Metaheurísticas aplicadas a la optimización de cobertura de señales de radio frecuencia aplicando un modelo de propagación adaptable

Daniel Molina

LabTEm - Laboratorio de Tecnologías Emergentes
Universidad Nacional de la Patagonia Austral
Ruta N° 3 Acceso Norte - Caleta Olivia
Santa Cruz
Argentina

e-mail: dmolina@uaco.unpa.edu.ar

Tesis para optar por el grado de
Magister en Informática y Sistemas

Director:

Dr. Guillermo Leguizamón
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Co-directora:

Mg. Andrea Villagra
Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Argentina

A las dos mujeres que hacen posible mi vida, mi compañera de ruta y mi hija...

Agradecimientos

Esta tesis de maestría existe gracias al apoyo incondicional de las personas que formaron parte de este camino. En primer lugar quiero agradecer a mi director, el Dr. Guillermo Leguizamón por su confianza al aceptarme como su alumno, a mi co directora, Mg. Andrea Villagra quien supo siempre alentarme en los momentos más difíciles y por sus valiosos aportes en mi formación como investigador y tesista. Al Mg. Daniel Pandolfi, cuyas ideas siempre contribuyeron a aclarar los momentos más oscuros de las dudas. Al equipo de proyecto del LabTEm y la Universidad Nacional de la Patagonia Austral, por el continuo apoyo y los valiosos aportes para el desarrollo de este trabajo.

Y mi más profundo agradecimiento a mi familia, por haber soportado mis ausencias durante todo este tiempo.

Prólogo

La popularización de los servicios inalámbricos de comunicación (telefonía, internet, etc.) es cada vez mayor en la actualidad. La demanda hace que los usuarios exijan la disponibilidad de estos servicios en todo momento y en cualquier lugar. El costo de los equipamientos para brindar el servicio con la calidad adecuada es elevado por lo tanto es fundamental realizar la correcta selección de los emplazamientos geográficos que permitan lograr una cobertura óptima de señal minimizando el uso de equipamientos. Esta tarea se la denomina diseño de la red de radio (RND) y es un problema NP-duro de optimización, por lo tanto, es factible de ser tratado con metaheurísticas. Dados los buenos resultados obtenidos por el algoritmo CHC *(Crossover elitism population, Half uniform crossover combination, Cataclysm mutation)* aplicado a este problema, en el presente trabajo se continuó la investigación generando seis versiones del algoritmo denominadas: QCHC-RE, QCHC-TE, QCHC-ML, QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS. Las tres primeras versiones se basaron en el uso de diferentes métodos de selección poblacional y el resto de las versiones en variaciones del método de sacudida.

En particular, QCHC-ILS es una propuesta híbrida donde se utiliza una búsqueda local iterada como método de sacudida. Además, se usa un mecanismo de detección de convergencia basado en la variabilidad de la población, un método de detección de incesto basado en la variabilidad de los individuos seleccionados para el apareamiento y una función objetivo orientada a la eficiencia de la cobertura de señal en el terreno. Como parámetro de rendidmiento se generaron un conjunto de instancias de complejidad creciente y se aplicaron Agoritmos Genéticos (AGs) con operadores de corte de un punto (AG-OPX), dos puntos (AG-TPX) y cruzamiento uniforme (AG-UX). Los resultados obtenidos generaron valores de rendimiento para las versiones de CHC.

Se diseñó un experimento consistente en dos etapas: (1) selección de la variante CHC de mejor rendimiento y (2) aplicación de la mejor variante a un caso real. En la etapa de aplicación a un caso real, los aspectos de la realidad que se interrelacionan con la metaheurística para la resolver

el problema son: (a) modelado del terreno para ser tratado computacionalmente y la base de datos de alturas, (b) el modelo de cálculo de enlace que determina la iluminación o no de un punto del terreno, (c) el equipamiento que va a dar el servicio, la configuración de las antenas y los cables que utilizados para su instalación. La metaheurística aplica la función objetivo a lo que denominaremos la matriz heurística para determinar el valor objetivo de cada individuo de la población. La versión denominada QCHC-ILS es la versión con mejores resultados, tanto en la etapa de selección de los algoritmos como en su aplicación a un caso real (yacimientos petroleros en la zona norte de la provincia de Santa Cruz, Argentina).

En el presente trabajo se describen los conceptos teóricos relacionados con comunicaciones, metaheurísticas, modelado de terreno para ser representado computacionalmente y se muestran los resultados obtenidos por cada uno de los algoritmos junto con el análisis estadístico de los mismos.

Organización de la tesis: El presente trabajo de tesis se organiza en cuatro partes, en la primera se desarrollan los conceptos teóricos relacionados con las metaheurísticas y comunicaciones. En la segunda se muestran los modelos computacionales que permiten relacionar los conceptos teóricos de metaheurísticas y comunicaciones aplicados al problema de diseño de la red de radio. En la tercera se desarrolla el experimento que consta de dos etapas, (a) selección de la metaheurística con mejor rendimiento resolviendo instancias de diferentes grados de complejidad y (b) aplicación a un caso real de la metaheurística seleccionada. En la cuarta y última parte se exponen las conclusiones y los trabajos futuros. A continuación se presenta una descripción detallada de cada capítulo:

- El Capítulo 1 da una visión sobre la importancia de las comunicaciones en nuestros días y define el problema asociado que se desea reolver aplicando metaheurísticas. Asímismo, brinda una síntesis sobre el uso de metaheurísticas aplicadas a la resolución de problemas de comunicaciones y establece el marco metodoloógico de investigación con el que se desarrolla el presente trabajo.

- El Capítulo 2 desarrolla los conceptos relacionados con las comunicaciones y los diferentes modelos computacionales que permiten representar un cálculo de enlace. Además, introduce el modelo tradicional de desarrollo de una red de radio y los dos problemas que se tratan en este trabajo, el diseño de la red y el diagrama de cobertura.

- El Capítulo 3 brinda los fundamentos básicos sobre las metaheurísticas en general y las desarrolladas en el presente trabajo.

- El Capítulo 4 presenta los algoritmos propuestos y las variantes para resolver el problema abordado, brindando detalles sobre los mecanismos planteados para lograr las diferentes variantes que se usan en esta tesis. Se establece una relación entre los conceptos teóricos desarrolados con anterioridad y su modelado para ser tratados con metaheurísticas a través de un experimento computacional.

- El Capítulo 5 describe el experimiento que permite evaluar el desempeño de las metaheurísticas seleccionadas y elegir la más apropiada para aplicarla a un caso real. En la etapa de selección, se toma como base comparativa de las variantes propuestas de CHC, al rendimiento de los algoritmos genéticos resolviendo el problema en instancias de creciente complejidad. En la etapa de aplicación a un caso real se toma como escenario de prueba la zona norte de la provincia de Santa Cruz comprendida entre las coordenadas -47^0S y -69^0O a -46^oS y -68^oO, buscando la mejor cobertura inalámbrica para brindar el servicio de telemetría en yacimientos petroleros.

- El Capítulo 6 expone las conclusiones arribadas luego del desarrollo del experimento como así también las líneas de investigación para trabajos futuros.

Indice General

I Fundamentos teóricos **1**

1. Introducción **3**

1.1. Metodología de trabajo 5
1.2. Motivación 8
1.3. Estado del arte 9
1.4. Aportes de la tesis 15

2. Planificación y cálculo de coberturas de una red de radio **19**

2.1. Planificación de la red de radio 19
2.2. Elementos para el cálculo de enlace 21
2.2.1. Zona de Fresnel 22
2.2.2. Pérdida 24
2.2.3. Margen de desvanecimiento 24
2.2.4. Ganancia 24
2.2.5. La ecuación de enlace 25
2.2.6. Modelo matemático de comunicaciones 25
2.2.7. El modelo Longly Rice 26
2.2.8. Componentes de una instalación 31
2.2.9. Alimentadores 31
2.2.10. Las antenas 32
2.3. Modelo digital del terreno 33
2.3.1. Construcción del MDE 34
2.3.2. Modelo raster 37
2.4. Altimetría SRTM 39
2.5. Trazo de líneas rectas para las trayectorias del rayo . . . 40
2.5.1. Ecuación de la recta 41
2.5.2. Algoritmo DDA para el trazo de líneas 41

2.6. Conclusiones 44

3. Conceptos de metaheurísticas 45

3.1. Definición de metaheurística 45

3.2. Clasificación de las metaheurísticas 46

3.3. Metaheurísticas basadas en trayectoria 48

3.3.1. Recocido simulado (SA) 49

3.3.2. Búsqueda local iterada (ILS) 51

3.4. Metaheurísticas basadas en población 51

3.4.1. Algoritmos genéticos (AGs) 53

3.4.2. Algoritmo CHC 60

3.5. Indicadores de rendimiento 63

3.5.1. Diseño de experimentos 63

3.5.2. Parámetros de desempeño 64

3.5.3. Reportes 66

3.6. Conclusiones 66

II Modelos Computacionales 67

4. Modelado del problema 69

4.1. Discretización de la superficie 69

4.2. Diagrama de cobertura de una antena 71

4.3. Modelado de una red de radio 72

4.4. La función objetivo 74

4.4.1. Ejemplo de aplicación de la función objetivo . . . 75

4.5. Definición del equipamiento de comunicaciones 81

4.6. Aplicación del modelo Longly Rice 81

4.7. Modelado de los componentes metaheurísticos 82

4.7.1. Algoritmos CHC propuestos 82

4.7.2. Mecanismos de selección poblacional 86

4.7.3. Mecanismos de cataclismo 89

4.8. Conclusiones 93

III Diseño de experimento y evaluación de los algoritmos propuestos 95

5. Diseño y evaluación de los algoritmos propuestos para el problema de RND 97

5.1. Descripción del experimento 97

5.2. Fase de selección 98

5.2.1. Aplicación de los AGs a las instancias artificiales 99

5.2.2. Aplicación de los CHCs propuestos a las instancias artificiales 102

5.2.3. Comparativas entre los AGs y los QCHCs en las instancias artificiales 106

5.2.4. Aplicación de QCHC-ILS a un caso real 112

5.2.5. Conclusiones 118

IV Conclusiones y trabajos futuros 121

6. Conclusiones 123

Indice de figuras

2.1. Proceso Analítico de una red móvil 20
2.2. Elipsoide de Fresnel 23
2.3. Atenuación de referencia 31
2.4. Muestreo continental SRTM 40

