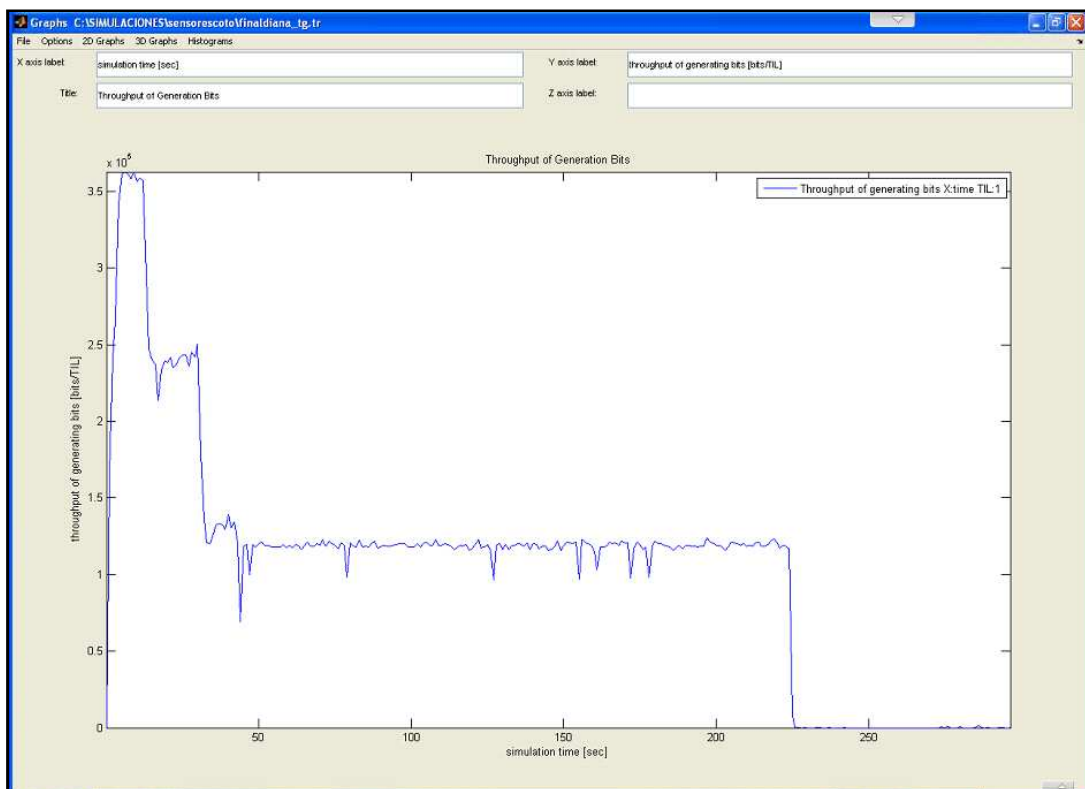


Figura. 4.142. *Throughput* de los Bits Generados

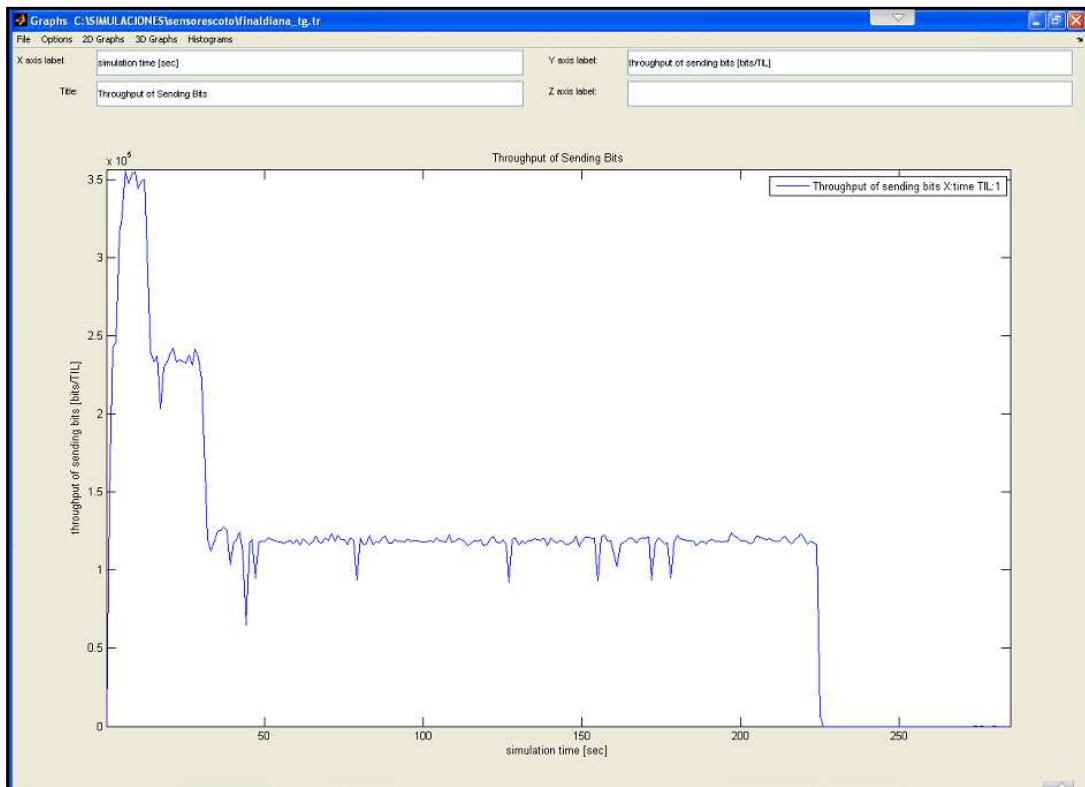


Figura. 4.143. *Throughput* de los Bits Enviados

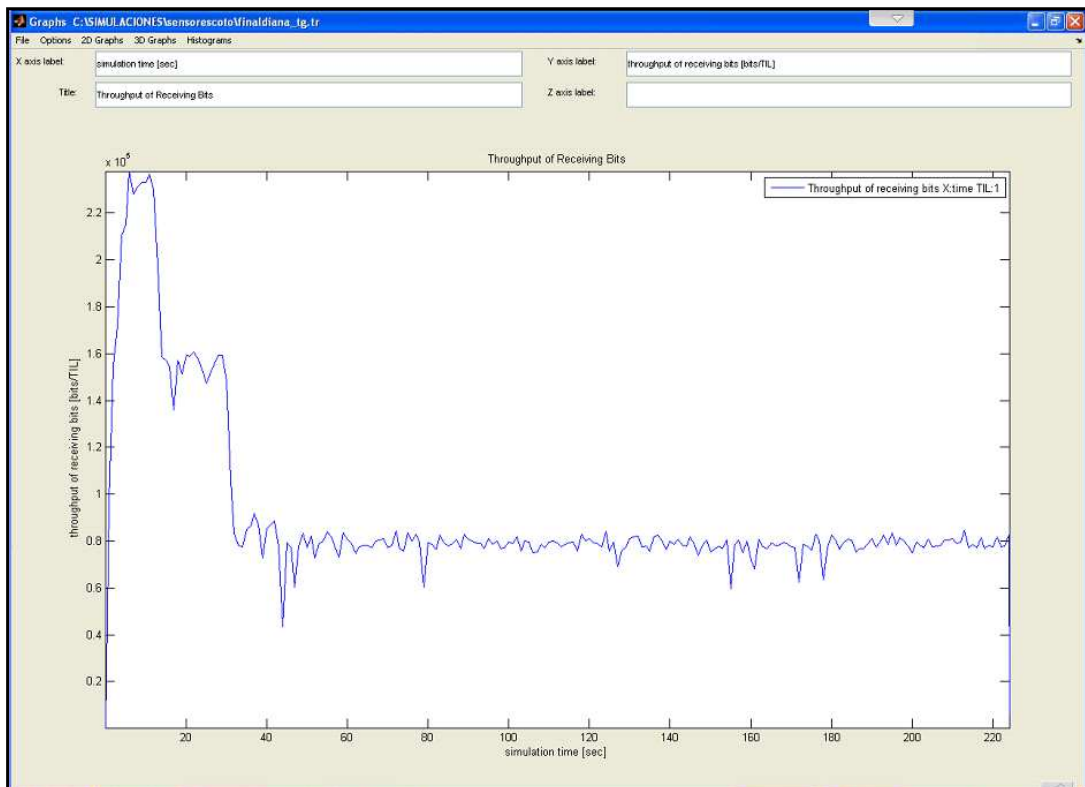


Figura. 4.144. *Throughput* de los Bits Recibidos

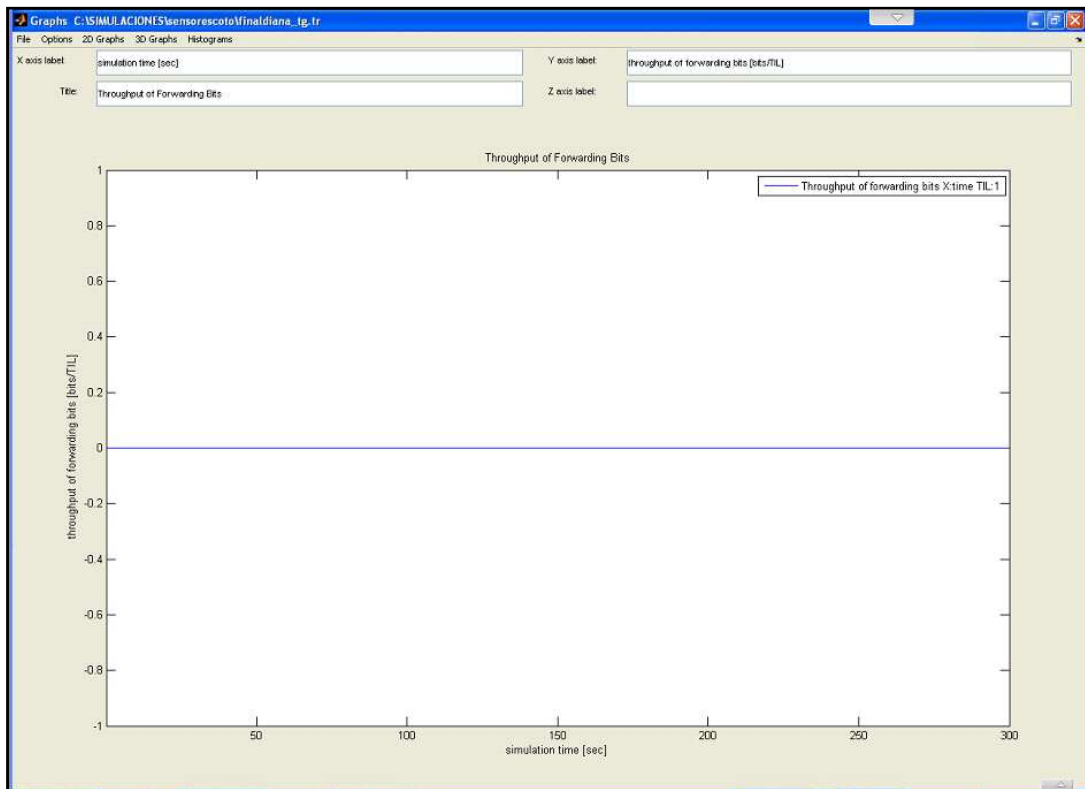


Figura. 4.145. *Throughput* de los Bits Reenviados

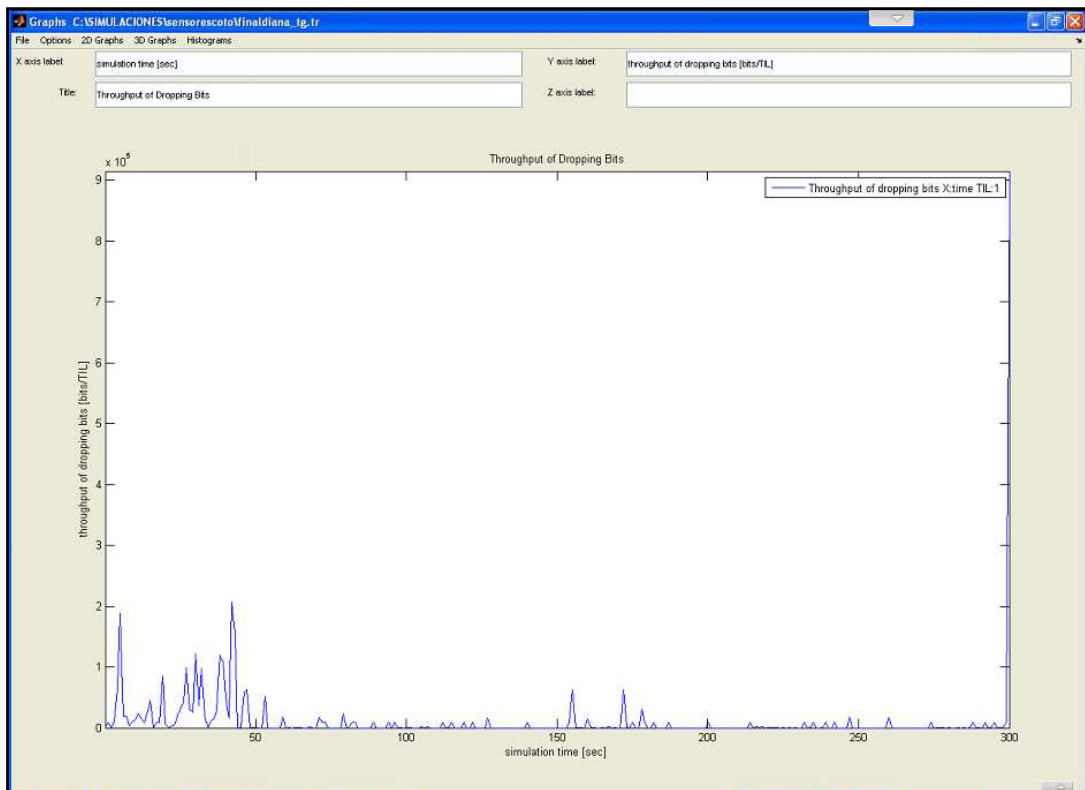


Figura. 4.146. *Throughput* de los Bits Caídos

- **Análisis del *Delay End-To-End***

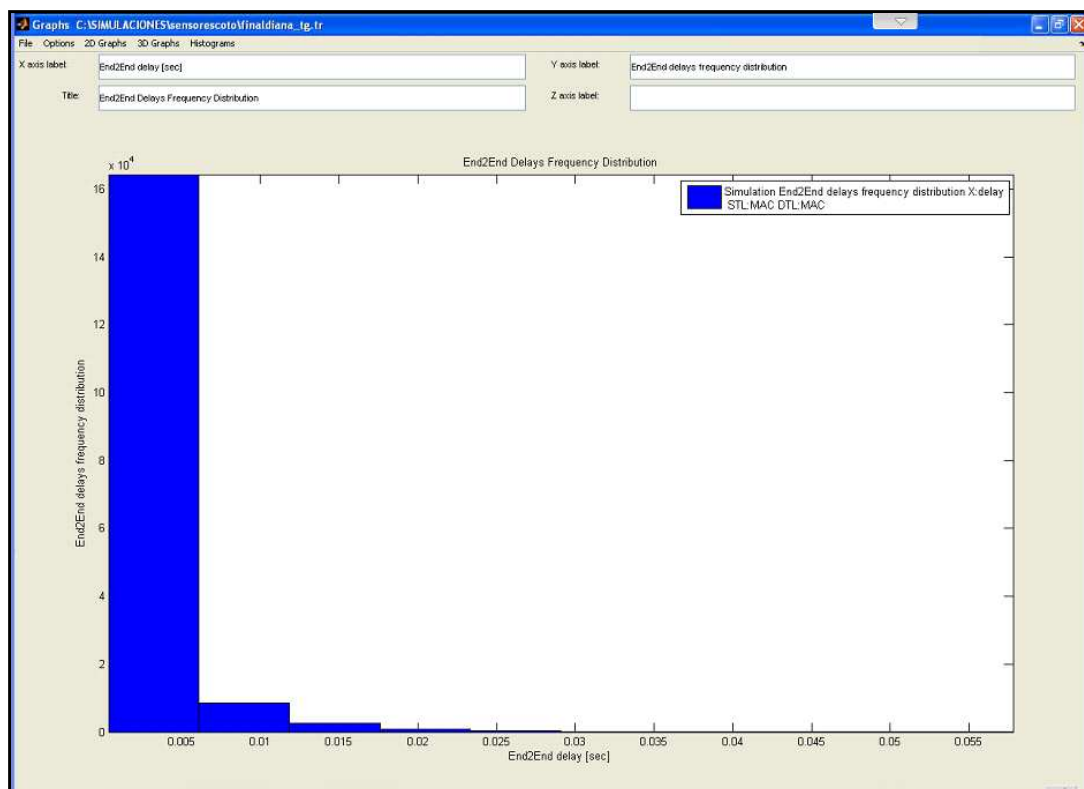


Figura. 4.147. Distribución de Frecuencia de *Delay End-To-End*

Para el análisis del parámetro *Delay End-To-End* se tomaron directamente los valores resultantes del *Network Information* de *TraceGraph*, por lo que no es necesario la realización de cálculos adicionales. Además, la Figura. 4.147 muestra el histograma de la distribución de la frecuencia de *Delay End-To-End* para el Caso II obtenido del software antes mencionado.

En la Tabla. 4.56 se muestran los datos obtenidos para el Caso II:

Tabla. 4.56. Información del *Delay End-To-End* para el Caso II

<i>Delay End-to-End</i>	
Retardo Mínimo	0.000352164
Retardo Máximo	0.018071272
Retardo Promedio	0.001718019476

- **Análisis de *Delivery Ratio* de la Red**

El análisis del *Delivery Ratio* o relación de entrega permite determinar el nivel de congestión de la red, por lo que este parámetro tiene gran importancia en la definición del desempeño de los paquetes. Para su cálculo se aplica la ecuación (3.7):

$$Delivery\ Ratio(\%) = \frac{Número\ de\ Paquetes\ Recibidos}{Número\ de\ Paquetes\ Enviados} \cdot 100\%$$

$$Delivery\ Ratio(\%) = \frac{156717}{176808} \cdot 100\%$$

$$Delivery\ Ratio(\%) = 88.64\%$$

La Tabla. 4.57 muestra en detalle los valores obtenidos del análisis de *Delivery Ratio* para el Caso II.