3.1. Metaheurísticas como método de optimización 46
3.2. Metaheurísticas basadas en trayectoria y población . . . 48
3.3. Relación entre la metaheurística y la Biología 54
3.4. Operador de cruce simple 58
3.5. Operador de cruce de dos puntos 59
3.6. Operador de cruce uniforme 59
3.7. Operador de mutación 60
3.8. Operador de mutación HUX 62

4.1. Discretización de una superficie de terreno. 70
4.2. Representación gráfica del terreno y parte de la Matriz M con alturas relevadas como modelo raster 70
4.3. Modelado de una red de radio. 73
4.4. Terreno caracterizado con valores de cobertura de una red de radio. 73

5.1. Instancias resueltas por los algoritmos propuestos 107
5.2. Representación gráfica del terreno del caso real. 114
5.3. Proceso de aplicación de las metaheurísticas a un caso real. 116

Indice de Tablas

1.1. Estado del arte para el problema de RND 10

2.1. Parámetros de entada para el modelo ITM 28
2.2. Valores sugeridos para el parámetro de terreno irregular . 29
2.3. Valores sugeridos para las constantes eléctricas del terreno 29
2.4. Valores sugeridos para N_S en función del clima 30

4.1. Modelado de puntos del terreno cubiertos por una antena omnidireccional 71
4.2. Distribución de sitios candidatos 76
4.3. Matriz de distibución de antenas R_1 76
4.4. Matriz de cobertura para R_1 76
4.5. Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_1 77
4.6. Matriz de distribución de antenas R_2 77
4.7. Matriz de cobertura para R_2 78
4.8. Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_2 78
4.9. Matriz de distribución de antenas R_3 78
4.10. Matriz de cobertura de antenas R_3 79
4.11. Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_3 79
4.12. Matriz de distribución de antenas R_4 79
4.13. Matriz de cobertura de antenas R_4 80
4.14. Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_4 80
4.15. Valoración de soluciones candidatas 80

5.1. Configuraciones de los escenarios de cobertura 99

5.2. Porcentaje de éxitos obtenidos por AG-UX, AG-OPX y AG-TPX 100
5.3. Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño tiempo por AG-UX, AG-OPX y AG-TPX 101
5.4. Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño número de evaluaciones por AG-UX, AG-OPX y AG-TPX 101
5.5. Porcentaje de éxitos obtenidos por QCHC-RE, QCH-TE y QCHC-ML 102
5.6. Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño tiempo por QCHC-RE, QCH-TE y QCHC-ML 103
5.7. Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño número de evaluaciones por por QCHC-RE, QCH-TE y QCHC-ML 103
5.8. Porcentaje de éxitos obtenidos por QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS 104
5.9. Valores promedio para la variable de desempeño tiempo obtenidos por QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS . 105
5.10. Valores promedio para la variable de desempeño número de evaluaciones obtenidos por QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS 105
5.11. Porcentaje de éxitos obtenidos por los algoritmos 107
5.12. Instancias con el 100 % de éxitos logrados por cada algoritmo 108
5.13. Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño tiempo 108
5.14. Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño número de evaluaciones 109
5.15. Test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable de desempeño tiempo 109
5.16. Test de Levene para la variable de desempeño tiempo . . 110

5.17. Test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable de desempeño número de evaluaciones 110
5.18. Test de Levene para la variable de desempeño número de evaluaciones 110
5.19. Resultados de test de Kruskal-Wallis, Wilcoxon y Tukey aplicado a los resultados de los algoritmos para la variable de desempeño tiempo 111
5.20. Resultados de test de Kruskal-Wallis, Wilcoxon y Tukey aplicado a los resultados de los algoritmos para la variable de desempeño número de evaluaciones 112
5.21. Parámetros de entrada del modelo Longley - Rice 114
5.22. Configuración del equipamiento utilizado 115
5.23. Valores promedio obtenidos para las variables de desempeño analizadas. 117
5.24. Test de Kolgomorov-Smirnov para las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones 117
5.25. Test de Levene para las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones 117

Parte I

Fundamentos teóricos

Capítulo 1

Introducción

Desde 1873 cuando el físico escocés James C. Maxwell realizó la fundamentación matemática que sustenta el campo de las telecomunicaciones, el aporte de los investigadores permitió el desarrollo de las más modernas aplicaciones de nuestros días, tales como Internet, telefonía celular, televisión digital y satelital entre otras. La palabra telecomunicación proviene del griego *tele* que significa lejos y se traduce como comunicación a distancia. Se la puede definir como una técnica que consiste en transmitir un mensaje desde un punto a otro. Cubre todas las formas de comunicación a distancia a través de medios dirigidos (cables de cobre o fibras ópticas) y no dirigidos (forma inalámbrica). En particular, los sistemas no dirigidos quizás sean los mayores generadores del crecimiento de las comunicaciones de hoy en día. Tienen la capacidad de vencer la limitación física de un medio dirigido o basado en cable permitiendo al usuario poder desplazarse hacia cualquier lugar donde tenga un nivel de señal aceptable. Básicamente un medio de comunicación inalámbrico se compone de un emisor y un receptor y las ondas electro magnéticas trasladan el mensaje entre ambos generando un intercambio de mensajes. Para que este fenómeno pueda ser posible, el emisor genera una señal que debe llegar al receptor con un nivel adecuado de calidad para que este pueda entender el mensaje. Las ondas al desplazarse por el espacio libre están sujetas a ruidos (atenuación, reflexión, refracción y difracción) provocados por fenómenos atmosféricos y obstáculos [65]. Como consecuencia se generan pérdidas en el nivel de la señal emitida haciendo que muchas veces el receptor no sea capaz de decodificar el mensaje. Es importante

destacar que a nivel de radio frecuencia, el comportamiento de la señal en el espacio libre es independiente de la tecnología o el servicio que se desee brindar (radio, televisión, telefonía celular, internet, etc.). Por lo tanto, lograr el posicionamiento de las antenas de manera tal que la mayoría de los receptores puedan tener una línea de vista sin obstáculos, asegurando un nivel de señal la mayor parte del tiempo es un gran desafío. La tarea responsable de resolver este problema según la forma tradicional se la denomina RND [74]. Según [11] el problema del posicionamiento de antenas puede ser descripto como: dado un conjunto de sitios candidatos, un área geográfica discretizada y un conjunto de puntos que deben intercomunicarse entre sí, se debe seleccionar un subconjunto de sitios, del conjunto de sitios candidatos, que maximicen la cobertura empleando el mínimo de recursos, cumpliendo con la estimación de tráfico y el umbral de recepción de señal entre los puntos. La complejidad del problema le da una característica del tipo NP-Duro [25], por lo que el uso de las metaheurísticas es un enfoque viable para su resolución. Una de las características más importantes de las metaheurísticas es su generalidad para ser aplicadas a diversos problemas de optimización [71]. Podemos ver que en [22] se presenta un algoritmo denominado algoritmo adaptativo para el posicionamiento de radio bases (ABPA) que utiliza *Simulated Annealing* (SA) para el análisis de las soluciones y un modelo de línea de vista (LOS) para determinar el nivel de cobertura de la señal. En [4] también se utiliza SA aplicado a este problema y se lo puede considerar como uno de los primeros antecedentes en el tema.

Los Algoritmos Genéticos (AGs), son métodos adaptativos, generalmente utilizados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción sexual y en el principio de supervivencia del más apto [37], [39]. El algoritmo CHC es un AG no tradicional que combina una estrategia de selección conservativa que siempre preserva los mejores individuos encontrados [78]. El operador de recombinación produce descendientes que maximizan sus diferencias genéticas con respecto a sus padres. La reproducción sólo se lleva a cabo si la distancia de Hamming (diferencia genética entre los padres) es mayor al umbral establecido. El operador de cruzamiento HUX *(Half Uniform Crossover)*

maximiza la distancia genética entre los individuos. La nueva población se genera con una selección de los mejores individuos. Cuando el algoritmo converge se produce un reinicio de la población conservando los mejores individuos. Basados en el enfoque tradicional de diseño de una red de radio, se propone analizar y evaluar metaheurísticas para encontrar una solución aceptable al problema de RND. Para este caso en particular, se propone trabajar en las etapas a) Definición de la red de radio y b) Análisis de propagación, aplicando el modelo de cálculo de cobertura explicado en [43]. Esto permite incluir un gran espectro de bandas de radio frecuencia (de 20 Mhz a 20 Ghz) y distancias (de 1 km a 2000 km). Tomando como base el algoritmo CHC canónico propuesto en [17] se generan distintas versiones del algoritmo CHC y se realiza una comparación con los AGs. De esta manera se cubren distintos servicios con diferentes escenarios. Las metaheurísticas serán las responsables de la búsqueda del mejor diagrama de cobertura de la red de radio. Para todos los algoritmos propuestos se utiliza una función objetivo que relaciona la cobertura de la red de radio y el uso de los recursos utilizados, basada en la proporcionalidad de la cobertura de la superficie con respecto a la señal irradiada. También minimiza las interferencias por superposición de lóbulos de radiación y el uso de radio bases como recursos de elevado costo. Se presentan escenarios de diferentes grados de complejidad de manera tal que pueda evaluarse el desempeño de cada algoritmo propuesto a medida aumenta el grado de complejidad del problema.

1.1. Metodología de trabajo

La metodología utilizada fue la consensuada en el Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEm) para los investigadores en el desarrollo de proyectos que trabajen con Metaheurísticas, siguiendo las fases típicas que establece la filosofía del método científico [6], [27], según definió F. Bacon:

- **Observación:** Es el paso inicial de toda investigación, observar es aplicar atentamente los sentidos a un objeto o a un fenómeno, para

estudiarlos tal como se presentan en realidad. La industria de las telecomunicaciones ha proporcionado, y sigue proporcionando, una gran cantidad de problemas de optimización que surgen desde el propio diseño del sistema de comunicación hasta algunos aspectos de su funcionamiento. La resolución de estos problemas ha jugado, sin lugar a dudas, un papel muy destacado en el desarrollo y utilización de este tipo de sistemas. El tamaño de los sistemas de telecomunicaciones ha ido creciendo y, por tanto, los problemas adquirieron una dimensión tan elevada que los hacen inabordables con técnicas exactas. El estudio del estado del arte sobre este tema nos indica que desde el surgimiento de esta temática las investigaciones se han orientado hacia la optimización del diseño en redes móviles, en particular las redes celulares en ambientes urbanos. Se observa que la misma metodología de diseño para redes celulares puede extenderse a otros tipos de servicio (radio, televisión, internet, etc.) que pueden ser distribuidos de forma inalámbrica en ambientes rurales y urbanos.

- **Planteo de la hipótesis:** En general se necesita una solución que permita modelar una amplia gama de servicios basados en señales de radio frecuencia sobre una determinada área de cobertura, sin importar el tipo de geografía o servicios que se desea prestar. Para ello, se necesitaría contar con los siguientes elementos:

  - Una herramienta de optimización: ésta debe ser independiente, adaptable, que pueda ser evaluada cuantitativamente para validar los resultados obtenidos. Las metaheurísticas son métodos que integran procedimientos de mejora local y estrategias de alto nivel para realizar una búsqueda robusta en el espacio del problema [33], [71]. El problema de selección de sitios para diagramas de cobertura es un problema de tipo NP-Duro, por lo que es apto para ser tratado con metaheurísticas [54].

  - Un modelo de propagación: Los obstáculos y superficies reflectantes que se encuentran en las proximidades de una antena tienen una influencia sustancial en la propagación de las ondas

electromagnéticas [65]. El modelo requerido para la herramienta debe ser adaptable de manera sencilla a un entorno urbano o rural, que permita incluir una amplia gama de señales de radio frecuencia, independizándolo del tipo de servicio y la geografía y que permita sacar conclusiones válidas sobre la predicción de señal sobre la zona a cubrir.

- Una herramienta de diseño de redes de radio frecuencia: El modelo de diseño de redes de radio propuestos por [74] plantea una arquitectura de diseño en capas originalmente para redes de celulares. En cada una de las etapas se pueden aplicar metaheurísticas [9] que permitan generar información para resolver los aspectos correspondientes a la capa superior.
- Aplicación a un caso real: Para demostrar la adaptabilidad a diferentes problemas de las metaheurísticas y la independencia del modelo de propagación se plantea la necesidad de generar un escenario geográfico y un servicio diferente al utilizado en las redes móviles.

A partir del planteo de la hipótesis se definen los siguientes objetivos:

- **General**
  - Análisis, estudio e implementación de metaheurísticas utilizando un modelo de propagación de radio frecuencia real en la resolución del problema de localización de antenas para la distribución de servicios inalámbricos.
- **Específicos**
  - Profundización sobre las metaheurísticas utilizadas para la resolución del problema de RND.
  - Estudio del funcionamiento, eficiencia y limitaciones de los algoritmos implementados.
  - Evaluación conjunta y comparativa de las metaheurísticas utilizadas.

  - Realización de pruebas estadísticas a fin de la analizar la calidad de los resultados obtenidos.

- **Probar la hipótesis por experimentación:** Se implementaron algoritmos basados en las mejoras propuestas en la hipótesis de trabajo y se realizaron experimentos.

- **Demostración o refutación de la hipótesis**: Se realizaron análisis estadísticos a los resultados obtenidos por los algoritmos desarrollados, comparándolos exhaustivamente con los resultados de los algoritmos canónicos.

- **Conclusiones:** Se presentan las conclusiones obtenidas tras el trabajo de tesis y las líneas de trabajo futuro que surjan de este estudio.

El método científico, se sustenta en dos ejes básicos: la reproducibilidad y falsabilidad. Mientras el primero hace referencia a la condición de poder reproducir los efectos de un proceso siempre que se mantengan los condicionantes del mismo, el segundo establece que toda proposición científica tiene que ser susceptible de ser falseada. Respecto a la reproducibilidad, se presentan en todo momento los detalles necesarios para que los experimentos que se incluyen en este trabajo puedan reproducirse (pseudocódigos, tablas de parámetros, código fuente). En cuanto a la falsabilidad, los resultados de los estudios se presentan de forma clara, estructurada y sencilla.

1.2. Motivación

Los medios inalámbricos de comunicación quizás sean los mayores generadores del crecimiento de las comunicaciones de hoy en día. El tamaño de los sistemas de telecomunicaciones ha ido creciendo y, por tanto, los problemas adquirieron una dimensión tan elevada que los hacen inabordables con técnicas exactas. A través del estudio del estado del arte se llega a la conclusión que la resolución del problema RND utilizando metaheurísticas solamente se aplicó para el servicio de telefonía móvil. Es por ello que la investigación se orientó hacia una manera de poder

modelar cualquier servicio inalámbrico, incluyendo a la telefonía celular en cualquier lugar del mundo. La industria petrolera de la zona norte de la provincia de Santa Cruz en Argentina, proporciona el marco ideal para probar los algoritmos desarrollados en la presente tesis. El proceso de producción de petróleo (extracción, transporte y venta), involucra una amplia serie de controles en cada una de sus etapas. Por lo tanto, el monitoreo y control del proceso es fundamental para cualquier compañía petrolera. Los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) permiten la gestión y control de cualquier sistema local o remoto gracias a una interfaz gráfica o HMI *(Human Machine Interface)* que comunica al usuario con el sistema [66]. Esto hace que el uso de sistemas SCADA, con pantallas ubicadas en puntos estratégicos, sea de vital importancia para una compañía petrolera. Para que el SCADA funcione se debe alimentar el sistema con señales de sensores ubicados a kilómetros de distancia. Además, con este control se supervisa de forma automática los posibles puntos de falla que pueden provocar derrames que implican pérdidas y un impacto ambiental. Para lograr la comunicación entre tanta cantidad de dispositivos (miles de pozos petroleros por yacimiento) se necesita una red de radio con una cobertura eficiente.

1.3. Estado del arte

La industria de las telecomunicaciones ha proporcionado, y sigue proporcionando, una gran cantidad de problemas de optimización que surgen desde el propio diseño del sistema de comunicación hasta algunos aspectos de su funcionamiento. La resolución de estos problemas ha jugado, sin lugar a dudas, un papel muy destacado en el desarrollo y utilización de este tipo de sistemas. El tamaño de los sistemas de telecomunicaciones ha ido creciendo, por tanto, los problemas adquirieron una dimensión tan elevada que los hacen inabordables con técnicas exactas [76]. La Tabla 1.1 muestra un resumen en orden cronológico de los estudios más relevantes realizados hasta la fecha.

Tabla 1.1: Estado del arte para el problema de RND

Año	Título y Autor	Descripción
1986	*Cellular Radio Network Planning*, (A. Gamst et al.)	Presenta un enfoque para abordar el problema RND al que se denominó *Analytical Approach to Cellular Network Planning* [23]. En base a este enfoque, se desarrollaron una serie de herramientas que aún se utilizan para la planificación de celdas de redes celulares como *GRANT* o *PLANET* de *Mobile Systems International Ltd.* El proceso consta de cuatro fases (1) Definición de la Red de Radio, (2) Análisis de Propagación, (3) Asignación de Frecuencias y (4) Análisis de la Red de Radio que se repiten de forma iterativa.
1993 y 1995	*Field strength prediction by ray-tracing for adaptive base station positioning in mobile communication network*, (Th. Fritsch et al.)	El Algoritmo Adaptativo de Posicionamiento de Estaciones Base, *Adaptative Base Station Positioning Algorithm* (ABPA), hace uso de una versión del concepto de Nodo de Demanda [22]. Utiliza SA *(Simulated Anneling)* para el análisis de las soluciones y un modelo de Línea de Vista (LOS) para determinar el nivel de cobertura de la señal. Se basa en la idea de competición de estaciones base que intentan cubrir tantos nodos de demanda como sea posible.
1997	*Genetic Approach to Radio Network Optimization for Mobile Systems*, (P. Calegari et al.)	Resuelve el problema de RND [8] con un algoritmo genético canónico, utiliza el método de la ruleta como mecanismo de selección, un tipo de cruce simple con un único punto y una mutación de un bit seleccionado al azar con una probabilidad del 90 %.
2000	Applying Data Mining Methods for Cellular Radio Network Planning, (P. Gawrysiak et al.)	Se aplican técnicas de minería de datos para la resolución del problema de planificación de redes de telecomunicación [28]. Entre las técnicas que proponen aplicar en este contexto destacan los árboles de decisión, el *clustering* de datos mediante el algoritmo K-Medias, Redes Neuronales, Regresión y Reglas de Asociación.