Tabla. 4.57. Información del *Delivery Ratio* para el Caso II

<i>Delivery Ratio</i>	
Número de Nodos	16
Número de Paquetes Enviados	176808
Número de Paquetes Recibidos	156717
<i>Delivery Ratio</i> (%)	88.64

Como se puede apreciar en la Tabla. 4.57 al igual que en el Caso I, el número de paquetes enviados es mayor al número de paquetes recibidos, sin embargo, el parámetro de *Delivery Ratio* es favorable para el desempeño de la red.

- **Análisis de la Cantidad de Paquetes**

Es importante el análisis de la cantidad de paquetes, ya que cada red se comporta de manera diferente y es preciso conocer si los parámetros se han establecidos correctamente, así como el modelo de propagación escogido sea el más óptimo. En la Tabla. 4.58 y en la Figura. 4.148 se muestran el número de

paquetes generados, enviados, recibidos, perdidos y caídos resultantes de la simulación para el Caso II.

Tabla. 4.58. Número de Paquetes para el Caso II

CANTIDAD DE PAQUETES	
Número de Nodos	16
Número de Paquetes Generados	178529
Número de Paquetes Enviados	176808
Número de Paquetes Recibidos	156717
Número de Paquetes Perdidos	20091
Número de Paquetes Caídos	3187

El escenario de simulación ha generado 178529 paquetes, de los cuales se han enviado un total de 176808 paquetes. Sin embargo, la cantidad de paquetes que llegaron a su destino de forma exitosa fue de 156717, por consiguiente, una parte de los paquetes que fueron enviados por la red se pudieron caer o perder. La cantidad de paquetes caídos es de 3187, dicha falla se produce cuando un paquete no puede ser entregado debido a que los almacenadores intermediarios estaban llenos, por lo que el receptor puede solicitar la retransmisión de dicho paquete. Mientras que la cantidad de paquetes perdidos corresponde a 20091, y se refiere a aquellos paquetes que nunca llegaron a su destino debido a fallas en el sistema.

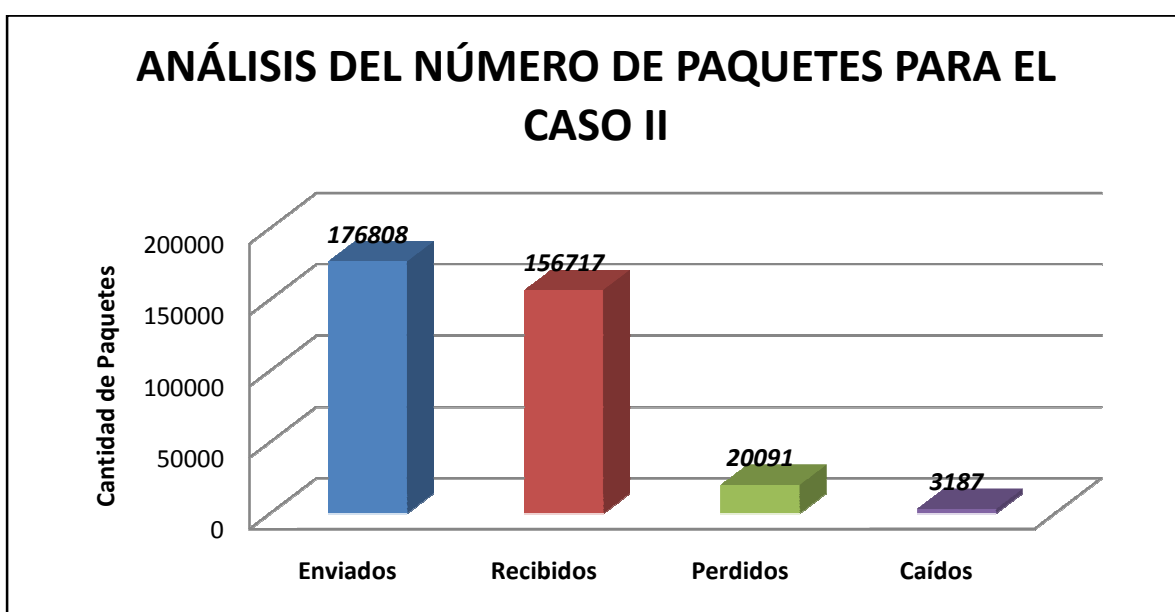


Figura. 4.148. Análisis de los Paquetes para el Caso II

Como se puede apreciar en la Figura. 4.148, el porcentaje más alto de paquetes corresponde a los enviados, sin embargo, los valores de paquetes recibidos, perdidos y caídos son aceptables para el buen funcionamiento y desempeño de la red. Este resultado se generó para los dos casos simulados, sin embargo, al usar el una potencia de 60 [mW] el porcentaje de la cantidad de paquetes recibidos es ligeramente mayor.

A continuación, la Tabla. 4.59 muestra los resultados del desempeño de cada uno de los nodos:

Tabla. 4.59. Comportamiento de Cada Nodo WSN para una Potencia de Transmisión de 1 [mW]

RESULTADO DE LA PARTICIPACIÓN DE LOS NODOS EN LA SIMULACIÓN PARA UNA POTENCIA DE TRANSMISIÓN DE 1 [mW]																
NODO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Número de paquetes generados	22	79	2483	8953	4131	32	4156	10037	73246	63521	236	6	2320	3625	5241	431
Número de paquetes enviados	3	36	2339	8866	4114	32	4146	9902	73052	63281	185	0	2152	3460	5174	361
Número de paquetes reenviados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de paquetes recibidos	390	74	2488	8052	3635	46	3669	8995	64567	55934	500	371	2301	3126	4677	458
Número de paquetes caídos	297	38	331	251	80	8	101	288	268	358	298	280	112	149	169	159
Número de paquetes perdidos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de bytes enviados	99	936	63271	251012	62744	1760	118356	149962	1235152	1801537	2893	0	32828	52646	78214	5783
Número de bytes reenviados	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Número de bytes recibidos	17634	2346	39201	93034	82926	2104	41517	210168	1352487	599590	17998	16785	57868	73077	108523	13543
Número de bytes caídos	14476	1581	23298	8381	23682	400	14508	66393	87601	13305	29413	13702	37920	34854	39932	21099
Tamaño mínimo del paquete	5	5	5	5	5	28	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Tamaño máximo del paquete	48	48	48	72	48	55	48	48	51	48	48	48	48	72	72	72
Promedio del tamaño del paquete	45.122	29.8364	21.2289	20.3361	18.7986	19.5385	20.4572	19.0575	18.8029	20.1411	30.4978	45.2426	20.3674	19.0894	18.9561	23.5971

	Valor máximo
	Valor mínimo

Comparación y Análisis del Caso I y del Caso II:

Como ya se ha explicado la diferencia entre el Caso I y el Caso II de simulación es el valor de separación entre nodos, el valor de la potencia de transmisión (60 [mW] y 1 [mW]) y el valor de la potencia de recepción, por lo cual es importante realizar un análisis de ambos escenarios para determinar las mejores condiciones de desempeño de la red WSN.

Como se puede observar en la Figura. 4.149, la cantidad de paquetes que se generan en la red es mayor al aplicar una potencia de 60 [mW].

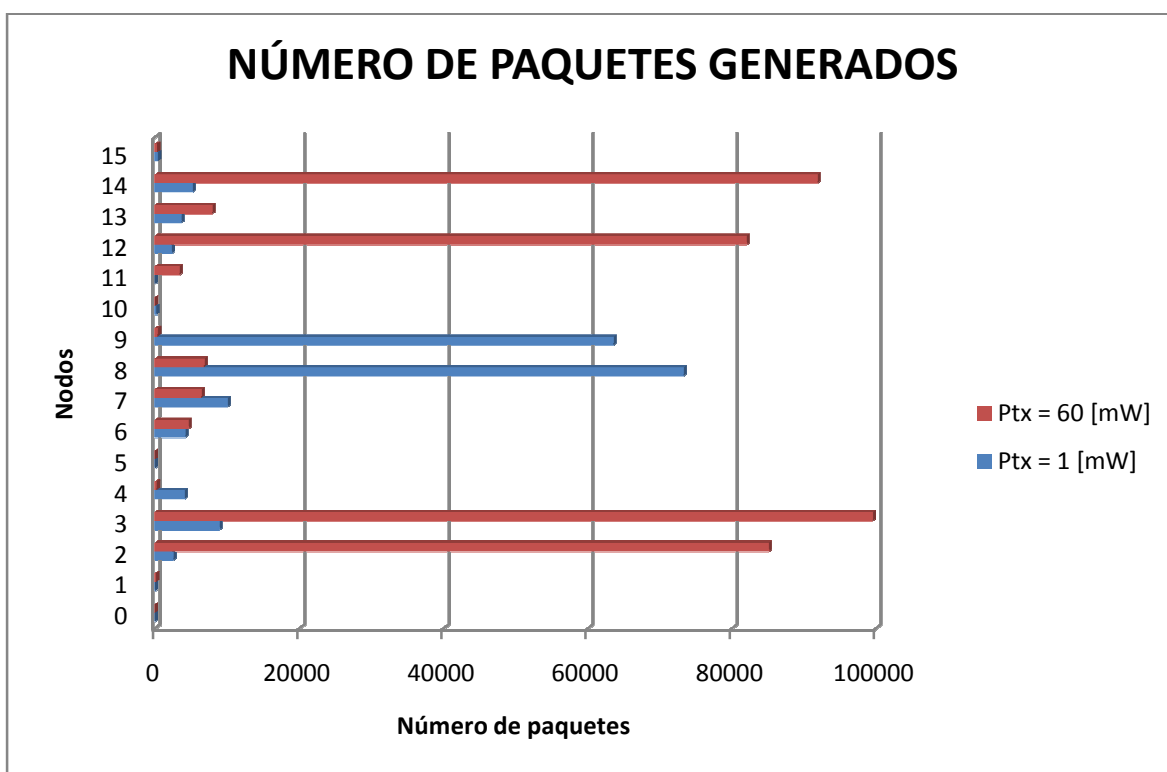


Figura. 4.149. Número de Paquetes Generados

Debido a que el Caso I presenta un mayor número de paquetes generados, este también posee un mayor porcentaje de paquetes entregados, es decir, con una potencia de 60 [mW] y con una distancia máxima de 500 [m] se envían un 116% más paquetes en comparación al aplicar una potencia de 1 [mW], esto se debe a la cantidad de información que maneja el Caso I. A continuación, las Figuras. 4.150 y 4.151 muestran el número de paquetes y bytes enviados para cada caso.

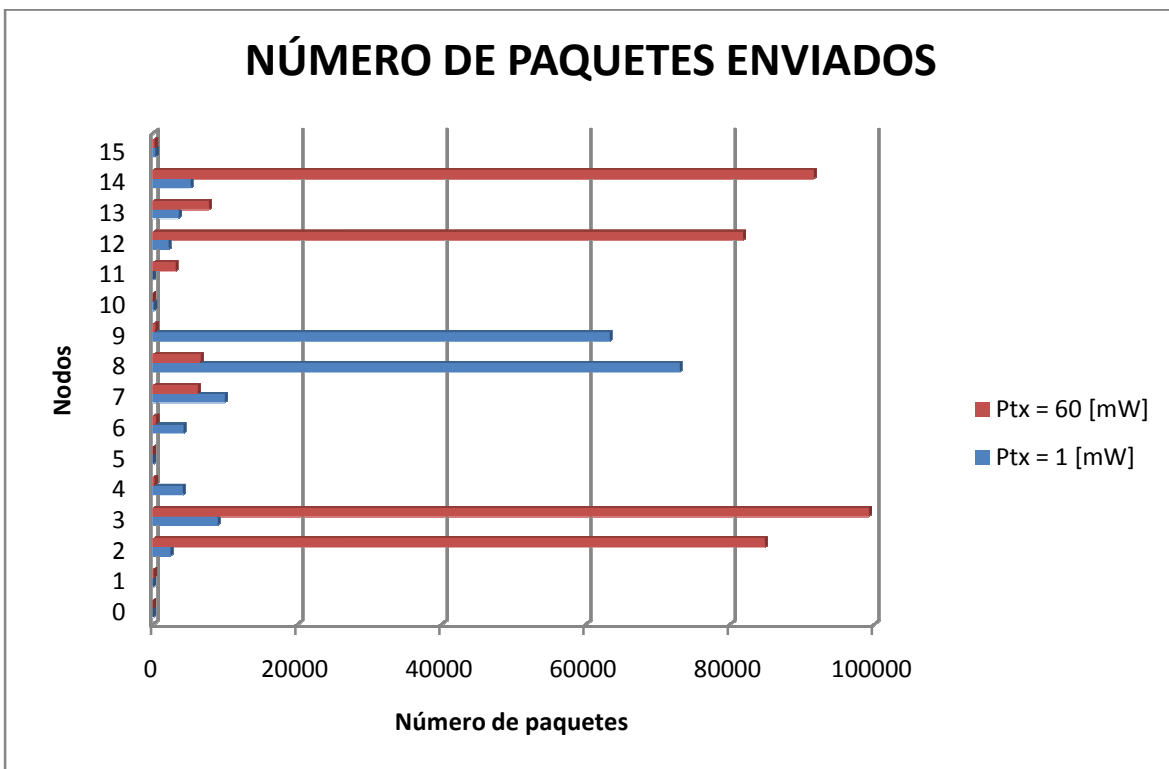


Figura. 4.150. Número de Paquetes Enviados

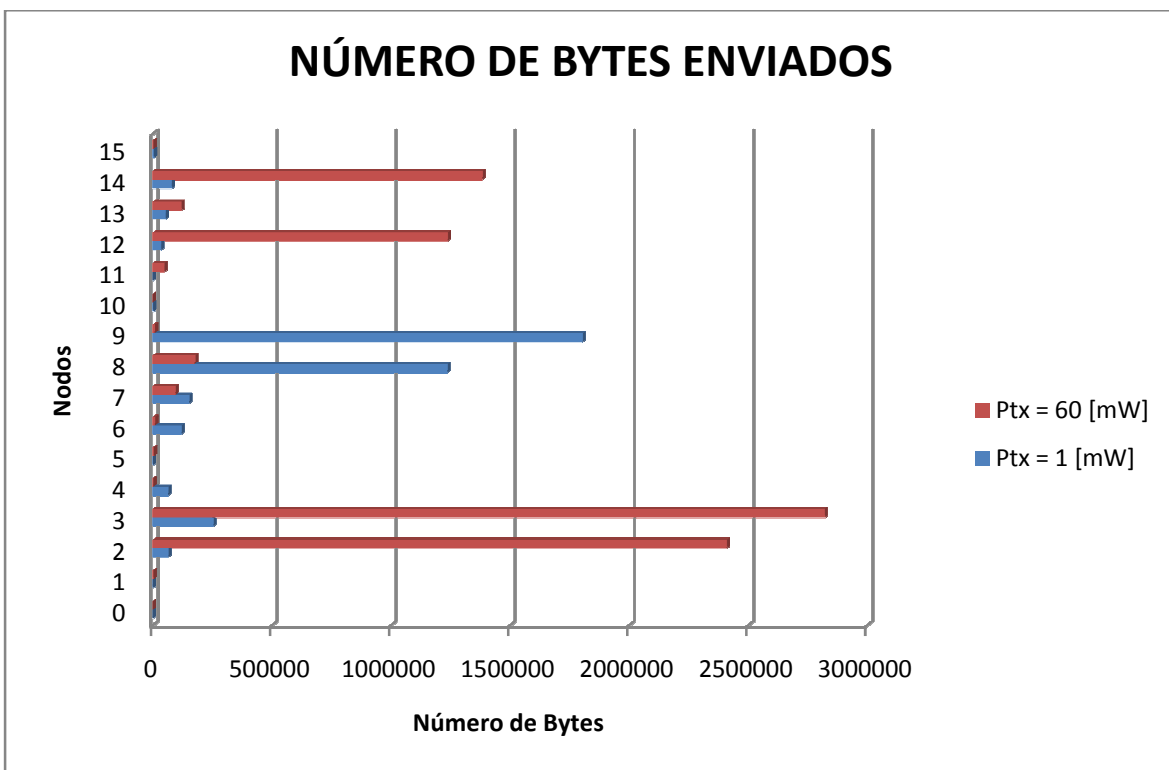


Figura. 4.151. Número de Bytes Enviados

El número de paquetes recibidos es el parámetro de mayor importancia para determinar el rendimiento de la red, por lo que se puede apreciar en la Figura. 4.152, el Caso I presenta un mayor porcentaje en comparación al número de paquetes recibidos para el Caso II, debido al alto número de paquetes enviados al aplicar una potencia de 60 [mW]. Sin embargo, el porcentaje de paquetes recibidos en cada uno de los escenarios de simulación representa más del 87%, lo que permite comprobar el buen desempeño de la red.

Las Figuras. 4.152 y 4.153 muestran el número de paquetes y bytes recibidos para cada caso.