Año	Título y Autor	Descripción
2001	*A Heuristic Approach for Antenna Positioning in Cellular Networks*, (M. Vasquez et al.)	Se plantea el uso de una heurística para resolver el problema de RND [76], formada por tres fases secuenciales. La fase uno ejecuta el preprocesamiento de las restricciones del problema, eliminando de esta forma un gran número de "malas" combinaciones. La fase dos ejecuta una optimización utilizando Búsqueda Tabú (TS) sobre un espacio de búsqueda reducido. La fase tres es de post optimización ejecutando la sintonía fina de los parámetros de las antenas.
2002	*Radio network design using coarse-grained parallel genetic algorithms with different neighbor topology*, (G. Tongcheng et al.)	El problema de la elección de ubicaciones las ubicaciones óptimas de una red de radio, en un área conocida se aborda mediante algoritmos genéticos paralelos de grano grueso, que maximizan la cobertura al tiempo que reduce el número de transmisores utilizados [73]. Se utiliza un operador de búsqueda local exclusivo y se analiza su impacto en diferentes topologías de vecindarios. Simulaciones en un clúster dedicado demuestran que el operador de búsqueda local es muy eficaz.
2004	*Evolutionary Algorithms for Optimal Placement of Antennae in Radio Network Design*, (E. Alba et al.)	Se propone el uso de algoritmos evolutivos para dar solución al problema de RND [2]. Se desarrolan y evalúan un conjunto de Algorimos Genéticos en sus versiones secuencial y paralela. Los resultados obtenidos muestran que el algoritmo genético de Estado Estacionario es una herrramientoa eficaz y precisa para resolver el problema de RND superando inclusive a las versiones paralelas.
2006	*A Differential Evolution Based Algorithm to Optimize the Radio Network Design Problem*, (S. Mendes et al.)	La resolución del problema RND se lleva a cabo empleando evolución diferencial (ED) [55]. La ED es un algoritmo creado por [70], que desde 1994 ha sido utilizado para resolver numerosos problemas de optimización con resultados muy satisfactorios. Los resultados obtenidos se ofrecen como base de comparación para futuras investigaciones.
2007	*Using Omnidirectional BTS and Different Evolutionary Approaches to Solve the RND Problem*, (S.P. Mendes et al.)	Se estudia el rendimiento de cuatro algoritmos evolutivos [77] para la resolución del problema de RND: PBIL *(Population Based Incremental Learning)*, evolución diferencial (ED), SA y CHC *(Cross-generational elitist selection, Heterogeneous recombination, and Cataclysmic mutation).*

Año	Título y Autor	Descripción
2007	*Optimal Antenna Placement Using a New Multi-Objetive CHC Algorithm*, (A. J. Nebro et al.)	El algoritmo CHC multiobjetivo, sustituye el funcionamiento del criterio elitista ordenando los individuos mediante un método de ranking y crowding [59]. Los resultados que se obtuvieron fueron muy favorables, ya que se mejoraron los resultados existentes hasta el momento y alcanzó la solución optima con un coste computacional bastante bajo. El algoritmo ofrece todo un conjunto final de soluciones no dominadas entre las cuales poder elegir, sin tener en cuenta prejuicios de optimalidad.
2009	*Benchmarking a Wide Spectrum of Metaheuristic Techniques for the Radio Network Design Problem*, (S. Mendes et al.)	Se realiza una revisión general de diferentes metaheurísticas resolviendo el problema de RND [54]. El estudio pretende ofrecer una base de referencia confiable sobre un amplio espectro de algoritmos y medidas precisas de comparación de la eficiencia, confiabilidad y rapidez de las diferentes técnicas aplicadas a la resolución del RND.
2010	*Optimization of UMTS Network Planning Using Genetic Algorithms*, (F. Garzia et al.)	El continuo crecimiento de las redes celulares complejidad, que siguió a la introducción de la tecnología UMTS, ha reducido la utilidad de las herramientas de diseño tradicionales, haciéndolas bastante ineficientes [26]. El propósito del trabajo es ilustrar una herramienta de diseño para planificación de redes UMTS basada en algoritmos genéticos teniendo en cuenta sus aspectos específicos y las restricciones típicas que se encutran en las situaciones reales.
2011	*Evolutionary multiobjective optimization of cellular base station locations using modified NSGA-II*, (N. Lakshminarasimman et al.)	En este trabajo varios parámetros de las radio base de celulares tales como las coordenadas del sitio, la potencia de transmisión, la altura y el ángulo de las antenas son determinados utilizando algoritmos evolutivos multi-objetivo [47]. Las ubicaciones óptimas de las estaciones bases se determina utilizando NSGA-II y MNSGA-II *(Modified Non dominated Sorting Genetic Algorithm II)*. Las simulaciones muestran que las técnicas propuestas son muy apropiadas para su uso en la determinación de la ubicación de una radio base en un problema del mundo real.
2012	*A Novel PSO-Based Algorithm for the Optimal Location of Controllers in Wireless Networks*, (Dac-Nhuong Le et al.)	La ubicación óptima de los controladores en las redes inalámbricas es un importante problema en el proceso de diseño de las redes móviles de celular [49]. En este trabajo se presenta un algoritmo basado en cúmulo de partículas (PSO) para resolver el problema. La función objetivo se determina mediante la distancia total basada en encontrar el máximo flujo de tranposrte de la red utilizado el algorimto Ford-Fulkerson [21] para satisfacer las restricciones de capacidad.

Año	Título y Autor	Descripción
2013	*Genetic algorithms to optimize base station sitting in WCDMA networks*, (N. Erradi et al.)	La planificación en las redes de tipo UMTS *(Universal Mobile Telecommunications System)* no sólo están basadas en predicciones de cobertura, también deben considerarse la distribución de tráfico, los mecanismos de control de potencia y sus límites junto con las restricciones de calidad de la señal [16]. El trabajo está orientado a optimizar el número de estaciones base utilizados en las redes de radio de tipo WCDMA *(Wideband Code Division Multiple Access)*. Se busca un óptimo entre dos objetivos contrapuestos, la maximización de la cobertura del tráfico y la disminución de los costos de instalación de las radio bases. Se muestra el uso de un algoritmo memético (AM), que utiliza un AG con búsqueda local iterada (ILS) para la búsqueda de una buena solución para el problema. Los resultados numéricos son obtenidos mediante un conjunto de instancias y son generados utilizando modelos clásicos de propagación.
2014	*Base-Station Location Optimization for LTE Systems with Genetic Algorithms. (IK Valavanis et al.)*	Planificar una red 4G LTE *(Long Term Evolution)* es un proceso complejo que combina la planificación de la capacidad y cobertura de la red, para obtener una red efectiva y de bajo costo [75]. Minimizar el costo de una red de celular usualmente incluye seleccionar de manera óptima las ubicaciones de las estanciones base para realizar un determinada cobertura. Para resolver este problema en un entorno de trabajo *wireless* de tipo LTE se propone una metodología de optimización basada en un Algoritmo Genético para identificar de manera estocástica la solución óptima en téminos de cobertura y capacidad en un área determinada.
2014	*Optimal Relay Placement in Cellular Networks*, (M. Minelli et al.)	En este trabajo se direcciona el problema de la búsqueda de la distribución óptima de las celdas orientado hacia la maximización de la capacidad de transporte de las mismas [56]. Se desarrolla una algoritmo de recocido simulado (SA) específico, con adaptación dinámica de la temperatura conforme a las variaciones de energía. Esto permite encontrar la forma de colocar transmisores dentro de las celdas para incrementar la capacidad en caso de producirse un tráfico uniforme o no uniforme.

Año	Título y Autor	Descripción
2014	*Optimized LTE Cell Planning for Multiple User Density Subareas Using Meta-Heuristic Algorithms*, (H. Ghazzai et al.)	El despliegue de las radio bases en las redes de celulares es uno de los problemas fundamentales en el diseño de la red. Se propone un método novedoso para la planificación de redes de celulares de cuarta generación 4G-LTE utilizando algoritmos metaheurísticos [30]. Se utiliza el algoritmo de optimización de partículas (PSO) para encontrar la ubicación óptima de los sitios. Luego se aplica un enfoque iterativo para eliminar una eventual redundancia. Se aplican simulaciones utilizando Monte Carlo para el estudio del rendimiento del esquema propuesto.
2015	*Performance Evaluation of Heuristic Algorithms for Optimal Location of Controllers in Wireless Networks*, (Dac-Nhuong Le et al.)	En este trabajo se muestra un nuevo esquema para el algoritmo basado en colonia de hormigas (ACO) [13] para resolver el problema de RND [48]. La función objetivo se determina mediante la distancia total basada en la matriz de feromonas y las hormigas que son capaces de satisfacer las restricciones para encontar una buena solución aproximada. Los resultados experimentales muestran que el algoritmo propuesto logra un mejor desempeño que los enfoques previos basados en heurísticas y algoritmos evolutivos.
2015	*Particle Swarm Optimization Based Approach for Location Area Planning in Cellular Networks*, (S. Algebary et al.)	El proposito principal de la planificación de la red de celular es la administración de los recursos dentro de la red móvil con el fin de reducir los costos de operación y brindar un servicio de calidad [3]. La registración y actualización son dos factores que pueden ser optimizados y dada la complejidad del problema se pueden utilizar metaheuríticas para resolverlos. En este trabajo se propone el uso del algoritmo de optimización de partículas (PSO) para la resolución del problema realizando experimentos que permiten medir el desempeño con diferentes instancias del problema.
2015	*On Radio network planning for next generation 5G networks: A case study*, (W. El-Beaino et al.)	El continuo crecimiento de la demanda de mejores experiencias en la telefonía móvil, los altos niveles de tráfico de datos y las latencias cada vez menores están dirijiendo el desarrollo de una nueva generación de sistemas inalámbricos, la 5G [15]. La planificación de la red es una de las etapas escenciales para el desarrollo de la red que persigue los objetivos de cobertura, rendimiento y calidad. El trabajo muestra el uso de algoritmos heurísticos aplicados al proceso de planificación de la red 5G. Aunque esta tecnología está en proceso de estandarización se toman aspectos escenciales que consituyen el núcleo de la próxima generación, tales como la portadora de ondas milimétricas y las redes heterogeneas con alta densidad.