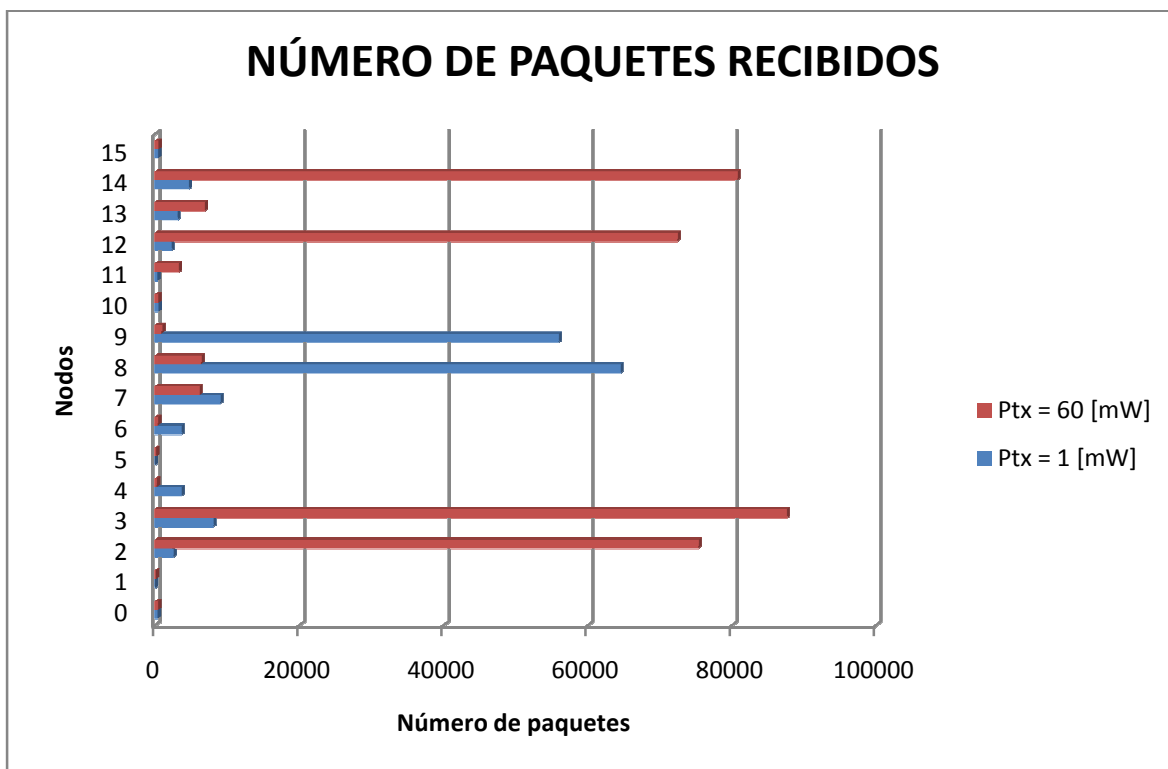


Figura. 4.152. Número de Paquetes Recibidos

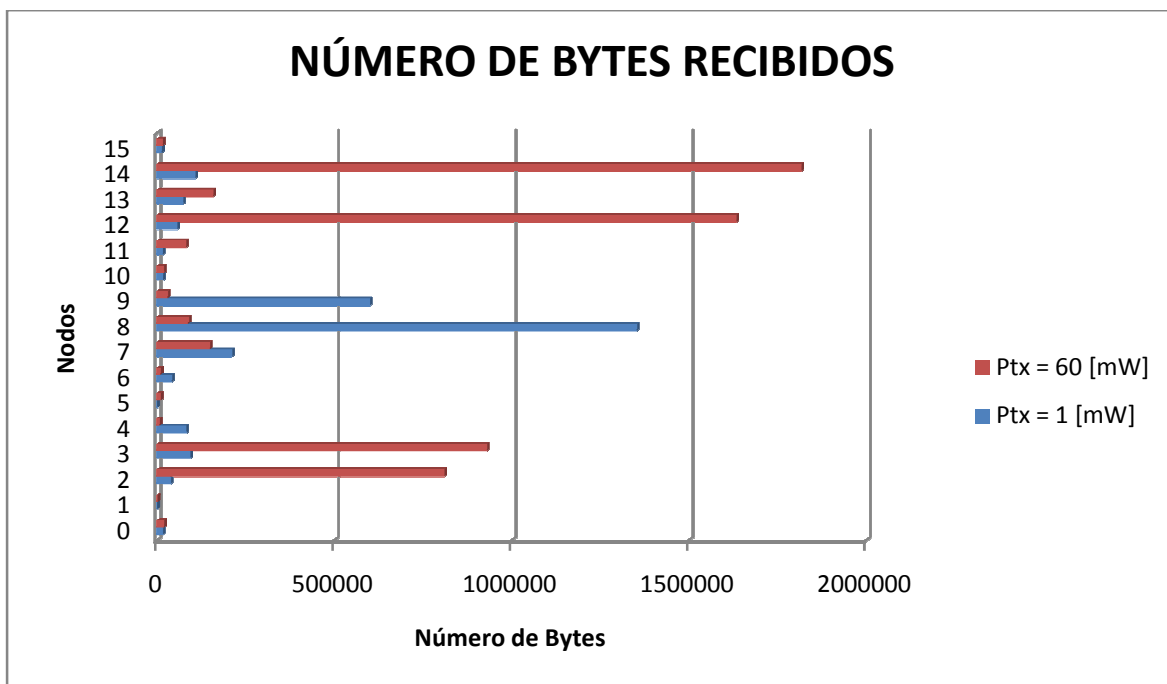


Figura. 4.153. Número de Bytes Recibidos

Ya que el Caso I posee un mayor porcentaje de paquetes recibidos, este también presenta un mayor porcentaje de paquetes caídos debido a los altos niveles de tráfico de dicho escenario. Las Figuras. 4.154 y 4.155 muestran el número de paquetes y bytes caídos para los dos casos de simulación.

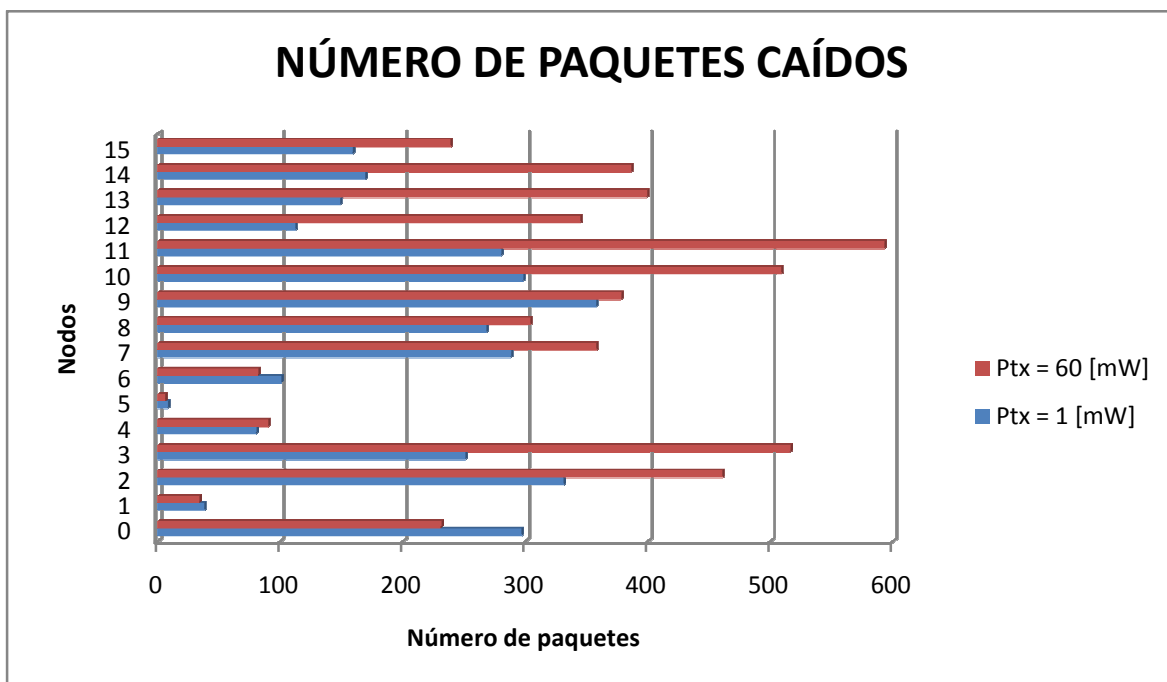


Figura. 4.154. Número de Paquetes Caídos

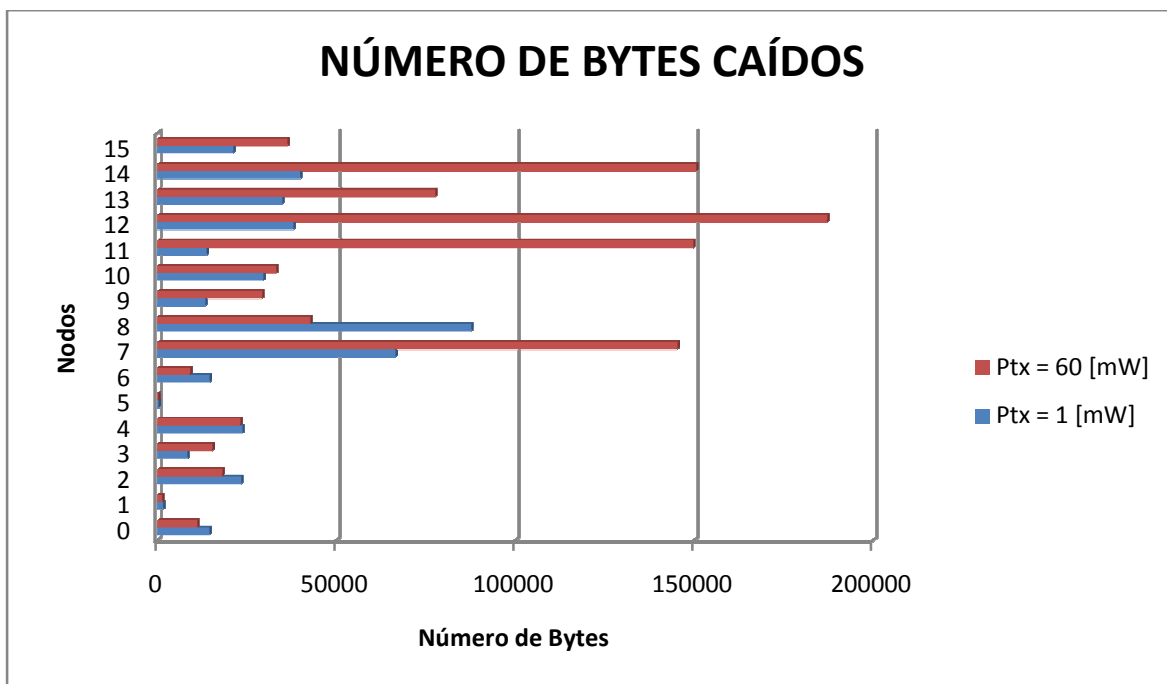


Figura. 4.155. Número de Bytes Caídos

El tamaño mínimo promedio del paquete tanto para el Caso I como para el Caso II es de 6.438. La Figura. 4.156 muestra el tamaño mínimo del paquete que se ha generado para los dos casos de simulación.

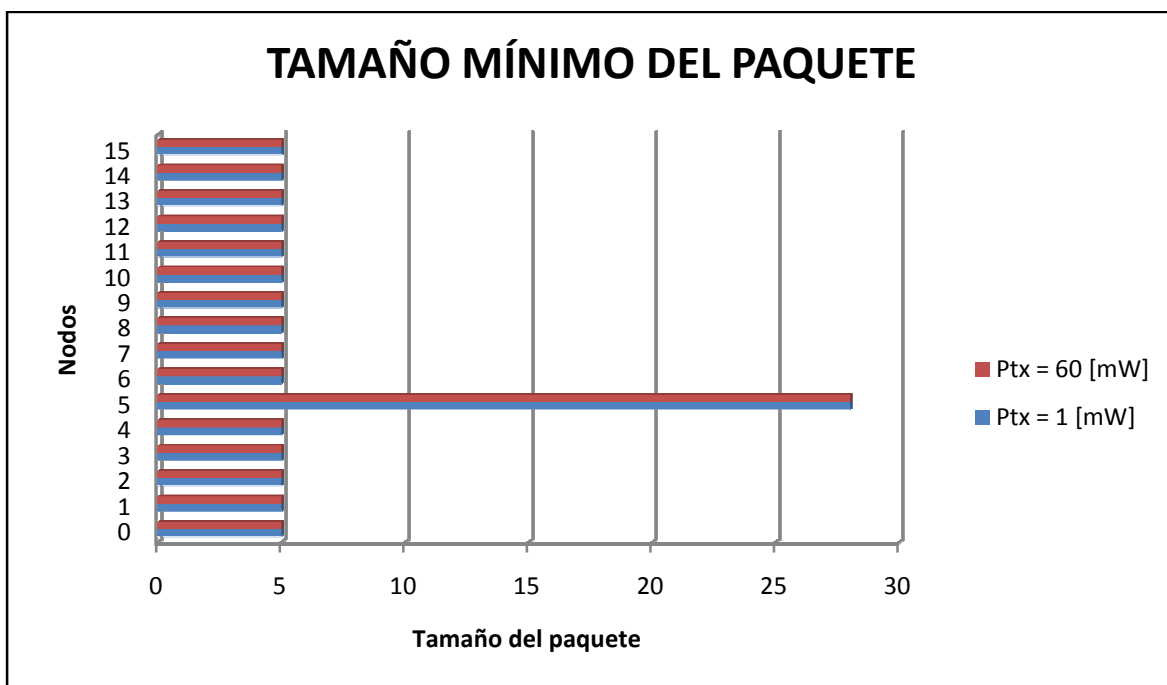


Figura. 4.156. Tamaño Mínimo del Paquete

El tamaño máximo promedio del paquete para el Caso I es de 52.438. Mientras que para el Caso II le corresponde un valor de 54.625. La Figura. 4.157 muestra el tamaño máximo del paquete que se ha generado para los dos casos de simulación.

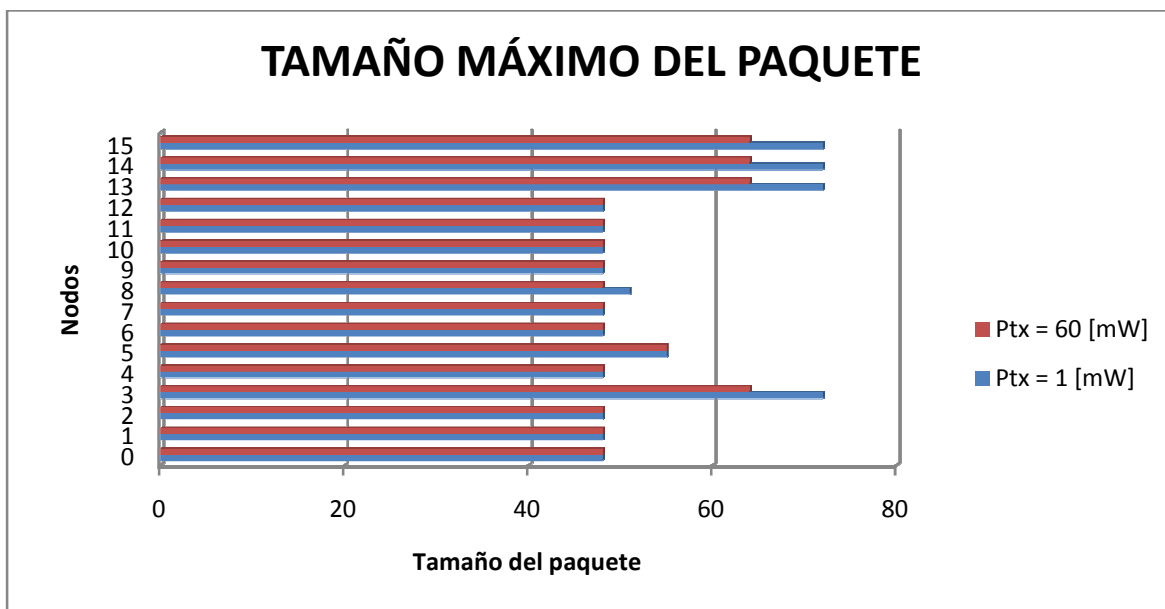


Figura. 4.157. Tamaño Máximo del Paquete

A continuación, la Figura. 4.158 presenta los valores del tamaño promedio obtenidos para los dos casos de simulación:

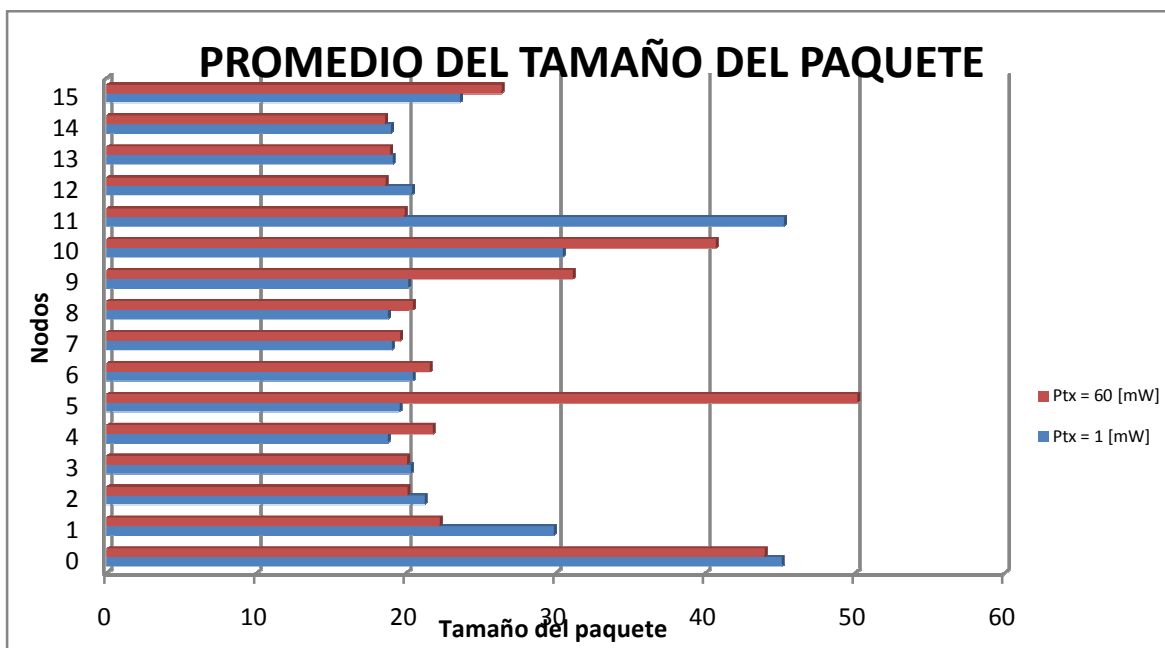


Figura. 4.158. Promedio del Tamaño del Paquete

Como se ha visto en los resultados anteriores, la actividad de los nodos para el Caso I es mayor en comparación al Caso II, ya que al aplicar una potencia de 60 [mW] el porcentaje de paquetes generados es mayor en 117% en comparación con el segundo caso. Sin embargo, el desempeño de cada uno de los escenarios es bueno, pues presentan altos porcentajes de paquetes recibidos y un porcentaje tolerable para los paquetes caídos y perdidos, generando un grado de confianza en el desempeño de cada una de las aplicaciones. En la Tabla. 4.60 se presentan los resultados de este análisis.