Se ha presentado una revisión del estado del arte sobre las distintas formas de abordar el problema de RND. El estado del arte se actualiza día a día con distintas propuestas de investigadores que mejoran la frontera con el aporte de nuevos resultados. Aunque existe una cierta dificultad para encontrar *benchmarks* en este tipo de problemas, se continúa investigando y en este trabajo hemos generado los siguientes aportes que a continuación se describen.

1.4. Aportes de la tesis

Los aportes realizados por esta tesis son los siguientes:

- Desarrollo de una función objetivo basada en la proporcionalidad de la cobertura de la superficie, que minimiza las interferencias por superposición de lóbulos de radiación y el uso de radio bases como recursos de elevado costo.
- Propuesta de un método para el análisis de la eficiencia de algoritmos resolviendo el problema de RND.
- Propuesta de un método de reinicio basado en la variabilidad genética del mejor individuo.
- Desarrollo un nuevo mecanismo de prevención de incesto basado en la variabilidad promedio entre los individuos y una nueva forma de detección de la convergencia basada en la variabilidad de población.
- Uso de la variabilidad de la población como mecanismo para detectar la convergencia prematura y dar una idea general del comportamiento de toda la población con un menor costo computacional.
- Aplicación a un caso real sobre un área de explotación petrolera, dejando un precedente sobre el uso de metaheurísticas para resolver problemas de coberturas en una zona geográfica de la República Argentina.

Se ha llevado adelante una ardua labor de diseminación de las investigaciones realizadas en este trabajo que a continuación se enumeran:

- D. Molina, D. Pandolfi, y A. Villagra. *Aplicación y evaluación de diferentes algoritmos genéticos canónicos en el diseño eficiente de redes de radio frecuencia en comunicaciones inalámbricas.* Revista de Informes Científicos y Técnicos de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral. Vol.5, núm. 3 (2013). pag 135-161.

- D. Molina, D. Pandolfi, y A. Villagra. *Diseño de coberturas de señales de radio frecuencia aplicando metaheurísticas.* III Encuentro de Investigadores de la Patagonia Austral. ISBN 978-987-3714-00-9. 3^{era} Edición.

- D. Molina, D. Pandolfi, A. Villagra, y G. Leguizamón. *Diseño eficiente de redes de radio frecuencia con algoritmos CHC en comunicaciones inalámbricas.* Actas del 2° Congreso Nacional de Ingeniería Informática/Sistemas de Información, CoNaIISI (2014), pag. 125-133. ISSN: 2346-9927

- D. Molina, D. Pandolfi, A. Villagra, y G. Leguizamón. *Metaheurísticas aplicadas a la optimización de cobertura de señales de radio frecuencia con un modelo de propagación adaptable.* XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2014), p. 109-114, Ushuaia, Argentina.

- D. Molina, D. Pandolfi, A. Villagra, y G. Leguizamón. *Applying CHC Algorithms on Radio Network Design for Wireless Communication.* Computer Science & Technology Series, XX Argentine Congress of Computer Science, Selected papers (2015), pag 27-37. ISBN 978-987-1985-71-5.

- D. Molina, D. Pandolfi, A. Villagra, y G. Leguizamón. *Variantes del algoritmo CHC para proyectar redes de radio frecuencia en comunciaciones inalámbricas.* Revista de Informes Científicos y Técnicos de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral. Vol.7, núm. 2 (2015). pag 228-248.

- D. Molina, D. Pandolfi, A. Villagra, y G. Leguizamón. *Hibridación del Algoritmo CHC aplicado al Cálculo de Coberturas en Redes Inalámbricas en Yacimientos Petroleros.* 12 Congreso Interamericano de Computación Aplicado a la Industria de Procesos CAIP 2015. ISBN 978-958-8791-81-4.

- D. Molina, D. Pandolfi, A. Villagra, y G. Leguizamón. *Metaheurísticas aplicadas a la optimización de cobertura de señales de radio frecuencia para telemetrías en yacimientos petroleros.* XVII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2015), Salta, Argentina.

Capítulo 2

Planificación y cálculo de coberturas de una red de radio

En el presente capítulo se desarrollan los conceptos teóricos relacionados con comunicaciones, describiendo la metodología de diseño de la red de radio basada en el enfoque analítico, los fundamentos correspondientes al cálculo de enlace, el modelo matemático Longly Rice para cálculos de coberturas, los componentes físicos de los sistemas de comunicaciones y el modelo digital del terreno utilizado en este trabajo. También se proporciona una breve explicación sobre la fuente de datos de donde se tomaron las alturas del terreno y el algoritmo para el trazo de trayectorias, que permiten encontrar los puntos que componen la superficie de iluminación.

2.1. Planificación de la red de radio

Se han empleado diferentes técnicas y modelos para realizar la planificación de la red celular, el enfoque analítico desarrollado por [23] presenta las etapas que a continuación se describen:

- Definición de la red de radio: Un experto humano selecciona los sitios donde se deben instalar las celdas a fin de obtener una estructura regular, generalmente el concepto más popular es que la distribución de los transmisores sea determinada por una grilla hexagonal sobre el terreno.

- Análisis de propagación: En esta fase se utilizan los parámetros del

transmisor a fin de realizar una evaluación de cobertura mediante métodos predictivos (analíticos) sobre la intensidad de la señal sobre el terreno que se desea cubrir.

- Establecimiento de frecuencias: Los aspectos relacionados con la capacidad de la red de radio se establecen en este punto. En principio se realiza una distribución del posible tráfico dentro de la región planificada basado en la estructura demográfica del área. El número requerido de canales de tráfico y frecuencias de cada celda es computado mediante el uso de técnicas analíticas de planificación de capacidades de tráfico tales como la fórmula Erlang B [5].

- Análisis de la red de radio: En esta etapa se calcula la calidad del servicio que se brindaría sobre el área en estudio. Si las especificaciones sobre el nivel de servicio son alcanzadas, se da por finalizada la tarea, caso contrario se repiten nuevamente todas las etapas. La Figura 2.1 muestra el proceso de planificación basado en este modelo.

Figura 2.1: Proceso Analítico de una red móvil

Desde esta perspectiva podemos inferir que la base del problema surge de la combinación de dos aspectos:

- Topográfico: involucra todo lo relacionado con la posición geográfica de las estaciones y la topología del salto, es decir, lo referido a las cotas y los accidentes del terreno, las coordenadas y azimut (orientación con respecto al norte geográfico) de las estaciones y la distancia entre estaciones.

- Radio eléctrico: abarca todo lo vinculado a la propagación de la onda electromagnética como son los fenómenos de difracción, refracción, absorción, etc. Alcanzar el objetivo de calidad de la red depende de la selección de los sitios donde se instalará la radio base junto con la determinación de los parámetros de radio frecuencia tales como la máxima potencia transmitida, la altura de las antenas o el número de antenas y su orientación sobre sectores determinados. Es importante destacar que este procedimiento puede extenderse a cualquier servicio del tipo inalámbrico, tales como redes, Wifi, telefonía celular, WiMax, TETRA, etc., solamente aplicando el modelo matemático correspondiente al servicio.

2.2. Elementos para el cálculo de enlace

Una transmisión con Radio Frecuencia (RF) requiere que la señal transmitida alcance a la antena receptora con la potencia necesaria para que la señal recibida pueda ser copiada y decodificada sin errores irrecuperables. Cuando se verifica esta condición, se dice que la antena receptora se encuentra alcanzada por el transmisor o también que está en el área de cobertura de la antena emisora. Debemos también tener presente que para el espectro radioeléctrico rigen las leyes de la óptica, y en particular en la banda señalada son importantes los fenómenos de reflexión, refracción, difracción e interferencia. La técnica de modulación de la señal es importante porque con algunas de ellas se requiere que haya entre antenas una trayectoria recta y limpia, es decir sin obstáculos ni elementos que produzcan dispersión. La línea recta entre puntas de

antenas emisoras y receptoras será la trayectoria primaria para la propagación de la señal en estas frecuencias y se las suele llamar trayectoria de espacio libre [72] para el haz y al espacio entre ambas puntas de antena se llama Vano. Cuando esa trayectoria está limpia y sin obstrucciones es cuando formalmente constituye una Línea de Vista o LOS, por su sigla en inglés *line of sight*. Dado que ambas antenas se encuentran elevadas del piso, la propagación de la señal no sufrirá la obstrucción del horizonte si las antenas están a la altura correcta. Si ellas están debajo de la altura correcta, el haz colisionará contra el terreno en el horizonte, sin alcanzar el objetivo. En tal caso diremos que no existe alcance visual porque el haz aterriza. En general, la necesidad de determinar la relación entre la altura de las antenas y el alcance visual se presenta siempre, ya sea porque se tiene fijada la altura de instalación por alguna restricción o bien porque se sabe cuál es el área que se debe cubrir. En general, la necesidad de determinar la relación entre la altura de las antenas y el alcance visual se presenta siempre, ya sea porque se tiene fijada la altura de instalación por alguna restricción o bien porque se sabe cuál es el área que se debe cubrir.