Tabla. 4.60. Análisis del Desempeño de los Escenarios de Simulación

CASO	60 [mW]	1 [mW]
Porcentaje de Paquetes Enviados	99.32	99.04
Porcentaje de Paquetes Recibidos	88.02	87.78
Porcentaje de Paquetes Caídos	1.28	1.78
Porcentaje de Paquetes Perdidos	11.29	11.25

Del análisis anterior se puede decir que el modelo de Propagación *TwoRayGround* utilizado para simulación de la tecnología WSN bajo el estándar 802.15.4 trabaja de manera eficiente para la cantidad de nodos seleccionada, ya que dicho modelo se ve afectado por reflexiones en la tierra al contar con grandes distancias, lo cual no se aplica en estos escenarios.

Sin embargo, el caso más eficiente fue al aplicar una potencia de 60 [mW], ya que este presenta mayor actividad de los nodos y alcance, y un alto porcentaje de paquetes recibidos. Además, el valor del *Throughput* para este caso alcanza un valor de 202 [kbps], representa el 80.85% de la capacidad máxima de la red, por lo cual los resultados son muy aceptables para una futura implementación de la red.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los eventos anómalos que presenta un volcán cuando está cerca de su erupción pueden ser premonstrados con una instrumentación apropiada y usando técnicas geofísicas, geodésicas y geoquímicas, así también como la observación tanto terrestre como remota. Con ello se podría detectar nuevas deformaciones del suelo, pequeños sismos, aumento en las emisiones de gases, variaciones de temperatura, cambios en los campos gravitatorios y magnéticos e inclusive posibles movimientos del magma y de los fluidos asociados. Por lo tanto, los resultados del sistema de vigilancia volcánica, monitorización y alerta temprana beneficiarían al país, a las empresas públicas, empresas privadas, al turismo pero principalmente salvaguardaría vidas humanas e infraestructuras de gran importancia que podrían causar enormes estragos a la situación económica y al ambiente.

Por lo tanto, del desarrollo de este proyecto se concluye y recomienda lo siguiente:

5.1. Conclusiones

El diseño y simulación de la Red de Telecomunicaciones para el sistema de supervisión y alerta temprana frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi utilizando redes de sensores inalámbricos para la ESPE, es factible, ya que se determinó mediante cálculos y análisis en herramientas de simulación como Sirenet, Radio Mobile y Network Simulator, que el presupuesto del enlace, la

indisponibilidad y capacidad del enlace presentan valores adecuados para el buen funcionamiento del mismo. Además, existe viabilidad técnica y económica.

La tecnología WSN basada en el estándar IEEE 802.15 se presenta como una solución para implementar un sistema de monitorización vulcanológico más robusto y confiable con sensores y nodos de menor tamaño y peso, y que consumen menos energía en comparación con los nodos tradicionales, por lo tanto, la Red de Sensores Inalámbricos presenta numerosas ventajas: mayor efectividad y capacidad, menor vulnerabilidad a fallas del sistema y una mejor monitorización en condiciones ambientales adversas. Además, tiene la capacidad de operar de forma autónoma con una gran densidad de nodos así como recolectar numerosas variables físicas y ambientales, sin embargo, su despliegue podría resultar complejo, para evitar esta situación es necesario establecer puntos estratégicos por vulcanólogos expertos en el área con el objetivo de medir eficientemente las condiciones del fenómeno.

Se realizaron diferentes estudios de campo y utilizado un GPS (*Global Positioning System*) *Meridian Platinum 2004 Thales Navegation* cuya precisión es de ± 5 metros, se obtuvo las coordenadas y alturas de trece puntos estratégicos para establecer y diseñar la red inalámbrica, por lo que se determinó que la mejor ubicación para las estaciones de transmisión y recepción de la red de transporte es Cotopaxi – ESPE (Edificio Administrativo), ya que cumple con los requerimientos de altura y LOS.

Debido al alcance de este proyecto y a la importancia que tiene la confiabilidad de la transmisión de datos y de la conexión remota para ambas estaciones, se debe garantizar una disponibilidad de la red de transporte de un 99.99%, por lo que se ha optado por el estándar IEEE 802.11 (Wi-Fi) para largas distancias con MAC alternativo, ya que se presenta como una solución madura, gestionable y estable que permite desarrollar enlaces mayores a 100 [km] en zonas rurales con una buena transmisión y se ha determinado que la mejor opción para establecer el enlace de transporte es ubicar la estación de monitorización en las cercanías del Refugio José Rivas en el Volcán Cotopaxi y la estación de vigilancia en el Edificio Administrativo - ESPE, ya que este enlace

presenta una disponibilidad del 99.99891340%, un despejamiento adecuado y el porcentaje necesario para garantizar la liberación de la Primera Zona de Fresnel. Mientras que para establecer el enlace redundante se resolvió usar la instalaciones del IASA, donde se requeriría una torre de al menos 17 [m] de altura para asegurar el funcionamiento de dicho enlace, lo cual implicaría más costos. Sin embargo, este enlace garantizaría la disponibilidad de las conexiones o sería un *backup* en caso de ser afectado el enlace principal. Además, el presente proyecto trabajará en el espectro de frecuencia inalámbrica de la banda no licenciada de 2.4 [GHz], debido a su alto *Throughput* y a que sus características de propagación de las ondas electromagnéticas son idóneas para la transferencia de información con este tipo de tecnología, considerando que a medida que se incrementa la frecuencia, la señal es más fácil de atenuar y el requerimiento de LOS es más riguroso.

El modelo de Propagación *TwoRayGround* utilizado para simulación de la tecnología WSN bajo el estándar 802.15.4 trabaja de manera eficiente para la cantidad de dieciséis nodos, ya que dicho modelo se ve afectado por reflexiones en la tierra al contar con grandes distancias, lo cual no se aplica en estos escenarios. Además, al utilizar una potencia de 60 [mW] los resultados fueron más eficientes en comparación con una potencia de 1 [mW], ya que dicho escenario presenta mayor actividad de los nodos, mayor alcance, un alto porcentaje de paquetes recibidos y un nivel de rendimiento o capacidad adecuados, ya que el *Throughput* de la red en función al número de nodos alcanza un valor de 202 [kbps], que en comparación con la velocidad de transmisión teórica de 250 [kbps], representa el 80.85% de la capacidad máxima de la red, es decir, la relación entre datos enviados e información a nivel de MAC presenta un buen desempeño de la red.

5.2. Recomendaciones

La actividad volcánica puede incrementar o disminuir de forma no contralada sino por el simple capricho de la naturaleza, por lo cual habrá etapas de relativa calma. Sin embargo, se debe establecer una estrategia o plan de monitorización que permita detectar nuevas deformaciones del suelo, pequeños sismos, aumento

en las emisiones de gases, variaciones de temperatura, cambios en los campos gravitatorios y magnéticos e inclusive posibles movimientos del magma y de los fluidos asociados, para poder conocer el estado del volcán en todo momento y detectar cualquier mínimo cambio en su actividad y con esa información anticipar o prever la evolución de una erupción volcánica, ya que debemos estar preparados cuando ocurra un evento de mayor magnitud. Este plan permitirá realizar una evacuación oportuna reduciendo de esta manera la vulnerabilidad tanto humana como económica.

Para garantizar el control y la fiabilidad de la transmisión de datos de la red de transporte es necesario dotarla de un agente de gestión SNMP (*Simple Network Management Protocol*), ya que este protocolo permite tener datos concretos del tráfico de la red y supervisar el funcionamiento de la misma; y programar un módulo MIB (*Management Information Base*) que permita gestionar (consulta/modificación) los parámetros como *SlotTime*, *ACKTimeout* y *CTSTimeout* de los equipos Wi-Fi.

La información de la actividad del volcán recogida por los sensores representa una alta densidad y un constante crecimiento, lo que implica que en algún tiempo determinado los equipos de almacenamiento de dichos datos en la estación de monitorización van a llegar a saturarse, por lo que es necesario enviar esa información regularmente para su correcto almacenamiento y posterior estudio en los Laboratorios de Vigilancia Volcánica desarrollando procedimientos más eficaces y estables para su administración. Por lo tanto, debido a que el volumen de información que se maneja en la monitorización de un volcán es grande, los dispositivos que se requieren deben ser robustos y con capacidades de almacenamiento adecuadas.

Se recomienda el diseño de mecanismos eficientes y de tratamiento discriminatorio de las muestras, ya que no todos los datos anómalos pueden ser tomados como evidencia del inicio de una erupción volcánica, evitando de esta forma dar falsas alarmas y centrándose en las muestras que realmente darán la información de un comportamiento inestable.

Este proyecto servirá como piloto debido a la importancia que tiene y podría ser implementado a nivel nacional en los volcanes activos de la Cordillera de los Andes en el Ecuador. Sin embargo, es necesario calcular y determinar los parámetros de propagación y viabilidad del enlace para cada volcán.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HALL, Minard L. [et al.], *Mapa Regional De Peligros Volcánicos Potenciales Del Volcán Cotopaxi – Zona Norte*, [en línea], Quito, 2004, [citado 19-05-2009], Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Formato pdf, Disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/VOLCANES/COTOPAXI/CotopaxiN.pdf>.

[2] WERNER-ALLEN, G. [et al.], *Monitoring Volcanic Eruptions With A Wireless Sensor Network*, Boston, Harvard University, University of New Hampshire, University of North Carolina, 2005 Second European Workshop on Publication, 2005, p. 108 - 120, ISBN: 0-7803-8801-1, INSPEC Accession Number: 8402481.

[3] WERNER-ALLEN, G. [et al.], *Deploying A Wireless Sensor Network On An Active Volcano*, Harvard University, University of New Hampshire, University of North Carolina, Internet Computing, IEEE, 2006, Volume: 10 , Issue: 2, p. 18 - 25, ISSN: 1089-7801, INSPEC Accession Number: 8972218.

[4] GAVIDIA, Johanna I. [et al.], *Análisis Del Desempeño De Una Red Ad-Hoc Inalámbrica Móvil (MANET) Empleando El Software NS 2.32 Bajo El Estándar IEEE 802.15*, Tesis de Pregrado de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2009.

[5] FERNÁNDEZ DE ALARCÓN, Rafael [et al.], *Las Telecomunicaciones Al Servicio De Las Emergencias*, [en línea], [citado 05-06-2009], AHCIET, Formato pdf, Disponible en: <http://www.ahciet.net/actualidad/revista/r.aspx?ids=10733&ids2=21805>.

[6] WiMAX Forum, *WiMAX NLOS Features*, [en línea], [citado 05-06-2009], Formato pdf, Disponible en: <http://www.wimaxforum.org/documents/download/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf>.

[7] RAYMOND, Forado, *Seguridad En Redes WiMAX*, [en línea], Madrid, 2005, [citado 05-06-2009], Alvarion Iberia, Formato pdf, Disponible en: http://www.borrmart.es/articulo_redseguridad.php?id=1088&numero=23.

[8] RINCÓN, David y CANO, Cristina, *Mitigación De La Dependencia A Largo Plazo Del Tráfico En Redes WLAN IEEE 802.11*, [en línea], 2007, [citado 05-06-2009], IEEE, Formato pdf, Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9907/4378494/04378495.pdf?isnumber=4378494&prod=JNL&arnumber=4378495&arSt=128&ared=135&arAuthor=Rincon%2C+David%3B+Cano%2C+Cristina>.

[9] Advento Networks Solutions, *Introducción A La Tecnología Wireless 802.11*, [en línea], Madrid, 2001, [citado 05-06-2009], Formato html, Disponible en: http://www.e-advento.com/tecnologia/wlan_intro.php.

[10] Kioskea, *Modos De Funcionamiento Wi-Fi (802.11 o Wi-Fi)*, [en línea], [citado 05-06-2009], Formato html, Disponible en: <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifimodes.php3>.

[11] GARCÍA, Fidel y QUÍLEZ, Vicente, *IEEE 802.11 (Wi-Fi): El Estándar De Facto Para WLAN*, [en línea], [citado 10-06-2009], Formato pdf, Disponible en: <http://www.coit.es/publicac/publbit/bit138/wifi.pdf>.

[12] Advento Network Solutions, *Seguridad En Redes Wireless*, [en línea], Madrid, 2001, [citado 10-06-2009], Formato html, Disponible en: http://www.e-advento.com/tecnologia/tecnologia_seguridad.php.

[13] WILLIAM, Fernando, *Ventajas Y Desventajas De Wi-Fi*, [en línea], 2006, [citado 11-06-2009], Formato html, Disponible en: <http://wifeworld.blogspot.com/2006/02/ventajas-y-desventajas-de-wifi.html>.

[14] EULER, Edson, *Comunicaciones por Radiomicroondas*, [en línea], Puno, 2008, [citado 12-06-2009], Formato html, Disponible en: <http://eulerrr.blogspot.com/2008/05/comunicacion-por-radiomicroondas.html>.

[15] HERNÁNDEZ, *Comunicaciones De Datos: Microondas Terrestres*, [en línea], México, [citado 12-06-2009], Instituto Tecnológico de la Laguna, Formato html, Disponible en: <http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/COMUNICACION%20DE%20DATOS/Unidad%20II/UNIDAD%20II-8.pdf>, p. 108.

[16] JVG, *Enlaces De Microondas, Satélite Y Fibra Óptica*, [en línea], 2003, citado 12-06-2009], Aporeea, Formato html, Disponible en: <http://www.aporeea.org/actualidad/a5055.html>.

[17] CORRAL, Ana, *Diseño E Implementación De Un Entorno De Simulación Para Redes De Sensores Inalámbricos*, Tesis de Pregrado en Ingeniería de Telecomunicación, Cartagena: Universidad Politécnica De Cartagena, Disponible en: <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/213/1/pfc1572.pdf>, 2005.

[18] APOLO, Francisco [et al.], *Topología Y Control En Redes Inalámbricas Y Sensores De Redes*, [en línea], Quito, 2006, [citado 13-06-2009], Escuela Politécnica Nacional, Formato ppt, Disponible en: <http://clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/Oct06Marzo07/ComInalam/TRabajos/TRABAJO3/G1/PROYECTO%203%20-%20GRUPO%201.ppt>.

[19] RUIZ, Erica, *Wireless Sensor Network*, [en línea], Ensenada, [citado 13-06-2009], Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada, Formato pdf, Disponible en: <http://usuario.cicese.mx/~cruiz/Articulos-presentaciones/Resumen-%20Wireless%20Sensor%20Network.pdf>.

[20] GÓMEZ, Francisco, *Redes De Sensores Inalámbricos*, [en línea], Granada, 2007, [citado 15-06-2009], Universidad de Granada, Formato pdf, Disponible en: http://atc.ugr.es/info/TIC_socio_sanitario/A11_4_05_Redес_sensores.pdf.

[21] SANZ, David, *Redes De Sensores - Estudio De Módulos De Seguridad Para WSN: Estado Del Arte*, [en línea], Madrid, 2008, [citado 21-06-2009], Universidad Politécnica de Madrid, Formato pdf, Disponible en:

http://www.disam.upm.es/~crossi/Site/Master_Robotica_files/RedesdeSensores.pdf.

[22] MORENO, Javier y RUIZ, Daniel, *Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)*, [en línea], Valencia, 2007, [citado 21-06-2009], Universidad de Alicante, Formato pdf, Disponible en: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/7/Informe_ZigBee.pdf.

[23] ORTÍZ, Francisco, *Redes De Sensores Inalámbricos - Wireless Sensor Networks (WSN)*, [en línea], [citado 21-06-2009], Formato pdf, Disponible en: http://profesores.elo.utfsm.cl/~tarredondo/info/networks/Presentacion_sensores.pdf.

[24] JEAN, Paul, *TinyOS*, [en línea], [citado 22-06-2009], Formato html, Disponible en: <http://jeanpaulberrios.wordpress.com/tinyos/>.

[25] SÁENZ-DIEZ, Guillermo, *Estudio Comparativo De IEEE802.11 E IEEE802.16 Para El Diseño De Una Red Rural De Comunicaciones*, Tesis de Pregrado en Ingeniería de Telecomunicación, Leganés: Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2006.

[26] SIMÓ, Javier y MARTÍNEZ, Andrés, *Implementación De IEEE 802.11 En Enlaces Largos Para Zonas Rurales Aisladas*, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, Madrid.

[27] LARA, Román [et al.], *Caracterización De Un Sistema De Monitoreo Del Volcán Cotopaxi Empleando Sensores Inalámbricos*, Universidad Rey Juan Carlos de Madrid, Madrid, 2009.

[28] SERNA, Jesús, *Redes De Sensores Inalámbricas*, [en línea], 2007, [citado 03-07-2009], Formato pdf, Disponible en: <http://www.uv.es/montanán/ampliación/trabajos/Redes%20de%20Sensores.pdf>.

- [29] TREVIÑO, Javier, *Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF: Modelos de Propagación*, Capítulo V, Tesis de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Puebla: Universidad de las Américas Puebla, Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo5.pdf, 2003.
- [30] HENDERSON, Tom, *Radio Propagation Models*, [en línea], 2009, [citado 03-07-2009], Formato html, Disponible en: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/node217.html>.
- [31] UC Berkeley, LBL, USC/ISI y Xerox PARC, *The ns Manual (Formerly NS Notes and Documentation)*, [en línea], 2002, [citado 05-07-2009], Formato pdf, Disponible en: www.ecse.rpi.edu/Homepages/shivkuma/teaching/fall2002/ns-2/ns_doc.pdf.
- [32] HENDERSON, Tom, *Free Space Model*, [en línea], 2009, [citado 05-07-2009], Formato html, Disponible en: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/node218.html>.
- [33] HENDERSON, Tom, *Shadowing Model*, [en línea], 2009, [citado 05-07-2009], Formato html, Disponible en: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/node220.html>.
- [34] VASQUES, Alan y ESTEVES, Rafael, *Simulação De Redes De Computadores Utilizando O Network Simulator: Aula 5*, UFPA, XI SEMINF.
- [35] VELÁZQUEZ, Rodrigo, *Algoritmos De Encaminamiento Ad-Hoc*, [en línea], México, [citado 06-07-2009], Universidad Nacional Autónoma De México, Formato html, Disponible en: http://www.angelfire.com/mac2/rodrigo/tmenuchis_archivos/algoritmos.html.
- [36] ASHWINI, Kumar y SABYASACHI, Roy, *Realistic Support For IEEE802.11b MAC in NS*, [en línea], Kanpur, 2004, [citado 07-07-2009], Department of Computer Science and Engineering - Indian Institute of Technology Kanpur, Formato pdf, Disponible en: <http://www.cse.iitk.ac.in/users/braman/students/2004/sroy-ashw-rep.pdf>.

[37] APOLO, Diana, *Cuaderno de Anotaciones: Radio Enlace Digital y Mediciones*, Noveno Nivel, Docente: Andrade David, Escuela Politécnica del Ejército, 2009.

[38] BUETRICH, Sebastián, *Cálculo de Radioenlace*, [en línea], 2007, [citado 07-07-2009], TRICALCAR, Formato pdf, Disponible en: http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_presentacion_v02.pdf.

[39] MANZANEDO, Antonio, *Cálculos De Enlace: Propagación Por Difracción - Zonas De Fresnel*, [en línea], 2007, [citado 19-07-2009], Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Formato pdf, Disponible en: http://webpages.ull.es/users/amanza/SCT/S28_Teoria.pdf.

[40] ESCALONA, Ismael, *Radiopropagación*, [en línea], [citado 12-07-2009], Formato html, Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos40/radiopropagacion/radiopropagacion.shtml>.

[41] ÁLVAREZ, Jorge, *Propagación Básica De Las Ondas Electromagnéticas*, [en línea], México, 2005, [citado 12-07-2009], Universidad Tecnológica de México, Formato html, Disponible en: <http://members.fortunecity.es/unitec/probasic.htm>.

[42] Universidad de Chile MediaWiki ToIP, *Zonas De Fresnel*, [en línea], Chile, 2007, [citado 13-06-2009], Universidad de Chile, Formato pdf, Disponible en: <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/6/65/AnexoJKL-Marcomun.pdf>, p. 190.

[43] GUANOTOA, Diego, *Diseño De Una Red Inalámbrica De Voz Y Datos Utilizando Tecnología WIMAX Para Interconectar Las Dependencias De Petroproducción Con El Bloque 15 En El Distrito Quito: Diseño De La Red Inalámbrica*, Capítulo III, Tesis de Pregrado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito: Escuela Politécnica Nacional, Formato pdf, Disponible en: <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/755/4/T10514CAP3.pdf>, 2007.

[44] Universidad Nacional de Rosario, *Propagación Y Campo Recibido*, [en línea], Rosario, 2004, [citado 19-07-2009], Formato pdf, Disponible en: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Antenas%20y%20Propagacion/1513.pdf>, 1513.

[45] Universidad Nacional de Rosario, *Modelo De Cálculo De Radioenlace*, [en línea], Rosario, 2004, [citado 19-07-2009], Formato pdf, Disponible en: <http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Radioenlaces/1511.pdf>, 1511.

[46] JIMÉNEZ, Marlon y PAUCAR, Franklin, *Diseño De Una Red Digital Para El Instituto Geofísico De La Escuela Politécnica Nacional*, Tesis de Pregrado en Ingeniería de Eléctrica y Electrónica, Quito: Escuela Politécnica Nacional, Disponible en: <http://dspace.epn.edu.ec/handle/123456789/1125>, 2008.

[47] ZULUAGA, O. J. [et al.], *Diseño Automatizado De Enlaces Microondas Sobre Sistemas De Información Geográfica*, [en línea], [citado 27-07-2009], Universidad Nacional y EMTELSA SA ESP, Formato pdf, Disponible en: <http://www.aciem.org/bancoconocimiento/e/enlacesmicroondas/microondas.pdf>.

[48] Grupo de Radiación y Propagación del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, *Tema 3: Radioenlaces Terrestres*, [en línea], 2007, [citado 27-07-2009], Universidad de Vigo, Formato pdf, Disponible en: <http://www.grp.tsc.uvigo.es/rtvs/docs/tema3.pdf>.

[49] BIJGEWERKT, *Estudio De Viabilidad De Un Enlace (Link Power Budget)*, [en línea], 2005, [citado 01-08-2009], ParamoWifix, Formato html, Disponible en: <http://www.paramowifix.net/antenas/calculoenlacewlan.html>.

[50] HERRADÓN, Rafael, *Radioenlaces*, [en línea], 2009, [citado 01-08-2009], Universidad Politécnica de Madrid, Formato pdf, Disponible en: <http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones/1/radiocomunicacion/contenidos/presentaciones/radioenlaces-07.pdf>.

[51] LÓPEZ, Marcial, *Sistemas De Comunicaciones Por Microondas: Diseño De Enlaces*, [en línea], Lima, 2004, [citado 03-08-2009], Universidad Nacional de

Ingeniería, Formato pdf, Disponible en:
<http://aniak.uni.edu.pe/sdemicro/Cap%2008%20MW%202005-1.pdf>.

[52] AMAGUAÑA, Edwin y APOLO, Tatiana, *Diseño Y Simulación De Una Red Con Tecnología Wimax (IEEE 802.16-2004) Para El Campus Politécnico De La ESPE*, Tesis de Pregrado de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones, Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2009.

[53] Instituto Geográfico Militar del Ecuador y ECOLAP, *Guía Del Patrimonio De Áreas Naturales Protegidas Del Ecuador: Región Sierra*, [en línea], Quito, 2007, [citado 03-08-2009], ECOLAP y MAE, Formato pdf, Disponible en:
http://www.ambiente.gob.ec/paginas_espanol/4ecuador/docs/libro/21-SC-PN%20Llanganates.pdf.

[54] Ministerio del Ambiente del Ecuador, *Parque Nacional Cotopaxi*, [en línea], Quito, 2009, [citado 03-08-2009], Formato html, Disponible en:
http://www.ambiente.gov.ec/paginas_espanol/4ecuador/docs/areas/cotopaxi.htm.

[55] OCP Ecuador S.A., *Caracterización Ambiental Del Área De Influencia Línea Base*, [en línea], 2001, [citado 03-08-2009], Formato doc, Disponible en:
http://www.estade.org/desarrollosustentable/EIA%20OCP/Sec%203/Sec3_1_finallSIMO.doc

[56] QUAAS, R. [et al.], *Instrumentación: Monitoreo Volcánico Instrumentación Y Métodos De Vigilancia*, Capítulo II, [en línea], [citado 04-08-2009], Centro Nacional de Prevención de Desastres y Universidad Autónoma de México, Formato pdf, Disponible en:
<http://www.disaster-info.net/lideres/spanish/mexico/biblio/spa/doc8613/doc8613-1.pdf>.

[57] SAMANIEGO, Pablo [et al.], *Los Peligros Volcánicos: Asociados Con El Tungurahua - Monitoreo Volcánico*, Capítulo IV – Parte A, [en línea], Quito, 2003, [citado 05-08-2009], Biblioteca Virtual Andina para la Prevención y Atención de Desastres BiVa-PaD Ecuador, Formato pdf, Disponible en:
<http://www.bivapad.gov.ec/pdf/spa/doc00026/doc00026-4a.pdf>.

[58] LEWIS, F. L., *Wireless Sensor Networks*, [en línea], New York, 2004, [citado 18-08-2009], University of Texas at Arlington, Formato pdf, Disponible en: <http://arri.uta.edu/acs/networks/WirelessSensorNetChap04.pdf>.

[59] SIMÓ, Javier, *Práctica 2: Montaje Y Configuración De Un Router Wifi Con Linux*, Departamento de Teoría de Señal y Comunicaciones de la Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, 2008.

[60] MaxStream, *XBee™ OEM RF Modules*, [en línea], Lindon, 2006, [citado 18-08-2009], Ad Hoc Electronics, Formato pdf, Disponible en: http://www.adhocelectronics.net/download/MS/datasheet_XBee_OEM_RF-Modules.pdf.

[61] INTELIA Consultores, *Manual de Sirenet 3.0*, Madrid.

[62] L-com Global Connectivity, *2.4 GHz 24 dBi Die-cast Grid Antennas*, [en línea], North Andover, [citado 18-08-2009], Formato html, Disponible en: <http://www.l-com.com/productfamily.aspx?id=6295>.

[63] Times Microwave Systems, *Coaxial Cable Attenuation & Power Handling Calculator*, [en línea], 2002, [citado 19-08-2009], Formato pl, Disponible en: <http://www.timesmicrowave.com/cgi-bin/calculate.pl>.

[64] VE2DBE, *Radio Mobile*, [en línea], [citado 19-05-2009], Roger Coudé VE2DBE, Formato html, Disponible en: <http://www.cplus.org/rmw/rme.html>.

[65] MAGNOLI, Daniel, *RADIO MOBILE: Ayudas Para La Configuración Y Uso*, 2006, [en línea], [citado 19-05-2009], Roger Coudé VE2DBE, Formato pdf, Disponible en: <http://www.lw1drj.com.ar/users/docs/RADIO%20MOBILE.pdf>.

[66] ROLDÁN, Alfonso, *Estudio De Modelos De Movimiento En Interiores Para Aplicación En Entornos WLAN*, Tesis de Pregrado en Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya, Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4554/1/memoria.pdf>, 2007.

[67] NOLIVOS, Jaime, *Estudio Comparativo De Los Protocolos De Movilidad Y Micromovilidad IP, Servicios Y Aplicaciones Para Los Sistemas De Comunicaciones Móviles: Comparación Y Evaluación De Los Protocolos*, Capítulo III, Tesis de Pregrado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito: Escuela Politécnica Nacional, Disponible en: <http://dspace.epn.edu.ec/bitstream/123456789/787/4/T10532CAP3.pdf>, 2006.

[68] Mini-Box, *Alix Wi-Fi*, [en línea], [citado 01-09-2009], Ituner Networks, Formato html, Disponible en: <http://www.mini-box.com/ALIX;jsessionid=0a0107431f43be6a1b19b6cd40fc8b738bb952599116.e3eTaxiPc3mTe38Mci0>.

[69] Mini-Box, *CF Cards*, [en línea], [citado 01-09-2009], Ituner Networks, Formato html, Disponible en: <http://www.mini-box.com/CF-cards>.

[70] HyperGain, *2.4 GHz 24 dBi High Performance Reflector Grid Antenna*, [en línea], [citado 01-09-2009], HyperLink Technologies, Formato pdf, Disponible en: <http://www.34t.com/pdf/hg2424g.pdf>.

[71] Mini-Box, *N-Type Female Straight Pigtail*, [en línea], [citado 01-09-2009], Ituner Networks, Formato html, Disponible en: <http://www.mini-box.com/s.nl/it.A/id.372/.f>.

[72] Mini-Box, *Enclosure 2 LAN USB for Alix.2*, [en línea], [citado 01-09-2009], Ituner Networks, Formato html, Disponible en: <http://www.mini-box.com/Enclosure-1c1-USB-Alix-2?sc=8&category=19>.

[73] Mini-Box, *Ubiquiti SR2 MiniPCI Card*, [en línea], [citado 01-09-2009], Ituner Networks, Formato html, Disponible en: <http://www.mini-box.com/s.nl/it.A/id.386/.f?sc=8&category=19>.

[74] WiFi Canarias, *Qué Es POE (Power Over Ethernet)*, [en línea], Santa Cruz de Tenerife, [citado 01-09-2009], Formato html, Disponible en:

http://www.wificanarias.com/web/index.php?option=com_content&view=article&catid=7:preguntas-frecuentes&id=27:poe.

[75] Mini-Box, *Power Over Ethernet Injector*, [en línea], [citado 01-09-2009], Ituner Networks, Formato html, Disponible en: <http://www.mini-box.com/s.nl/it.A/id.309/f>.

ANEXO 1

**ESTUDIO TOPOGRÁFICO IASA –
SANGOLQUÍ PARA ESTABLECER EL
ENLACE DE TRANSPORTE**

INSPECCIÓN IASA – SANGOLQUÍ

Se procedió a visitar las instalaciones del IASA Sangolquí, este sería un punto para la instalación de una repetidora en caso de ser necesario. Se pudo observar tres lugares estratégicos en las zonas más altas del IASA Sangolquí para la instalación de la torre. El primer punto estaría ubicado en la Estación Agrometeorológica, la cual cuenta con energía eléctrica y una torre de 12 [m] de altura aproximadamente, esto se observa en la siguiente figura:



Dicho punto tiene línea de vista (LOS) hacia el Volcán Cotopaxi y su LOS hacia la ESPE fue analizado anteriormente con el software Sirenet.

El segundo punto, que puede ser observado en las siguientes figuras, es un terreno que cuenta con energía eléctrica y LOS hacia el Volcán Cotopaxi. La LOS hacia la ESPE fue analizado anteriormente con el software Sirenet.



El tercer punto mostrado en las siguientes figuras, es un terreno que cuenta con energía eléctrica y LOS hacia el Volcán Cotopaxi pero presenta una menor apreciación, ya que se observa únicamente la parte glacial del volcán. Este punto es el más alejado de las edificaciones del IASA Sangolquí.



La LOS hacia la ESPE fue analizado anteriormente con el software Sirenet aunque se puede apreciar que existe características del terrenos que podría constituir obstáculos en línea de vista.



Los datos obtenidos con el GPS (perteneciente al Departamento de Ciencias de la Tierra), *Meridian Platinum* cuya precisión es de ± 5 [m], se encuentran tabulados en la siguiente tabla:

Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el IASA

LUGAR	COORDENADAS	ALTURA [m]
IASA 1 – Estación Agrometeorológica	LAT: 0°23' 35" S	2759
	LONG: 78°24' 52" O	
IASA Sitio 2	LAT: 0°23' 31" S	2763
	LONG: 78°24' 52" O	
IASA Sitio 3	LAT: 0°24' 42" S	2842
	LONG: 78°24' 57" O	

El GPS permitió observar diferentes características como la altura, ubicación y azimut. Estos resultados permitirán determinar si existe la posibilidad de establecer un enlace de transporte Volcán Cotopaxi – ESPE con una repetidora en el IASA, siempre y cuando exista línea de vista sin obstrucciones.

ANEXO 2

**ESTUDIO TOPOGRÁFICO REFUGIO
JOSÉ RIVAS PARA ESTABLECER EL
ENLACE DE TRANSPORTE**

INSPECCIÓN REFUGIO JOSÉ RIVAS

El Refugio José Rivas, que puede ser apreciado en la figura, se encuentra en el Parque Nacional Cotopaxi a una hora de caminata desde el estacionamiento del Parque.



Se pretendió determinar puntos estratégicos que sobrepasen la altura de 4850 [m] y cuyas características del terreno sean estables para implementar un enlace directo con LOS hacia la ESPE, por lo cual se determinaron dos puntos.

El primero punto está ubicado en unas instalaciones en las cercanías del Refugio que cuenta con energía solar a una altura de 4888 [m].



El segundo punto se encuentra en el Refugio y cuenta con energía solar a una altura de 4870 [m].



Los datos obtenidos con el GPS (perteneciente al Departamento de Ciencias de la Tierra), *Meridian Platinum* cuya precisión es de ± 5 [m], se encuentran tabulados en la siguiente tabla:

Ubicación de los Puntos Estratégicos Establecidos en el Volcán Cotopaxi

LUGAR	COORDENADAS	ALTURA [m]
COTOPAXI Sitio 1	LAT: 0°39' 49" S	4870
	LONG: 78°26' 17" O	
COTOPAXI Sitio 2	LAT: 0°39' 50" S	4888
	LONG: 78°26' 19" O	

ANEXO 3

EQUIPOS PARA LA RED DE TRANSPORTE COTOPAXI - ESPE



EQUIPOS PARA LA RED DE TRANSPORTE COTOPAXI – ESPE [59]





A continuación, se presentan diferentes tipos y modelos de los equipos para red de transporte que se encuentran disponibles en el mercado, así como los parámetros técnicos más representativos que deben ser tomados en cuenta al momento de seleccionar los dispositivos necesarios para la red Wi-Fi.