Cuando analizamos una instalación, suponemos que la señal emitida será capaz de seguir sensibilizando al receptor después de haber sido amplificada en las antenas y de sufrir todas las pérdidas a las que estará sometida. Este cálculo es el que se conoce como Cálculo del enlace, y consiste en considerar que desde un transmisor hasta sensibilizar al receptor la señal sufrirá una pérdida en todo el sistema, producto de la sumatoria de pérdidas y la ganancia que encontrará en la trayectoria. Dichas pérdidas pueden verse en la alimentación y la trayectoria, además de prever que habrá que contabilizar un margen para el *fading* o desvanecimiento producto de distintos fenómenos.

2.2.1. Zona de Fresnel

A la recta que determina la línea de vista, y que se usa para calcular el despeje, se la suele llamar eje del haz. Rodeando a dicho eje, se en-

cuentra una zona denominada Zona de Fresnel. En la Figura 2.2 vemos cómo queda generada esta región crítica. Esta zona actúa como una región crítica que no debería ser invadida por ningún objeto, bajo riesgo de que se genere una difracción que degrade adicionalmente la transmisión. Mayor la invasión de la zona, mayor la magnitud de la degradación de la señal. Su existencia se fundamenta estudiando cómo se expanden las ondas electromagnéticas cuando viajan por el espacio libre, lo cual requiere de la teoría de las radiaciones electromagnéticas, pero se encuentra fuera de nuestro interés tal justificación. Dicha zona tiene forma de elipsoide de revolución. El eje mayor del elipsoide coincide con el eje del haz y es el eje de revolución. El eje menor se encuentra en la mitad del vano. Al ser de revolución, el elipsoide genera una zona espacial cuyo corte transversal al eje del haz muestra un área circular. En rigor, se

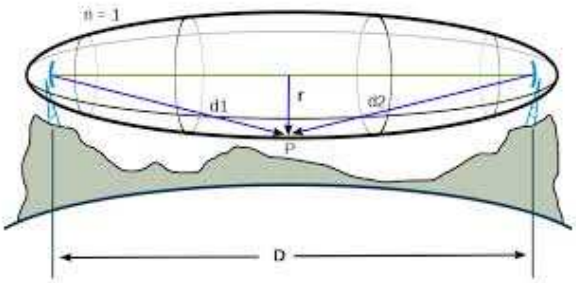


Figura 2.2: Elipsoide de Fresnel

puede demostrar que no existe una única Zona de Fresnel, sino infinitas. Cada una de ellas envuelve a la anterior; así la segunda zona envuelve a la primera, la tercera a la segunda y la enésima a la enésima-menos-uno, etc. Se puede calcular el radio de una zona enésima en un punto genérico mediante la ecuación general dada por la normativa ITU-R I.715 [1]:

$$r_n = 548.\sqrt{\frac{n.d1.d2}{F.D}} \tag{2.1}$$

En la que r_n resulta ser el radio en metros de la zona enésima de Fresnel en el lugar que se desea calcular y n es la enésima que se desea calcular. Nótese que $d1$, $d2$ y D están medidos en Km y la frecuencia F en MHz.

[1] Las recomendaciones ITU-R, constituyen una serie de normas técnicas internacionales desarrolladas por el Sector de Radiocomunicaciones de la ITU (*International Telecomunication Union*).

2.2.2. Pérdida

Se denomina pérdida a la atenuación de la señal desde que esta es generada en el emisor hasta que la misma llega al receptor. Las pérdidas de alimentación son producidas en los alimentadores y están tabuladas. Las llamaremos L_A y se puede ver en general que:

$$L_A(dB) = L_a + L_c + L_x \tag{2.2}$$

Estas pérdidas están compuestas por las que se producen en el cable alimentador, sea éste del tipo coaxial o guía de onda L_a, las que ocurren como consecuencia de la existencia de los conectores o acoples L_c y finalmente las que se presentan por diversidad de la señal L_x. En general estas pérdidas se encuentran tabuladas en el manual del producto. Las pérdidas en la trayectoria se presentan cuando la señal es iradiada y viaja por el medio hasta la antena de destino que capta la señal. En el viaje, se produce una pérdida por atenuación en el medio que es función de la frecuencia F y la longitud del vano D y que recibe el nombre de Pérdida de trayectoria de espacio libre [72], ya que se calculan como si la señal viajara de modo rectilíneo y el medio fuera el espacio libre. La llamaremos pérdidas por trayectoria L_T y para F en GHz y D en Km, se verifica que:

$$L_T(dB) = 99,44 + 20\log(F) + 20\log(D) \tag{2.3}$$

2.2.3. Margen de desvanecimiento

Dado que la propagación ocurre por un espacio no ideal y mediante una trayectoria no libre de interferencias, se presenta un fenómeno llamado desvanecimiento o *fading* que es dependiente de las condiciones específicas que encuentra la propagación. Factores como el tipo de suelo, el tipo de clima y el entorno que rodea a la trayectoria tienen una influencia directa en el cálculo del margen.

2.2.4. Ganancia

La ganancia, se encuentra sólo en las antenas y ésta se encuentra tabulada unitariamente según el tipo de antena y la frecuencia de la trans-

misión. La ganancia de una antena variará en función de su naturaleza (directiva u omnidireccional) su material (rejilla, sólida) y su forma (parabólica, plana, yagui, logarítmica, etc.). Para el caso, llamaremos a la ganancia de la antena:

$$G_A \tag{2.4}$$

medida en dBm (deciBelio miliwatts).

2.2.5. La ecuación de enlace

La ecuación de enlace muestra si la señal emitida por el transmisor a la interfaz, luego de todas las pérdidas y amplificaciones, es aún capaz de sensibilizar al receptor. La pérdida total deviene entonces de la suma algebraica de las pérdidas y ganancias vistas en las ecuaciones anteriores llamaremos Pérdida del sistema, L_S, y la calcularemos como una pérdida:

$$L_S(dB) = L_A + L_T + L_D - G_A \tag{2.5}$$

Para que el receptor se excite, el valor de la potencia recibida P_R medida en el receptor debe ser igual o mayor que el umbral de sensibilización S_R del dicho receptor. Dicho valor P_R se obtiene restándole a la potencia P_X medida en el del transmisor, la pérdida del sistema L_S calculada en la ecuación 2.5. Es posible operar directamente si las potencias y los umbrales los expresamos en unidades de ganancia absoluta, o sea en dBm,

$$P_R(dBm) = P_X - L_S(dB) \geq (S_R(dBm)) \tag{2.6}$$

De este modo, si se verifica la ecuación 2.6, se asegura que el sistema sea factible. Existen distintas herramientas sencillas para validar el cálculo del enlace, pero se debe siempre recordar que el cálculo está completo cuando se verifica que hay alcance (la potencia transmitida alcanza) y visibilidad (hay LOS) y no hay interferencias (Fresnel).

2.2.6. Modelo matemático de comunicaciones

La radio propagación en un entorno terrestre es un fenómeno enigmático cuyas propiedades son difíciles de predecir. Esto es particularmente

cierto en VHF, UHF y SHF [43]. Por lo tanto, los modelos de propagación de radio son fundamentales para el cálculo de enlaces que intentan describir cómo el mundo físico afecta el flujo de energía electromagnética. Algunos de estos modelos tratan temas muy especializados como, por ejemplo, la transferencia de datos móviles mediante microondas en las zonas urbanas de gran altura; otros tratan de ser lo más general posible aplicando las ecuaciones de Maxwell [40] representando la mayoría de los aspectos de la realidad física. El modelo de Longley-Rice o ITM *(Irregular Terrain Model)* es un modelo de propósito general cuyo rango de operación se encuentra entre los 20 Mhz y los 20 GHz y que puede ser aplicado a una amplia variedad de problemas de ingeniería.

2.2.7. El modelo Longly Rice

Publicado originalmente por [50] en 1968, el modelo ITM para cálculo de enlaces es un modelo de propósito general destinado a ser aplicado en una amplia gama de problemas de ingeniería [14]. El modelo está basado en la teoría electromagnética y en el análsis estadístico de los aspectos del terreno y de las mediciones de radio. Puede predecir las atenuación media de la señal como una función de la distancia y la variabilidad de la señal en el tiempo y en el espacio, permitiendo estimar las características de recepción de la señal necesarias en un radio enlace determinado sobre terreno irregular [79]. Es flexible en su aplicación y puede ser operado como un modelo de predicción de área o como un modelo de punto a punto. Hablamos aquí de dos modos diferentes de funcionamiento. En el modo punto a punto, parte del ingreso de los "parámetros de ruta", se determinarán a partir del perfil del terreno presumiblemente conocido que separa las dos terminales. En el modo de predicción de área, estos mismos parámetros son simplemente estimaciones a partir de un conocimiento de la clase general de terreno en cuestión. A continuación se brinda una breve descripción general del modelo, incluyendo su filosofía de diseño, una lista de sus parámetros de entrada, y una discusión de algunos de los fenómenos físicos involucrados en la propagación.