Placa Alix

La placa del sistema ALIX consiste en un ordenador empotrado con slot CF para el sistema operativo Linux, slots miniPCI para radios Wi-Fi, puertos Ethernet y seriales. Además, da a las redes OEMs un alto rendimiento y tiene diferentes aplicaciones: routers inalámbricos, los cortafuegos, balanceadores de carga, VPN, interfaz de usuario industrial u otros dispositivos de red con fines especiales. Mini-box.com es el diseñador y fabricante de la WRAP-BOX. En el mercado existen diferentes versiones de placa Alix, como se muestra a continuación:

Características Técnicas de las Placas Alix [68]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
<p>ALIX3D3 (ALIX.3D3) (1 LAN and 2 miniPCI, USB, VGA, Audio) LX800, 256Mb</p> 	<p>LX-800 with integrated RAM CPU: 500 MHz AMD Geode LX800 DRAM: 256 MB DDR DRAM on board Storage: CompactFlash socket Power: DC jack or passive POE, min. 7V to max. 20V Three LEDs Expansion: 2 miniPCI slots, LPC bus Connectivity: 1 Ethernet channel (Via VT6105M 10/100) I/O: DB9 serial port, dual USB, VGA, audio headphone out / microphone in RTC battery Board size: 100 x 160mm Firmware: tinyBIOS</p>
<p>ALIX3D2 (ALIX.3D2)with 1 LAN and 2 miniPCI, LX800, 256Mb</p> 	<p>LX-800 with integrated RAM CPU: 500 MHz AMD Geode LX800 DRAM: 256 MB DDR DRAM on board Storage: CompactFlash socket Power: DC jack or passive POE, min. 7V to max. 20V Expansion: 2 miniPCI slots, LPC bus Connectivity: 1 Ethernet channel (Via VT6105M 10/100) I/O: DB9 serial port, dual USB Board size: 100 x 160mm Firmware: tinyBIOS</p>

<p>ALIX.6B2 Board (2 LAN/ 1 miniPCI/ 1 miniPCI Express/ LX800/ 256 MB/ USB)</p> 	<p>LX-800 with integrated RAM CPU: 500 MHz AMD Geode LX800 Dual USB port DRAM: 256 MB DDR DRAM on board Storage: CompactFlash socket Power: DC jack or passive POE, min. 7V to max. 20V Three front panel LEDs, pushbutton Expansion: 1 miniPCI slot, 1 miniPCI Express slot (USB only), LPC bus Connectivity: 2 Ethernet channels (Via VT6105M 10/100) I/O: DB9 serial port, dual USB port Board size: 6 x 6" (152.4 x 152.4 mm) Firmware: tinyBIOS</p>
<p>ALIX1D (ALIX.1D) mini-itx board with 1 LAN and 1 miniPCI</p> 	<p>LX-800 mini-ITX with integrated RAM and PSU CPU: 500 MHz AMD Geode LX DRAM: 256 MB SDRAM on board Storage: CompactFlash socket, 44 pin IDE Power: 12V DC, DC-DC converter on board. No bulky ATX PSU needed Expansion: miniPCI + PCI + LPC + optional I2C Connectivity: 1 Ethernet channel (Via VT6105M) I/O: 2 COM, 4 USB, 1 LPT, audio, VGA Board size: 6.7 x 6.7" (miniITX), low profile Firmware: Award BIOS</p>
<p>ALIX2D2 (ALIX.2D2) with 2 LAN and 2 miniPCI, LX800, 256Mb, USB</p> 	<p>LX-800 with integrated RAM and PSU CPU: 500 MHz AMD Geode LX800 Dual USB port DRAM: 256 MB DDR DRAM on board Storage: CompactFlash socket Power: DC jack or passive POE, min. 7V to max. 20V Expansion: 2 miniPCI slots, LPC bus Connectivity: 2 Ethernet channels (Via VT6105M 10/100) I/O: DB9 serial port, dual USB port Board size: 152 x 152mm Firmware: Award tinyBIOS</p>
<p>ALIX2D3 (ALIX.2D3) with 3 LAN and 1 miniPCI, LX800, 256Mb</p> 	<p>LX-800 with integrated RAM and PSU CPU: 500 MHz AMD Geode LX800 DRAM: 256 MB DDR DRAM on board Dual USB port Storage: CompactFlash socket Power: DC jack or passive POE, min. 7V to max. 20V Expansion: 1 miniPCI slot, LPC bus Connectivity: 3 Ethernet channels (Via VT6105M 10/100) I/O: DB9 serial port Board size: 152 x 152mm Firmware: Award tinyBIOS</p>

Después de analizar los diferentes parámetros técnicos anteriormente expuestos, se puede determinar las principales características que requiere la red diseñada para ofrecer una tasa de BER y de transmisión adecuadas, así como un transporte confiable de datos.

Características Técnicas de la Tarjeta Wi-Fi

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA TARJETA Wi-Fi	
CPU	500 MHz AMD Geode LX800
DRAM	256 MB DDR DRAM
Almacenamiento	CompactFlash socket
Alimentación	DC jack o a través de POE, min. 7V - max. 20V
Expansión	2 miniPCI slots, LPC bus
Connectividad	2 canales Ethernet (Via VT6105M 10/100)
Entradas/Salidas	DB9 puerto serial, puerto dual USB
Firmware	tinyBIOS
Adaptador	AC-DC 15V, 1.2A




Por lo tanto, la placa seleccionada es la ALIX2D2.

Memoria Compact Flash

La Memoria Compact Flash es necesaria para dar un soporte adicional de alta capacidad de almacenamiento. Se caracteriza por ser extremadamente ligera y confiable. Además, se puede conectar en la ranura mini ITX de IDE o a la ranura de CF de computadoras de escritorio o portátiles.

Especificaciones Técnicas de Memoria Compact Flash [69]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
<p>ICF 4000 Industrial Compact Disk 4GB</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Interface: 50 pin Compact Flash Type1 - PCMCIA v2.1 and PC Card 3.0 standard compatible - Mechanical Shock Duration 10ms. - Vibration support - High reliability with 4 bit ECC (Error Correction Code) function. - Mean Time between Failures (MTBF) > 3,000,000 hours. - R/W endurance 2,000,000 Times. - Minimum 10,000 insertions. - Data Transfer Rate: <ul style="list-style-type: none"> Read: 40 Mbytes/sec Write: 20 Mbytes/sec - DC Input Voltage: +3.3V/+5V Single power supply operation - Power Consumption: 150mA (Max) - Operating Temp: -10 Degrees ~ +70 Degrees

	<p>Celsius</p> <ul style="list-style-type: none"> - Humidity: 10%-95% non condensing - Size: 42.8 x 36.40 x 3.3 mm (WxLxH)
<p>ICF 4000 Industrial Compact Disk 2GB</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Interface: 50 pin Compact Flash Type1 - PCMCIA v2.1 and PC Card v2.1 ATA compatible - Mechanical Shock Duration 10ms. - Vibration support - High reliability with 4 bit ECC (Error Correction Code) function. - Mean Time between Failures (MTBF) > 3,000,000 hours. - R/W endurance 2,000,000 Times. - Minimum 10,000 insertions. - Data Transfer Rate: Read: 20 Mbytes/sec Write: 12 Mbytes/sec - DC Input Voltage: +3.3V/+5V Single power supply operation - Power Consumption: 150mA (Max) - Operating Temp: -10 Degrees ~ +70 Degrees Celsius - Humidity: 10%-95% non condensing - Size: 42.8 x 36.40 x 3.3 mm (WxLxH)
<p>ICF 4000 Industrial Compact Disk 1GB</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Interface: 50 pin Compact Flash Type1 - PCMCIA v2.1 and PC Card 3.0 standard compatible - Mechanical Shock Duration 10ms. - Vibration support - High reliability with 4 bit ECC (Error Correction Code) function. - Mean Time between Failures (MTBF) > 3,000,000 hours. - R/W endurance 2,000,000 Times. - Minimum 10,000 insertions. - Data Transfer Rate: Read: 40 Mbytes/sec Write: 20 Mbytes/sec - DC Input Voltage: +3.3V/+5V Single power supply operation - Power Consumption: 150mA (Max) - Operating Temp: -10 Degrees ~ +70 Degrees Celsius - Humidity: 10%-95% non condensing - Size: 42.8 x 36.40 x 3.3 mm (WxLxH)
<p>512MB Compact Flash Memory</p> 	<p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Card:0.13" Thickness x 1.4" Height x 1.6" Length - Weight: 0.50 oz <p>Storage Capacity:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 512MB <p>Applications:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Digital Camera - Digital Audio Players - PDA - Test Equipment

Por consiguiente, la información que se manejará necesita una Memoria Compact Flash de 2 [GB] con las siguientes características:


Características Técnicas de la Compact Flash

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA COMPACT FLASH	
Capacidad	2GB
Interface	50 pines Compact Flash Tipo1
Tasas de transferencia de Datos	Lectura: 40 Mbytes/sec
	Escritura: 20 Mbytes/sec
Alimentación: Voltaje DC de Entrada:	+3.3V/+5V
Tipo	PCMCIA v2.1 y PC Card 3.0 estándar compatible

Antena Parabólica de 24 [dBi]

Las antenas se deben caracterizar por su alta resistencia y durabilidad debido a que van estar expuestas a condiciones ambientales severas. Adicionalmente, su diseño debe minimizar la carga del viento, ya que el Volcán Cotopaxi, a pesar de estar casi siempre despejado durante todo el año presenta fuertes y frecuentes vientos en los meses de julio y agosto.

Especificaciones Técnicas de la Antena Parabólica [70]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO		
2.4 GHz 24 dBi High Performance Reflector Grid Antenna 	Frecuencia	2400-2500 MHz
	Ganancia	24 dBi
	-3 dBi Beam Width	8 grados
	Reflexión de polarización cruzada	26 dBi
	Impedancia	50 Ohm

Pigtail

El pigtail es un cable coaxial que permite la conexión entre la tarjeta inalámbrica y la antena. Se procura que este no sea muy largo, ya que la longitud es directamente proporcional a la atenuación. A continuación, se presentan las características técnicas.

Especificaciones Técnicas del Pigtail [71]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
N-Type female Straight Pigtail 	180mm Straight N-type pigtail. end #1=Straight N-Type Female connecto. end #2=U.FL Cable lenght=180mm, OD=1.13 Designed for mini-PCI cards. Cable leght fits all WRAP die-cast enclosure combinations, 1 or 2 radios.

Caja para Interior

La caja para interiores debe presentar compatibilidad con Alix 2 y tener las siguientes características técnicas que se presentan a continuación:

Especificaciones Técnicas de la Caja para Interiores [72]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
Enclosure 2 LAN, USB for Alix.2 	Para 2 puertos LAN, USB para Alix 2 2 LAN, 2 antenas, modelos USB

Caja para Exteriores

Debido que el Volcán Cotopaxi presenta rigurosas condiciones climáticas, las cajas para exteriores deben soportar dichas circunstancias. Sus características se presentan a continuación:

Especificaciones Técnicas de la Caja para Exteriores [72]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
	<p>Compatible con Alix 2. Salida par dos antenas exteriores. Soportar temperaturas bajo 0° C. Protección contra agua y polvo.</p>

Adaptadores Wi-Fi miniPCI

La tarjeta en formato miniPCi es compatible con estándares específicos WLAN (Wi-Fi) y según esta característica ofrece diferentes velocidades de comunicación y permite la encriptación de datos.

Especificaciones Técnicas de los Adaptadores Wi-Fi miniPCI [73]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
<p>Ubiquiti SR2 MiniPCI Card</p>	<p>Diseñada específicamente para wireless en exteriores. Estándar: 802.11b/g Potencia de transmisión: 400 mW Sensibilidad: -98 dBm Atheros AR5213 MAC/BB & AR2112 ROC chipset based. Conector principal de la antena es UFL y el secundario es un conector MMCX.</p>
<p>Ubiquiti SR2 MiniPCI Card</p>	<p>Estándar: 802.11a Potencia de transmisión: 400 mW Sensibilidad: -93 dBm</p>
<p>Wistron CM9 MiniPCI Card</p>	<p>Estándar: Atheros 802.11a/b/g Dual Band. Compatibilidad con Wi-Fi. Sistema Operativo: Windows 98SE, ME, 2K, XP.</p>

Por lo tanto, se optará por el dispositivo Ubiquiti SR2 MiniPCI Card y por el Wistron CM9 MiniPCI Card.

Inyectores PoE

Los inyectores PoE (*Power over Ethernet*) trabajan bajo el estándar IEEE 802.3AF y permiten la alimentación eléctrica de dispositivos de red a través de un cable UTP / STP en una red Ethernet [74]. Sus principales características se muestran a continuación:

Especificaciones Técnicas del Inyector Power Over Ethernet [75]

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	
<p>Power Over Ethernet Inyector</p> 	<p>DJ jack: + centro, - enchufe. LAN: sin energía. Pinout: DJ jack centro positivo, 2.1 mm pines. RJ45 pines 4,5 = positivo, RJ45 pines 7,8 = negativo.</p>

ANEXO 4

EQUIPOS PARA LA RED WSN

EQUIPOS PARA LA RED WSN

La red inalámbrica de sensores para la monitorización de la actividad volcánica y sísmica del Volcán Cotopaxi es responsable de la detección, adquisición y distribución de datos, así como del seguimiento de un centro de gestión, por lo que la elección de los equipos debe ser la más adecuada para dicho estudio; por ello se optó por *XBee™ OEM RF Modules - ZigBee™/802.15.4 OEM RF Modules by MaxStream, Inc*, ya que posee numerosas ventajas en sus características puesto que son fáciles de usar, presenta un bajo consumo de energía y no es necesaria la configuración para la operación de la caja de exteriores RF. Además, los dispositivos son flexibles, puesto que, si se requiere funcionalidades más avanzadas, los módulos de apoyo soportan un amplio conjunto de comandos AT.

También se analizó el precio en comparación con el valor del rendimiento y se pudo comprobar que las innovaciones en el diseño XBee-PRO alcanzan un rango 2 – 3x en la gama de módulos del estándar ZigBee y que la sensibilidad del receptor presenta mayor alcance y fiabilidad. Lo que permite cubrir más terreno con menor cantidad de dispositivos.

Las características técnicas de estos dispositivos se muestran a continuación:

Características de los Equipos WSN

XBee™ & XBee-PRO™ 2.4 GHz OEM RF Modules			
ESPECIFICACIONES			
RENDIMIENTO	Rango de interiores / zona urbana	hasta 100 pies (30 m)	hasta 300 pies (100 m)
	Rango RF exterior de la línea de visión	hasta 300 pies (100 m)	hasta 1 milla (1.6 km)
	Potencia de transmisión	1 mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm), 100 mW PIRE
	Tasa de datos RF	250000 bps	250000 bps
	Sensibilidad del receptor	-92 DBm (1% PER)	-100 DBm (1% PER)
REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA	Tensión de alimentación	2.8 a 3.4 V	2.8 a 3.4 V

	Transmisión de Corriente (típica)	45 mA @ 3.3 V	270 mA @ 3.3 V
	Recepción de Corriente (típica)	50 mA @ 3.3 V	55 mA @ 3.3 V
	Apagado de Corriente	<10 μ A	<10 μ A
GENERAL	Frecuencia	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
	Dimensiones	2.438cm x 2.761cm	2.438cm x 3.294cm
	Temperatura de funcionamiento	-40° a 85° C (industrial)	-40° a 85° C (industrial)
	Opciones de antena	Conector U.FL, Chip Antenna o Whip Antenna	Conector U.FL, Chip Antenna o Whip Antenna
RED Y SEGURIDAD	Topologías de red compatibles	Punto a punto, punto a multipunto, punto a punto y mesh	Punto a punto, punto a multipunto, punto a punto y mesh
	Número de canales	16 canales de secuencia directa (software seleccionable)	13 canales en secuencia directa (software seleccionable)
	Opciones de filtración	Canal, PAN ID & direcciones origen / destino	Canal, PAN ID & direcciones origen / destino

ANEXO 5

**CÓDIGO DE SIMULACIÓN EN NS-2
PARA LA WSN CON UNA POTENCIA
DE 60 [mW]**

CÓDIGO

```

# =====
# RED IEEE 802.15.4
# NO. DE NODOS 16
# Potencia = 0.060 W
# PRx = 4.86e-12
# Umbral = -83.1336 dBm
# Distancia Max = 500 m
# =====

# =====
# DECLARACIÓN DE VARIABLES
# =====
# Modelo de Propagación:      TwoRayGround
# Protocolo de enrutamiento:  AODV

set val(chan)           Channel/WirelessChannel      ;# Channel Type
set val(prop)           Propagation/TwoRayGround     ;# radio-propagation model
set val(netif)          Phy/WirelessPhy/802_15_4     ;# network interface type
set val(mac)            Mac/802_15_4                ;# MAC type
set val(ifq)            Queue/DropTail/PriQueue      ;# interface queue type /Modelo de
colas(fifo)/Da prioridad a los protocolos de enrutamiento. Interfaz de colas
set val(ll)            LL                            ;# link layer type
set val(ant)            Antenna/OmniAntenna          ;# antenna model
set val(ifqlen)        150                           ;# max packet in ifq
set val(nn)            16                            ;# number of mobilenodes
set val(rp)            AODV                          ;# routing protocol
set val(x)             2000                          ;# Dimension de la topografía en X (m)
set val(y)             250                           ;# Dimension de la topografía en Y (m)

set val(nam)           final2.nam                    ;# Archivo .nam
set val(traffic)       cbr                           ;# Tipo de trafico cbr/poisson/ftp

# Phy/WirelessPhy set Pt_ 8.5872e-4                  ;# For 40m transmission range.
# Phy/WirelessPhy set Pt_ 7.214e-3                  ;#For 100m transmission range
# Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.2818                    ;#For 250m transmission range.
# ;# Potencia en W / Por defecto es 24.5 dBm

# Read command line arguments
proc getCmdArgv {argc argv} {
    global val
    for {set i 0} {$i < $argc} {incr i} {
        set arg [lindex $argv $i]
        if {[string range $arg 1 1] != "-"} continue
        set name [string range $arg 1 end]
        set val($name) [lindex $argv [expr $i+1]]
    }
}
getCmdArgv $argc $argv

set appTime1           0.0                           ;# in seconds
set appTime2           0.3                           ;# in seconds
set appTime3           0.5                           ;# in seconds
set appTime4           0.7                           ;# in seconds
set appTime5           0.9                           ;# in seconds
set appTime6           2.1                           ;# in seconds
set appTime7           2.3                           ;# in seconds
set appTime8           2.5                           ;# in seconds
set appTime9           2.7                           ;# in seconds
set appTime10          2.9                           ;# in seconds
set appTime11          3.1                           ;# in seconds
set appTime12          3.3                           ;# in seconds
set appTime13          3.5                           ;# in seconds
set appTime14          3.9                           ;# in seconds
set stopTime           300                           ;# in seconds - tiempo de simulacion

# =====
# MAIN PROGRAM
# =====

# Inicialización de NS
set ns_                 [new Simulator]

# Inicialización del archivo trace
set traceFd             [open ./final2.tr w]

```

```

# Guarda el valor de la ventana
$ns_ trace-all $tracefd

# Inicialización del demo de animacion
if { "$val(nam)" == "final2.nam" } {
    set namtrace [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
}

$ns_ puts-nam-traceall {# nam4wpan #} ;# informar Nam que se trata de un archivo
de traza para WPAN (tratamiento especial necesario)

Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on ;#sin estos 2 comandos no se ven los colores
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on ;# default = off (should be turned on before
other 'wpanNam' commands can work)
#Mac/802_15_4 wpanNam ColFlashClr gold ;# default = gold
#Mac/802_15_4 wpanNam NodeFailClr grey ;# default = grey

# For model 'TwoRayGround'/ Distancia vs Potencia Tx
set dist(1m) 0.000192278
set dist(5m) 7.69113e-06
set dist(9m) 2.37381e-06
set dist(10m) 1.92278e-06
set dist(11m) 1.58908e-06
set dist(12m) 1.33527e-06
set dist(13m) 1.13774e-06
set dist(14m) 9.81011e-07
set dist(15m) 8.54570e-07
set dist(16m) 7.51087e-07
set dist(20m) 4.80696e-07
set dist(25m) 3.07645e-07
set dist(30m) 2.13643e-07
set dist(35m) 1.56962e-07
set dist(40m) 1.20174e-07
set dist(50m) 7.69113e-08
set dist(75m) 3.41828e-08
set dist(100m) 1.42681e-08
set dist(125m) 5.8442e-09
set dist(150m) 2.81838e-09
set dist(175m) 1.52129e-09
set dist(200m) 8.91754e-10
set dist(225m) 5.56717e-10
set dist(250m) 3.65262e-10
set dist(500m) 2.28289e-11
#set dist(1000m) 1.00e-13
set dist(1000m) 1.42681e-12
#set dist(1000m) 6e-14

#Pr = PtGtGrht^2hr^2 / (Ld^4)
#L = 1
#Antenna Gain : 1
#Antanna height 1.5m

# =====
# create node 0-15, receiving range 100m, carrier sensing range 500m
# =====

Phy/WirelessPhy set CPTthresh_ 10.0 ;#Umbral de captura (CPTthresh_)
;#Cuando se recibe dos señales simultáneamente, se podrá detectar
;#exitosamente a la de mayor potencia cuando esta sea mayor en 10dB
;#a la otra señal
Phy/WirelessPhy set CSTthresh_ 4.86e-12 ;#100m con -83.1336 db de Umbral
;#Umbral de sensado de portadora (CSTthresh_)
;#Es el rango de sensado de portadora de los nodos. Debe ser al menos
;#del mismo valor que el umbral de recepción.
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 4.86e-12 ;#100m con -83.1336 db de Umbral
;#Umbral de recepción (RXThresh_)
;#Es la mínima potencia con la que se recibe un paquete para que este
;#pueda ser detectado exitosamente.
;#Phy/WirelessPhy set bandwidth_ 512kb
Mac/802_15_4 set dataRate_ 250kb
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.060
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.4e+9
Phy/WirelessPhy set L_ 1.0
#Parametros antena Omnidireccional
#Antenna/OmniAntenna set X_ 0

```



```

#Antenna/OmniAntenna set Y_ 0
#Antenna/OmniAntenna set Z_ 0
Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1.0
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1.0

# set up topography object
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

# Create God
set god_ [create-god $val(nn)]

set chan_1_ [new $val(chan)]
# Variacion de Potencia

# =====
# CONFIGURACION DE NODOS
# =====
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace OFF \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
        #-energyModel "EnergyModel" \
        #-initialEnergy 1 \
        #-rxPower 0.3 \
        #-txPower 0.3 \
    -channel $chan_1_

# =====
# DEFINICION DE NODOS
# =====

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0           ;# disable random motion
}

# Archivo con la ubicacion de los nodos
source ./final2.scn

# =====
# GENERACION DEL TRAFICO
# =====

# TRAFICO CBR
proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_
    set tcp($src) [new Agent/TCP]           ;# tcp Tx
    eval $ns_ attach-agent \($node_($src) \) $tcp($src) ;# Vincular Agente/tcp al nodo_($src)
    set null($dst) [new Agent/Null]         ;# tcp Rx
    eval $ns_ attach-agent \($node_($dst) \) $null($dst) ;# Vincular Null al nodo_($dst)
    set cbr($src) [new Application/Traffic/CBR] ;# TRAFICO CBR
    eval \($cbr($src) set rate_ 250k        ;# DataRate
    eval \($cbr($src) set packetSize_ 127   ;# Tamaño del paquete en Byte
    eval \($cbr($src) set interval_ $interval ;# Intervalo de Tx
    eval \($cbr($src) set random_ 0        ;# Intervalo random de Tx
    #eval \($cbr($src) set maxpkts_ 10000   ;# Max conjunto de paquetes
    eval \($cbr($src) attach-agent \) $tcp($src) ;# Vincular App/Traffic/CBR al
Agent/tcp
    eval $ns_ connect \) $tcp($src) \) $null($dst) ;# Establecer conexion entre los dos
agentes
    $ns_ at $starttime "$cbr($src) start"
}

proc poissontraffic { src dst interval starttime } {

```

```

global ns_ node_
set udp($src) [new Agent/UDP]
eval $ns_ attach-agent $node_($src) $udp($src)
set null($dst) [new Agent/Null]
eval $ns_ attach-agent $node_($dst) $null($dst)
set expl($src) [new Application/Traffic/Exponential]
eval $expl($src) set packetSize_ 127
eval $expl($src) set burst_time_ 0
eval $expl($src) set idle_time_ [expr
$interval*1000.0-70.0*8/250]ms ;# idle_time + pkt_tx_time = interval
eval $expl($src) set rate_ 250k ;# DataRate
eval $expl($src) attach-agent $udp($src)
eval $ns_ connect $udp($src) $null($dst)
$ns_ at $starttime "$expl($src) start"
}

# ESTABLECER EL DEMO DE ANIMACION NAM
if { ("$(traffic)" == "cbr") } {
puts "\nTraffic: $(traffic)"
#Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data on
puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data]]
set lowSpeed 0.5ms
set highSpeed 1.5ms
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed

$ns_ at [expr $appTime1+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime2 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime2+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime3 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime3+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime4 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime4+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime5 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime5+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime6 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime6+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime7 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime7+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime8 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime8+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime9 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime9+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime10 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime10+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime11 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime11+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime12 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime12+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime13 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime13+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime14 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime14+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"

eval $val(traffic)traffic 4 6 0.2 $appTime1
eval $val(traffic)traffic 6 1 0.2 $appTime2
eval $val(traffic)traffic 1 0 0.2 $appTime3
eval $val(traffic)traffic 7 8 0.2 $appTime4
eval $val(traffic)traffic 8 9 0.2 $appTime5
eval $val(traffic)traffic 9 0 0.2 $appTime6
eval $val(traffic)traffic 12 2 0.2 $appTime7
eval $val(traffic)traffic 11 2 0.2 $appTime8
eval $val(traffic)traffic 10 2 0.2 $appTime9
eval $val(traffic)traffic 2 0 0.2 $appTime10
eval $val(traffic)traffic 15 3 0.2 $appTime11
eval $val(traffic)traffic 14 3 0.2 $appTime12
eval $val(traffic)traffic 13 3 0.2 $appTime13
eval $val(traffic)traffic 3 0 0.2 $appTime14

Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
#Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p MAC -s 0 -d -1 -c navy

set pktType cbr

# Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 19 -d 6 -c blue
# Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 10 -d 4 -c green4
# Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 3 -d 2 -c cyan4

```

```

Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 4 -d 6 -c DarkTurquoise
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 6 -d 1 -c violet
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 1 -d 0 -c cyan4
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 7 -d 8 -c HotPink
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 8 -d 9 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 9 -d 0 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 12 -d 2 -c yellow
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 11 -d 2 -c orange
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 10 -d 2 -c magenta
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 2 -d 0 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 15 -d 3 -c pink
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 14 -d 3 -c navy
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 13 -d 3 -c purple4
Mac/802_15_4 wlanNam FlowClr -p $pktType -s 3 -d 0 -c maroon

$ns_ at $appTime1 "$node_(4) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$node_(6) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) cbr traffic from node 4 to node
6\""
$ns_ at $appTime2 "$node_(6) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$node_(1) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime2) cbr traffic from node 6 to node
1\""
$ns_ at $appTime3 "$node_(1) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$node_(0) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) cbr traffic from node 1 to node
0\""
$ns_ at $appTime4 "$node_(7) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$node_(8) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime4) cbr traffic from node 7 to node
8\""
$ns_ at $appTime5 "$node_(8) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$node_(9) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5) cbr traffic from node 8 to node
9\""
$ns_ at $appTime6 "$node_(9) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$node_(0) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime6) cbr traffic from node 9 to node
0\""
$ns_ at $appTime7 "$node_(12) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$node_(2) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime7) cbr traffic from node 12 to node
2\""
$ns_ at $appTime8 "$node_(11) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$node_(2) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime8) cbr traffic from node 11 to node
2\""
$ns_ at $appTime9 "$node_(10) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$node_(2) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime9) cbr traffic from node 10 to node
2\""
$ns_ at $appTime10 "$node_(2) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$node_(0) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime10) cbr traffic from node 2 to
node 0\""
$ns_ at $appTime11 "$node_(15) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$node_(3) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime11) cbr traffic from node 15 to
node 3\""
$ns_ at $appTime12 "$node_(14) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$node_(3) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime12) cbr traffic from node 14 to
node 3\""
$ns_ at $appTime13 "$node_(13) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$node_(3) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime13) cbr traffic from node 13 to
node 3\""
$ns_ at $appTime14 "$node_(3) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime14 "$node_(0) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime14 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime14) cbr traffic from node 3 to
node 0\""
}

# TRAFICO FTP
proc ftptraffic { src dst starttime } {
    global ns_ node_

```

```

set tcp($src) [new Agent/TCP] ;# TCP Tx
eval \${tcp($src) set rate_ 250k ;# DataRate
eval \${tcp($src) set packetSize_ 127 ;# Tamaño del paquete en Byte
set sink($dst) [new Agent/TCPSink] ;# TCP Rx
eval $ns_ attach-agent \${node_($src)} \${tcp($src)} ;# Vincular Agente/TCP al nodo_($src)
eval $ns_ attach-agent \${node_($dst)} \${sink($dst)} ;# Vincular Agente/TCPSink al
nodo_($dst)
eval $ns_ connect \${tcp($src)} \${sink($dst)} ;# Establecer conexion entre los dos
agentes
set ftp($src) [new Application/FTP] ;# APLICACION FTP
eval \${ftp($src) attach-agent \${tcp($src)} ;# Vincular Application/FTP al
Agente/TCP
$ns_ at $starttime "$ftp($src) start"
}

if { "$val(traffic)" == "ftp" } {
puts "\nTraffic: ftp"
#Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data off
puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data]]
set lowSpeed 0.20ms
set highSpeed 1.5ms
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed
$ns_ at [expr $appTime1+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime2 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime2+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime3 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime3+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1ms"
$ns_ at $appTime4 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime4+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime5 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime5+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime6 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime6+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime7 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime7+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime8 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime8+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1ms"
$ns_ at $appTime9 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime9+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime10 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime10+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime11 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime11+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime12 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime12+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime13 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime13+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime14 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime14+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"

ftptraffic 4 6 $appTime1
ftptraffic 6 1 $appTime2
ftptraffic 1 0 $appTime3
ftptraffic 7 8 $appTime4
ftptraffic 8 9 $appTime5
ftptraffic 9 0 $appTime6
ftptraffic 12 2 $appTime7
ftptraffic 11 2 $appTime8
ftptraffic 10 2 $appTime9
ftptraffic 2 0 $appTime10
ftptraffic 15 3 $appTime11
ftptraffic 14 3 $appTime12
ftptraffic 13 3 $appTime13
ftptraffic 3 0 $appTime14

# ftptraffic 19 6 $appTime1
# ftptraffic 10 4 $appTime2
# ftptraffic 3 2 $appTime3
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 4 -d 6 -c DarkTurquoise
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 6 -d 4 -c DarkTurquoise
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 6 -d 1 -c violet
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 1 -d 6 -c violet
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 1 -d 0 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 1 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 7 -d 8 -c HotPink

```

```

Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 8 -d 7 -c HotPink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 8 -d 9 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 9 -d 8 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 9 -d 0 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 9 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 12 -d 2 -c yellow
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 12 -c yellow
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 11 -d 2 -c orange
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 11 -c orange
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 10 -d 2 -c magenta
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 10 -c magenta
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 2 -d 0 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 2 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 15 -d 3 -c pink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 15 -c pink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 14 -d 3 -c navy
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 14 -c navy
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 13 -d 3 -c purple4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 13 -c purple4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 3 -d 0 -c maroon
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 3 -c maroon

$ns_ at $appTime1 "$node_(4) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$node_(6) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) ftp traffic from node 4 to node
6\""
$ns_ at $appTime2 "$node_(6) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$node_(1) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime2) ftp traffic from node 6 to node
1\""
$ns_ at $appTime3 "$node_(1) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$node_(0) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) ftp traffic from node 1 to node
0\""
$ns_ at $appTime4 "$node_(7) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$node_(8) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime4) ftp traffic from node 7 to node
8\""
$ns_ at $appTime5 "$node_(8) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$node_(9) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5) ftp traffic from node 8 to node
9\""
$ns_ at $appTime6 "$node_(9) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$node_(0) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime6) ftp traffic from node 9 to node
0\""
$ns_ at $appTime7 "$node_(12) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$node_(2) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime7) ftp traffic from node 12 to node
2\""
$ns_ at $appTime8 "$node_(11) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$node_(2) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime8) ftp traffic from node 11 to node
2\""
$ns_ at $appTime9 "$node_(10) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$node_(2) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime9) ftp traffic from node 10 to node
2\""
$ns_ at $appTime10 "$node_(2) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$node_(0) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime10) ftp traffic from node 2 to
node 0\""
$ns_ at $appTime11 "$node_(15) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$node_(3) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime11) ftp traffic from node 15 to
node 3\""
$ns_ at $appTime12 "$node_(14) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$node_(3) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime12) ftp traffic from node 14 to
node 3\""
$ns_ at $appTime13 "$node_(13) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$node_(3) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime13) ftp traffic from node 13 to
node 3\""
$ns_ at $appTime14 "$node_(3) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime14 "$node_(0) NodeClr maroon"

```

```

    $ns_ at $appTime14 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime14) ftp traffic from node 3 to
node 0\""
}

# defines the node size in nam
for {set i 4} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 5
}

    $ns_ initial_node_pos $node_(0) 7
    $ns_ initial_node_pos $node_(1) 7
    $ns_ initial_node_pos $node_(2) 7
    $ns_ initial_node_pos $node_(3) 7

# =====
# FINALIZACION
# =====

# Tell nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $stopTime "$node_($i) reset";
}

# Llamar al proceso "stop" a los 300 s
$ns_ at $stopTime "stop"
$ns_ at $stopTime "puts \"\\nNS EXITING...\""
$ns_ at $stopTime "$ns_ halt"

# Definicion del proceso stop
proc stop {} {
    global ns_ tracefd val env
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
    set hasDISPLAY 0
    foreach index [array names env] {
        #puts "$index: $env($index)"
        if { ("DISPLAY" == "DISPLAY") && ("env($index)" != "") } {
            set hasDISPLAY 1
        }
    }
    if { ("final2.nam" == "final2.nam") && ("hasDISPLAY" == "1") } {
        exec nam final2.nam &
    }
}

# Correr simulacion
puts "\\nStarting Simulation..."
$ns_ run

```

ANEXO 6

**CÓDIGO DE SIMULACIÓN EN NS-2
PARA LA WSN CON UNA POTENCIA
DE 1 [mW]**

CÓDIGO

```

=====
# RED IEEE 802.15.4
# NO. DE NODOS 16
# Potencia = 0.001 W
# PRx = 1.97753906e-13
# Umbral = -97.0387 dBm
# Distancia Max = 400 m
# =====

# =====
# DECLARACIÓN DE VARIABLES
# =====
# Modelo de Propagación:          TwoRayGround
# Protocolo de enrutamiento:      AODV

set val(chan)           Channel/WirelessChannel      ;# Channel Type
set val(prop)           Propagation/TwoRayGround     ;# radio-propagation model
set val(netif)         Phy/WirelessPhy/802_15_4     ;# network interface type
set val(mac)           Mac/802_15_4                ;# MAC type
set val(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue      ;# interface queue type /Modelo de
colas(fifo)/Da prioridad a los protocolos de enrutamiento. Interfaz de colas
set val(ll)            LL                           ;# link layer type
set val(ant)           Antenna/OmniAntenna          ;# antenna model
set val(ifqlen)        150                          ;# max packet in ifq
set val(nn)            16                            ;# number of mobilenodes
set val(rp)            AODV                          ;# routing protocol
set val(x)             2000                          ;# Dimension de la topografía en X (m)
set val(y)             250                          ;# Dimension de la topografía en Y (m)

set val(nam)           final.nam                    ;# Archivo .nam
set val(traffic)       cbr                          ;# Tipo de trafico cbr/poisson/ftp

# Phy/WirelessPhy set Pt_ 8.5872e-4                 ;# For 40m transmission range.
# Phy/WirelessPhy set Pt_ 7.214e-3                 ;# For 100m transmission range
# Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.2818                   ;# For 250m transmission range.
# ;# Potencia en W / Por defecto es 24.5 dBm

# Read command line arguments
proc getCmdArgv {argc argv} {
    global val
    for {set i 0} {$i < $argc} {incr i} {
        set arg [lindex $argv $i]
        if {[string range $arg 1 1] != "-"} continue
        set name [string range $arg 1 end]
        set val($name) [lindex $argv [expr $i+1]]
    }
}
getCmdArgv $argc $argv

set appTime1          0.0                          ;# in seconds
set appTime2          0.3                          ;# in seconds
set appTime3          0.5                          ;# in seconds
set appTime4          0.7                          ;# in seconds
set appTime5          0.9                          ;# in seconds
set appTime6          2.1                          ;# in seconds
set appTime7          2.3                          ;# in seconds
set appTime8          2.5                          ;# in seconds
set appTime9          2.7                          ;# in seconds
set appTime10         2.9                          ;# in seconds
set appTime11         3.1                          ;# in seconds
set appTime12         3.3                          ;# in seconds
set appTime13         3.5                          ;# in seconds
set appTime14         3.9                          ;# in seconds
set stopTime          300                          ;# in seconds - tiempo de simulacion

# =====
# MAIN PROGRAM
# =====

# Inicialización de NS
set ns_                [new Simulator]

# Inicialización del archivo trace
set tracefd            [open ./final.tr w]