2.2.7.1. Parámetros de entrada del modelo ITM

El modelo opera con cuatro tipos de parámetros de entrada que a continuación se definen:

- **Los parámetros del sistema:** son los que se relacionan directamente con el sistema de radio involucrados y son independientes del medio ambiente. Contando las dos alturas de antena, hay cuatro valores:
  - *Frecuencia:* La frecuencia portadora de la señal transmitida, cuyo valor define el tipo de servicio inalámbirco que se desea transmitir.
  - *Distancia:* Es el espacio medido en kilómetros entre los dos terminales.
  - *Altura de las Antenas:* Corresponde a la altura del centro de radiación por sobre la elevación del terreno y se define en cada terminal.
  - *La polarización*: Es la forma en que el haz se va a desplazar por el espacio libre, la polarización puede ser vertical u horizontal y debe ser la misma en ambas antenas.
- **Los parámetros ambientales:** Son aquellos que describen el medio ambiente o, más precisamente, las estadísticas del medio ambiente en el que el sistema está funcionando. Hay cuatro valores:
  - *Irregularidad del Terreno* $\Delta(h)$: El terreno que separa los dos terminales se trata como una función aleatoria de la distancia de uno de los terminales.
  - *Constantes tierra eléctrica:* La permitividad relativa (constante dieléctrica) y la conductividad del suelo.
  - *Superficie Refractividad* N_s: Las constantes de la atmósfera, y en particular la refractividad atmosférica, también deben ser tratados como una función aleatoria de posición y tiempo. Para la mayoría de los propósitos de esta función aleatoria se puede caracterizar por un valor N_s que representan el valor normal de

refractividad cerca de los niveles de tierra (o superficie). Por lo general se mide en unidades N (partes por millón).

- *Clima:* Junto con Ns, el clima sirve para caracterizar la atmósfera y su variabilidad en el tiempo.

- **Los parámetros de instalación**: Describen cualitativamente el cuidado con el se realizó la instalación de cada terminal.

- **Los parámetros estadísticos**: Son aquellos que describen las condiciones estadísticas del escenario planteado. Se definen como la variabilidad de tiempo, variabilidad de la locación y variabilidad de la situación.

En la Tabla 2.1 se listan todos los parámetros de entrada requeridos por el modelo de predicción del área ITM junto con los valores permitidos o los límites para los que el modelo fue diseñado.

Tabla 2.1: Parámetros de entada para el modelo ITM

Parámetros del sistema	
Frecuencia	20 Mhz a 20 GHz.
Distancia	1 km a 2000 km
Altura de antenas	0.5 m a 3000 m
Polarización	Horizontal o vertical
Parámetros del entorno	
Variable de terreno irregular Δh	rugosidad promedio
Constantes eléctricas del terreno	permitividad y conductividad
Refractividad de la superficie	250 a 400 N-unidades
Clima	7 tipos (ver Tabla 2.4)
Parámetros de instalación	
Criterio de posicionamiento	aleatorio, cuidadoso o muy cuidadoso
Parámetros estadísticos	
Fiabilidad respecto a la variabilidad de tiempo, locación y situación	0.1 % al 99.9 %

En la Tabla 2.2 se listan los valores de entrada conforme al tipo de irregularidad del terreno, es conveniente utilizar el nivel promedio $h = 90$ m. La Tabla 2.3 muestra los valores que caracterizan la capacidad del

Tabla 2.2: Valores sugeridos para el parámetro de terreno irregular

Forma del terreno	Δh (m)
Plano o superficie del agua	0
Llanura	30
Colinas	90
Montañas	200
Montañas escabrosas	500
Para un nivel promedio utilizar Δ h = 90 m	

suelo para conducir la onda de radio frecuencia, se recomienda el uso del valor de *tierra promedio* con 90 de Permitividad relativa y $0,005$ de conductividad S/m (Simmens / metro). La Tabla 2.4 muestra los valo-

Tabla 2.3: Valores sugeridos para las constantes eléctricas del terreno

Tipo de suelo	Permitividad relativa	Conductividad (S/m)
Tierra promedio	15	0,005
Tierra pobre	4	0,001
Tierra buena	25	0,020
Agua dulce	81	0,010
Agua salada	81	5,000
En la mayoría de los casos usar las constantes de tierra promedio		

res característicos de los diferentes climas, se recomienda el uso del valor promedio *clima continental templado* con 301 N-unidades.

2.2.7.2. Parámetros estadísticos

Finalmente, los parámetros estadísticos son aquellos que describen las condiciones estadísticas del escenario planteado. Dichos parámetros se definen como la variabilidad de tiempo, variabilidad de la locación y variabilidad de la situación. La utilización de uno o varios de estos parámetros y su correspondiente valor necesario en un problema dado, puede variar significativamente en función de las condiciones del terreno y de las características de cada terminal. En la mayoría de los casos, estos

Tabla 2.4: Valores sugeridos para N_S en función del clima

Clima	Ns (N-unidades)
Ecuatorial	360
Continente subtropical	320
Marítimo subtropical	370
Desierto	280
Continental templado	301
Marítimo templado, sobre la tierra	320
Marítimo templado, sobre el mar	350
Para condiciones promedio usar el clima continental temperado y Ns = 301 N-unidades	

datos pueden ser omitidos y/o ser reemplazados por valores promedios o estimados.

2.2.7.3. Resultado del modelo

Una vez definidos los valores para los parámetros de entrada, el modelo de terreno irregular realiza estimaciones geométricas sobre el camino de propagación. En el modo de predicción de área por ejemplo, se estima el horizonte radial del área de cobertura. A continuación, el modelo determina una atenuación de referencia la cual es un valor medio de atenuación, relativo al espacio libre. La atenuación de referencia es tratada por el modelo como una función continua de la distancia. En la Figura 2.3 se identifican tres regiones denominadas línea de vista, difracción y dispersión. La región de línea de vista es aquella en donde la curvatura de la tierra no interrumpe la línea directa de propagación de ondas pero si pueden existir obstrucciones tales como colinas, bosques, etc. La atenuación de referencia se determina como una función logarítmica lineal de la distancia. En muchos casos, es necesario obtener una media de la atenuación referida a las condiciones climáticas de un lugar durante el transcurso de un año. Para ello, el modelo determina un promedio estadístico de atenuación de referencia para cada uno de los tipos de clima especificados.

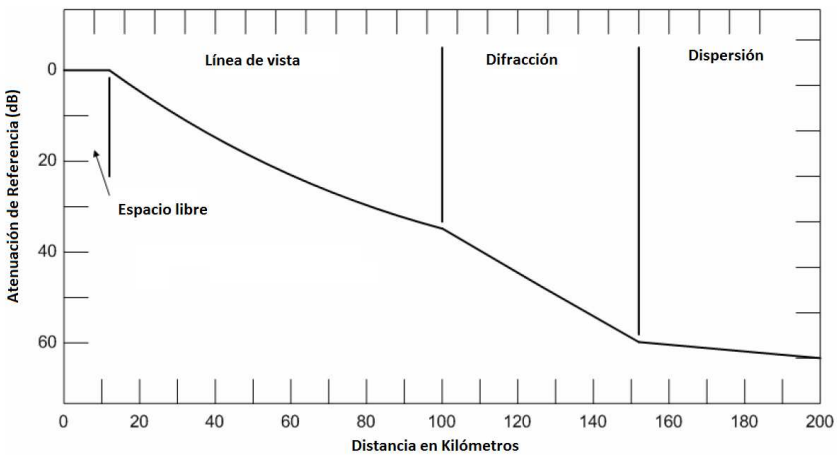


Figura 2.3: Atenuación de referencia

2.2.8. Componentes de una instalación

A continuación se describen los componentes típicos de un radio enlace, válidos para cualquier tipo de tecnología.

2.2.8.1. Los radios o radiobases

Una RBU (*Radio Base Unit*) es un equipo que cumple con las operaciones necesarias para que el flujo binario de datos entregados por el DTE (*Data Transmition Equipament*) desde su interfaz pueda ser irradiado. Por lo tanto, contiene una etapa DCE (*Data Circuit Equipament*), que podrá ser moduladora analógica o digital y una etapa amplificadora que convierte la señal modulada en señal RF con la potencia necesaria para entregarla a la interfaz del alimentador que la lleva a la antena. Como todo DTE una radiobase es un elemento par y por lo tanto trabaja emitiendo y recibiendo señal de su análogo. Por esa razón, entre sus datos importantes están la potencia de transmisión P_X que indica la potencia útil total de la señal emitida y la sensibilidad S_R que indica la potencia que es capaz de sensibilizar al receptor.

2.2.9. Alimentadores

El alimentador es el conductor de señales guiadas o semiguiadas que conecta a la RBU con el radiante en la antena, y tiene interés porque introduce una pérdida que no es despreciable en el transporte entre an-

tena y RBU. En general, es un cable coaxial, aunque en función de la frecuencia y potencia empleadas, puede ser una guía de ondas.