```



```

# Guarda el valor de la ventana
$ns_ trace-all $tracefd

# Inicialización del demo de animacion
if { "$val(nam)" == "final.nam" } {
    set namtrace [open ./$val(nam) w]
    $ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)
}

$ns_ puts-nam-traceall {# nam4wpan #}           ;# informar Nam que se trata de un archivo
de traza para WPAN (tratamiento especial necesario)

Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on                ;#sin estos 2 comandos no se ven los colores
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on             ;# default = off (should be turned on before
other 'wpanNam' commands can work)
#Mac/802_15_4 wpanNam ColFlashClr gold        ;# default = gold
#Mac/802_15_4 wpanNam NodeFailClr grey       ;# default = grey

# For model 'TwoRayGround'/ Distancia vs Potencia Tx
set dist(1m) 0.000192278
set dist(5m) 7.69113e-06
set dist(9m) 2.37381e-06
set dist(10m) 1.92278e-06
set dist(11m) 1.58908e-06
set dist(12m) 1.33527e-06
set dist(13m) 1.13774e-06
set dist(14m) 9.81011e-07
set dist(15m) 8.54570e-07
set dist(16m) 7.51087e-07
set dist(20m) 4.80696e-07
set dist(25m) 3.07645e-07
set dist(30m) 2.13643e-07
set dist(35m) 1.56962e-07
set dist(40m) 1.20174e-07
set dist(50m) 7.69113e-08
set dist(75m) 3.41828e-08
set dist(100m) 1.42681e-08
set dist(125m) 5.8442e-09
set dist(150m) 2.81838e-09
set dist(175m) 1.52129e-09
set dist(200m) 8.91754e-10
set dist(225m) 5.56717e-10
set dist(250m) 3.65262e-10
set dist(500m) 2.28289e-11
#set dist(1000m) 1.00e-13
set dist(1000m) 1.42681e-12
#Pr = PtGtGrht^2hr^2 / (Ld^4)
#L = 1
#Antenna Gain : 1
#Antenna height 1.5m

# =====
# create node 0-15, receiving range 100m, carrier sensing range 400m
# =====

Phy/WirelessPhy set CPTthresh_ 10.0           ;#Umbral de captura (CPTthresh_)
;#Cuando se recibe dos señales simultáneamente, se podrá detectar
;#exitosamente a la de mayor potencia cuando esta sea mayor en 10dB
;#a la otra señal
Phy/WirelessPhy set CSTthresh_ 1.97753906e-13 ;#100m con -97.0387 db de Umbral
;#Umbral de sensado de portadora (CSTthresh_)
;#Es el rango de sensado de portadora de los nodos. Debe ser al menos
;#del mismo valor que el umbral de recepción.
Phy/WirelessPhy set RXthresh_ 1.97753906e-13 ;#100m con -97.0387 db de Umbral
;#Umbral de recepción (RXthresh_)
;#Es la mínima potencia con la que se recibe un paquete para que este
;#pueda ser detectado exitosamente.
#Phy/WirelessPhy set bandwidth_ 250kb
Mac/802_15_4 set dataRate_ 250kb
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.001
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.4e+9
Phy/WirelessPhy set L_ 1.0
#Parametros antena Omnidireccional
#Antenna/OmniAntenna set X_ 0
#Antenna/OmniAntenna set Y_ 0
#Antenna/OmniAntenna set Z_ 0

```

```

Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1.0
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1.0

# set up topography object
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

# Create God
set god_ [create-god $val(nn)]

set chan_1_ [new $val(chan)]
# Variacion de Potencia

# =====
# CONFIGURACION DE NODOS
# =====
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
    -llType $val(ll) \
    -macType $val(mac) \
    -ifqType $val(ifq) \
    -ifqLen $val(ifqlen) \
    -antType $val(ant) \
    -propType $val(prop) \
    -phyType $val(netif) \
    -topoInstance $topo \
    -agentTrace OFF \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace ON \
    -movementTrace OFF \
        #-energyModel "EnergyModel" \
        #-initialEnergy 1 \
        #-rxPower 0.3 \
        #-txPower 0.3 \
    -channel $chan_1_

# =====
# DEFINICION DE NODOS
# =====

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0 ;# disable random motion
}

# Archivo con la ubicacion de los nodos
source ./final.scn

# =====
# GENERACION DEL TRAFICO
# =====

# TRAFICO CBR
proc cbrtraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_
    set tcp($src) [new Agent/TCP] ;# tcp Tx
    eval $ns_ attach-agent $node_($src) $tcp($src) ;# Vincular Agente/tcp al nodo_($src)
    set null($dst) [new Agent/Null] ;# tcp Rx
    eval $ns_ attach-agent $node_($dst) $null($dst) ;# Vincular Null al nodo_($dst)
    set cbr($src) [new Application/Traffic/CBR] ;# TRAFICO CBR
    eval $cbr($src) set rate_ 250k ;# DataRate
    eval $cbr($src) set packetSize_ 127 ;# Tamaño del paquete en Byte
    eval $cbr($src) set interval_ $interval ;# Intervalo de Tx
    eval $cbr($src) set random_ 0 ;# Intervalo random de Tx
    #eval $cbr($src) set maxpkts_ 10000 ;# Max conjunto de paquetes
    eval $cbr($src) attach-agent $tcp($src) ;# Vincular App/Traffic/CBR al
Agent/tcp
    eval $ns_ connect $tcp($src) $null($dst) ;# Establecer conexion entre los dos
agentes
    $ns_ at $starttime "$cbr($src) start"
}

proc poissontraffic { src dst interval starttime } {
    global ns_ node_

```

```

set udp($src) [new Agent/UDP]
eval $ns_ attach-agent $node_($src) $udp($src)
set null($dst) [new Agent/Null]
eval $ns_ attach-agent $node_($dst) $null($dst)
set expl($src) [new Application/Traffic/Exponential]
eval $expl($src) set packetSize_ 127
eval $expl($src) set burst_time_ 0
eval $expl($src) set idle_time_ [expr
$interval*1000.0-70.0*8/250]ms                ;# idle_time + pkt_tx_time = interval
eval $expl($src) set rate_ 250k                ;# DataRate
eval $expl($src) attach-agent $udp($src)
eval $ns_ connect $udp($src) $null($dst)
$ns_ at $starttime "$expl($src) start"
}

# ESTABLECER EL DEMO DE ANIMACION NAM
if { (" $val(traffic)" == "cbr") } {
puts "\nTraffic: $val(traffic)"
#Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data on
puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data]]
set lowSpeed 0.5ms
set highSpeed 1.5ms
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed

$ns_ at [expr $appTime1+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime2 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime2+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime3 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime3+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime4 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime4+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime5 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime5+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime6 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime6+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime7 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime7+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime8 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime8+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime9 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime9+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime10 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime10+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime11 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime11+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime12 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime12+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime13 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime13+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime14 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime14+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"

eval $val(traffic)traffic 4 6 0.2 $appTime1
eval $val(traffic)traffic 6 1 0.2 $appTime2
eval $val(traffic)traffic 1 0 0.2 $appTime3
eval $val(traffic)traffic 7 8 0.2 $appTime4
eval $val(traffic)traffic 8 9 0.2 $appTime5
eval $val(traffic)traffic 9 0 0.2 $appTime6
eval $val(traffic)traffic 12 2 0.2 $appTime7
eval $val(traffic)traffic 11 2 0.2 $appTime8
eval $val(traffic)traffic 10 2 0.2 $appTime9
eval $val(traffic)traffic 2 0 0.2 $appTime10
eval $val(traffic)traffic 15 3 0.2 $appTime11
eval $val(traffic)traffic 14 3 0.2 $appTime12
eval $val(traffic)traffic 13 3 0.2 $appTime13
eval $val(traffic)traffic 3 0 0.2 $appTime14

Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
#Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p MAC -s 0 -d -1 -c navy

set pktType cbr

# Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 19 -d 6 -c blue
# Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 10 -d 4 -c green4
# Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 3 -d 2 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 4 -d 6 -c DarkTurquoise

```

```

Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 6 -d 1 -c violet
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 1 -d 0 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 7 -d 8 -c HotPink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 8 -d 9 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 9 -d 0 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 12 -d 2 -c yellow
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 11 -d 2 -c orange
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 10 -d 2 -c magenta
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 2 -d 0 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 15 -d 3 -c pink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 14 -d 3 -c navy
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 13 -d 3 -c purple4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p $pktType -s 3 -d 0 -c maroon

$ns_ at $appTime1 "$node_(4) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$node_(6) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) cbr traffic from node 4 to node
6\""
$ns_ at $appTime2 "$node_(6) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$node_(1) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime2) cbr traffic from node 6 to node
1\""
$ns_ at $appTime3 "$node_(1) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$node_(0) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) cbr traffic from node 1 to node
0\""
$ns_ at $appTime4 "$node_(7) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$node_(8) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime4) cbr traffic from node 7 to node
8\""
$ns_ at $appTime5 "$node_(8) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$node_(9) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5) cbr traffic from node 8 to node
9\""
$ns_ at $appTime6 "$node_(9) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$node_(0) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime6) cbr traffic from node 9 to node
0\""
$ns_ at $appTime7 "$node_(12) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$node_(2) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime7) cbr traffic from node 12 to node
2\""
$ns_ at $appTime8 "$node_(11) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$node_(2) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime8) cbr traffic from node 11 to node
2\""
$ns_ at $appTime9 "$node_(10) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$node_(2) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime9) cbr traffic from node 10 to node
2\""
$ns_ at $appTime10 "$node_(2) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$node_(0) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime10) cbr traffic from node 2 to
node 0\""
$ns_ at $appTime11 "$node_(15) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$node_(3) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime11) cbr traffic from node 15 to
node 3\""
$ns_ at $appTime12 "$node_(14) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$node_(3) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime12) cbr traffic from node 14 to
node 3\""
$ns_ at $appTime13 "$node_(13) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$node_(3) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime13) cbr traffic from node 13 to
node 3\""
$ns_ at $appTime14 "$node_(3) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime14 "$node_(0) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime14 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime14) cbr traffic from node 3 to
node 0\""
}

# TRAFICO FTP
proc ftptraffic { src dst starttime } {
    global ns_ node_
    set tcp($src) [new Agent/TCP]

```

```

};# TCP Tx

```

```

eval \${tcp($src) set rate_ 250k                                     ;# DataRate
eval \${tcp($src) set packetSize_ 127                             ;# Tamaño del paquete en Byte
set sink($dst) [new Agent/TCPsink]                                ;# TCP Rx
eval $ns_ attach-agent \${node_($src) \${tcp($src)                ;# Vincular Agente/TCP al nodo_($src)
eval $ns_ attach-agent \${node_($dst) \${sink($dst)               ;# Vincular Agente/TCPsink al
nodo_($dst)
eval $ns_ connect \${tcp($src) \${sink($dst)                      ;# Establecer conexion entre los dos
agentes
set ftp($src) [new Application/FTP]                                ;# APLICACION FTP
eval \${ftp($src) attach-agent \${tcp($src)                        ;# Vincular Application/FTP al
Agente/TCP
$ns_ at $starttime "$ftp($src) start"
}

if { "$val(traffic)" == "ftp" } {
puts "\nTraffic: ftp"
#Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data off
puts [format "Acknowledgement for data: %s" [Mac/802_15_4 wpanCmd ack4data]]
set lowSpeed 0.20ms
set highSpeed 1.5ms
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed
$ns_ at [expr $appTime1+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime2 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime2+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime3 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime3+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1ms"
$ns_ at $appTime4 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime4+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime5 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime5+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime6 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime6+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime7 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime7+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime8 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime8+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 1ms"
$ns_ at $appTime9 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime9+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime10 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime10+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime11 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime11+0.2] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime12 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime12+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime13 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime13+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"
$ns_ at $appTime14 "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $lowSpeed"
$ns_ at [expr $appTime14+0.1] "Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate $highSpeed"

ftptraffic 4 6 $appTime1
ftptraffic 6 1 $appTime2
ftptraffic 1 0 $appTime3
ftptraffic 7 8 $appTime4
ftptraffic 8 9 $appTime5
ftptraffic 9 0 $appTime6
ftptraffic 12 2 $appTime7
ftptraffic 11 2 $appTime8
ftptraffic 10 2 $appTime9
ftptraffic 2 0 $appTime10
ftptraffic 15 3 $appTime11
ftptraffic 14 3 $appTime12
ftptraffic 13 3 $appTime13
ftptraffic 3 0 $appTime14

# ftptraffic 19 6 $appTime1
# ftptraffic 10 4 $appTime2
# ftptraffic 3 2 $appTime3
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p AODV -c tomato
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ARP -c green
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 4 -d 6 -c DarkTurquoise
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 6 -d 4 -c DarkTurquoise
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 6 -d 1 -c violet
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 1 -d 6 -c violet
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 1 -d 0 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 1 -c cyan4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 7 -d 8 -c HotPink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 8 -d 7 -c HotPink

```

```

Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 8 -d 9 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 9 -d 8 -c DarkCyan
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 9 -d 0 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 9 -c DeepSkyBlue
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 12 -d 2 -c yellow
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 12 -c yellow
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 11 -d 2 -c orange
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 11 -c orange
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 10 -d 2 -c magenta
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 2 -d 10 -c magenta
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 2 -d 0 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 2 -c PaleVioletRed
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 15 -d 3 -c pink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 15 -c pink
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 14 -d 3 -c navy
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 14 -c navy
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 13 -d 3 -c purple4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 3 -d 13 -c purple4
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p tcp -s 3 -d 0 -c maroon
Mac/802_15_4 wpanNam FlowClr -p ack -s 0 -d 3 -c maroon

$ns_ at $appTime1 "$node_(4) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$node_(6) NodeClr DarkTurquoise"
$ns_ at $appTime1 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime1) ftp traffic from node 4 to node
6\""
$ns_ at $appTime2 "$node_(6) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$node_(1) NodeClr violet"
$ns_ at $appTime2 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime2) ftp traffic from node 6 to node
1\""
$ns_ at $appTime3 "$node_(1) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$node_(0) NodeClr cyan4"
$ns_ at $appTime3 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime3) ftp traffic from node 1 to node
0\""
$ns_ at $appTime4 "$node_(7) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$node_(8) NodeClr HotPink"
$ns_ at $appTime4 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime4) ftp traffic from node 7 to node
8\""
$ns_ at $appTime5 "$node_(8) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$node_(9) NodeClr DarkCyan"
$ns_ at $appTime5 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime5) ftp traffic from node 8 to node
9\""
$ns_ at $appTime6 "$node_(9) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$node_(0) NodeClr DeepSkyBlue"
$ns_ at $appTime6 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime6) ftp traffic from node 9 to node
0\""
$ns_ at $appTime7 "$node_(12) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$node_(2) NodeClr yellow"
$ns_ at $appTime7 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime7) ftp traffic from node 12 to node
2\""
$ns_ at $appTime8 "$node_(11) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$node_(2) NodeClr orange"
$ns_ at $appTime8 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime8) ftp traffic from node 11 to node
2\""
$ns_ at $appTime9 "$node_(10) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$node_(2) NodeClr magenta"
$ns_ at $appTime9 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime9) ftp traffic from node 10 to node
2\""
$ns_ at $appTime10 "$node_(2) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$node_(0) NodeClr PaleVioletRed"
$ns_ at $appTime10 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime10) ftp traffic from node 2 to
node 0\""
$ns_ at $appTime11 "$node_(15) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$node_(3) NodeClr pink"
$ns_ at $appTime11 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime11) ftp traffic from node 15 to
node 3\""
$ns_ at $appTime12 "$node_(14) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$node_(3) NodeClr navy"
$ns_ at $appTime12 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime12) ftp traffic from node 14 to
node 3\""
$ns_ at $appTime13 "$node_(13) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$node_(3) NodeClr purple4"
$ns_ at $appTime13 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime13) ftp traffic from node 13 to
node 3\""
$ns_ at $appTime14 "$node_(3) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime14 "$node_(0) NodeClr maroon"
$ns_ at $appTime14 "$ns_ trace-annotate \"(at $appTime14) ftp traffic from node 3 to
node 0\""

```

```

}

# defines the node size in nam
for {set i 4} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 5
}

    $ns_ initial_node_pos $node_(0) 7
    $ns_ initial_node_pos $node_(1) 7
    $ns_ initial_node_pos $node_(2) 7
    $ns_ initial_node_pos $node_(3) 7

# =====
# FINALIZACION
# =====

# Tell nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $stopTime "$node_($i) reset";
}

# Llamar al proceso "stop" a los 300 s
$ns_ at $stopTime "stop"
$ns_ at $stopTime "puts \"\\nNS EXITING...\""
$ns_ at $stopTime "$ns_ halt"

# Definicion del proceso stop
proc stop {} {
    global ns_ tracefd val env
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
    set hasDISPLAY 0
    foreach index [array names env] {
        #puts "$index: $env($index)"
        if { (" $index" == "DISPLAY") && (" $env($index)" != "") } {
            set hasDISPLAY 1
        }
    }
    if { (" $val(nam)" == "final.nam") && (" $hasDISPLAY" == "1") } {
        exec nam final.nam &
    }
}

# Correr simulacion
puts "\\nStarting Simulation..."
$ns_ run

```

FECHA DE ENTREGA

El presente proyecto de grado fue entregado en la fecha.

Sangolquí, _____ 2011

Realizado por:

Diana Natali Apolo Cárdenas

Ing. Gonzalo Olmedo

COORDINADOR DE CARRERA DE TELECOMUNICACIONES