2.2.10. Las antenas

Una antena se puede definir como un conductor eléctrico (o conjunto de conductores) utilizado para irradiar o captar energía electromagnética. Para transmitir la señal, la energía eléctrica proveniente del transmisor se convierte a energía electromagnética en la antena, radiándose al entorno cercano (la atmósfera, el espacio o el agua) [69]. Para recibir una señal, la energía electromagnética capturada por la antena se convierte a energía eléctrica y se pasa al receptor. En las comunicaciones bidireccionales, la misma antena se puede usar tanto para la transmisión como para la recepción. Esto es posible debido a que cualquier antena transfiere energía desde el entorno hacia el receptor con la misma eficacia con la que se transfiere energía en el sentido contrario, suponiendo que se utiliza la misma frecuencia en ambas direcciones. En otras palabras, las características de una antena son las mismas para recibir y para transmitir energía electromagnética. Las antenas se pueden clasificar en tres tipos : (a) directivas que privilegian una dirección hacia la cual transmitir, (b) no directivas que irradian hacia un sector y (c) omnidireccionales que irradian en todas direcciones. Cuando se pretende hacer un enlace punto a punto se usa una antena directiva y cuando se pretende hacer un enlace del tipo Punto a Multipunto o hacer difusión, se usan antenas no directivas u omnidireccionales. La antena directiva típica es la que tiene reflector parabólico, y consiste en dos secciones: el radiante y el reflector que le da dirección al haz. Al radiante lo alimenta con RF el alimentador a través de un acople. Para transmisiones terrestres la combinación de frecuencia y potencia permiten que los radiantes sean simples, y el nombre genérico de la interfaz de la terminación del alimentador con el aire es punta de antena. El reflector en si puede ser sólido o de rejilla y una antena sin el reflector tendría un gran desperdicio de señal. Las antenas no directivas suelen irradiar de modo sectorizado y las sectorizaciones típicas pueden ser de 60°, 90° y 120°. Algunas aplicaciones típicas de

estas antenas son:

- Telefonía celular: con transmisiones de datos en banda angosta o ancha, cerca de los 2 GHz.
- Telefonía inalámbrica o wireless, en banda angosta o ancha, alrededor de los 3 GHz.
- Transmisión de datos punto a mulipunto (PMP), en las bandas de los 3 y 5 GHz o por sobre los 10 GHz.

Las antenas omnidireccionales no cumplen con el concepto de haz focalizado en una dirección, y tienen un patrón de radiación de 360°. Para tal fin se considera una fuente de irradiación isotrópica que emite una potencia P_e y una esfera de radio d atravesada por P_e. Si la potencia total es P_e entonces la potencia por unidad de superficie a la distancia d responde a la fórmula según la ecuación 2.7

$$\delta = \frac{P_e}{4.\pi.d^2} \tag{2.7}$$

Cuando se analiza una antena, los datos más importantes que usamos de ella son su ganancia y su relación F/B (*Front / Back*), o sea la tasa que se mide como ganancia absoluta entre el frente y el dorso de la antena, llamada también frente-a-espalda.

2.3. Modelo digital del terreno

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (MDT) [19]. Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo. Se denomina MDT al conjunto de capas (generalmente raster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Aunque algunas definiciones incluyen dentro de los MDT prácticamente cualquier

variable cuantitativa regionalizada, aquí se prefiere limitar el MDT al conjunto de capas derivadas del Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Un MDE puede representarse de forma genérica mediante la ecuación 2.8

$$z = f(x, y) \tag{2.8}$$

que define un campo de variación continua. La imposibilidad de resolver la ecuación anterior para todos los puntos del territorio obliga a definir elementos discretos sobre el mismo que permitan simplificar la codificación de la elevación. Las más habituales son:

- Curvas de nivel: se trata de líneas, definidas por tanto como una sucesión de pares de coordenadas, que tienen como identificador el valor de la elevación en cada unos de los puntos de la línea. Generalmente el intervalo entre valores de las curvas de nivel es constante.

- Red Irregular de Triángulos (TIN): a partir de un conjunto de puntos, en los que se conoce la elevación, se traza un conjunto de triángulos, formados por tripletas de puntos cercanos no colíneales, formando un mosaico. En ocasiones se parte de las curvas de nivel que, tras descomponerse en un conjunto de puntos, genera una red irregular de triángulos. En este caso hay que tener en cuenta que pueden formarse triángulos a partir de puntos extraidos de la misma curva de nivel, por tanto con el mismo valor, que daran lugar a triángulos planos.

- Formato raster: es el más adecuado para la integración de las elevaciones en un Sistema de Información Geográfica (SIG) ya que va a permitir la utilización de diversas herramientas para la obtención de nuevos mapas a partir del MDE.

2.3.1. Construcción del MDE

Existen diversos métodos para construir un MDE:

- Métodos directos mediante sensores remotos:
  - Altimetría, altímetros transportados por aviones o satélites que permiten determinar las diferencias de altitud entre la superficie terrestre y el vehículo que transporta el altímetro (que se supone constante). El inconveniente es la baja resolución (celdillas muy grandes) de los datos y que se ve muy afectado por la rugosidad del terreno, por ello se limita al seguimiento de hielos polares.
  - Radargrametría o interferometría de imágenes radar. Un sensor radar emite un impulso electromagnético y lo recoge tras reflejarse en la superficie terrestre, conociendo el tiempo de retardo del pulso y su velocidad puede estimarse la distancia entre satélite y terreno. En 1999 la NASA inició el proyecto SRTM *(Shutlle Radar Topography Mission)* [2] para elaborar un mapa topográfico de toda la Tierra a partir de interferometría radar.
- Métodos directos sobre el terreno:
  - Topografía convencional, estaciones topográficas realizadas en el campo mediante dispositivos que permiten la grabación de datos puntuales que se interpolan posteriormente.
  - *S*istemas de Posicionamiento GPS, sistema global de localización mediante satélites, que permite estimaciones suficientemente precisas de latitud, longitud y altitud de un punto, posteriormente deben interpolarse los datos.
- Métodos indirectos:
  - Restitución fotogramétrica a partir de fuentes analógicas (fotografía aérea) o digitales (imágenes de satélite).
  - Digitalización de curvas de nivel de un mapa mediante escáner o tablero digitalizador e interpolación de las mismas.

El método de generación de MDE más habitual y económico es la digitalización de curvas de nivel.

[2] (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/)

2.3.1.1. Validación de un Modelo Digital de Elevaciones

Al igual que con cualquier otra variable espacial interpolada, es necesario validar un MDE tras su obtención, su calidad estriba en el tipo y magnitud de los errores cometidos cuya aparición es inevitable ya que se trata de un modelo, por tanto inherentemente impreciso. En el caso de las elevaciones una buena validación requiere algo más de atención ya que:

- Constituye la información de partida para diversos análisis medioambientales y de ordenación posteriores. La pendiente, por ejemplo, es un parámetro clave en muchas aplicaciones.
- Resulta relativamente sencillo obtener información de gran riqueza para la validación a partir de las diversas capas que forman el MDT. La elevación es además una variable permanente y más fácil de medir sobre el terreno que otras.
- Los procedimientos de interpolación a partir de curvas de nivel pueden generar artefactos, se trata de geoformas artificiales que afectan dramáticamente la calidad del MDE.

La calidad de un MDE en formato raster va a depender tanto de los errores presentes en los datos con los que se ha construido como del procedimiento de interpolación que se ha llevado a cabo. Los errores debidos a los diversos métodos de interpolación ya se expusieron en el tema anterior. Los errores de los datos de partida pueden ser de dos tipos:

- Errores posicionales: implican una mala localización geográfica de la cota o la curva de nivel y afectan, por tanto, a la situación en el plano XY. Si se trata de puntos tomados en el campo pueden deberse a los errores propios del procedimiento (GPS por ejemplo). Si se trata de curvas de nivel puede deberse a errores en el mapa de partida (o incluso a la generalización de las curvas en mapas de

escala 1:200000 o inferior). Pero generalmente se deben al propio proceso de digitalización, a la incorrecta situación del cursor sobre el tablero en el momento de introducir el punto. Puede ser un error aleatorio, generalmente por cansancio, o el denominado error de generalización por el que se tienden a simplificar las formas que se digitalizan. Estos errores introducen una cierta incertidumbre en cuanto a la localización de las líneas. Son difíciles de evitar y detectar a posteriori. Como normas generales es preferible digitalizar sobre mapas escaneados y evitar sesiones de trabajo largas.

- Errores atributivos: suponen una asignación imprecisa de la altitud asociada a la cota o a la curva e implican a las coordenadas en el eje Z. Si se trata de puntos en el campo el origen es el mismo que en el caso anterior. En el caso de curvas de nivel digitalizadas, los errores van a ser de carácter aleatorio y fácilmente detectables en los mapas derivados del MDE.

2.3.2. Modelo raster

El formato raster se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdas, generalmente cuadradas [18]. Cada una de estas celdillas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo.

2.3.2.1. Elementos que componen una capa raster

Una capa en formato raster está compuesta por cuatro elementos fundamentales:

1. La matriz de datos, que puede contener dos tipos de datos:

    - Valores numéricos en caso de que la variable representada sea cuantitativa.

- Identificadores numéricos en caso de que se trate de una variable cualitativa. Estos identificadores se corresponden con etiquetas de texto que describen los diferentes valores de la variable cualitativa.

2. Información geométrica acerca de la matriz y de su posición en el espacio:

   - Número de columnas (n_c).
   - Número de filas (n_f).
   - Coordenadas de las esquinas de la capa (e, w, s, n).
   - Resolución o tamaño de pixel en latitud (r_x) y en longitud (r_y).

3. Una tabla de colores que permita decidir de qué color se pintará cada celda en la pantalla.

4. En caso de que la variable sea cualitativa, una tabla que haga corresponder a cada identificador numérico una etiqueta de texto descriptiva.

Hay una serie de convenciones acerca de la forma de representación. Así la primera columna en una capa ráster, la columna número cero, es la de la izquierda (oeste) aumentando el número de columna hacia la derecha (este), mientras que la primera fila, la número cero, será la superior (norte) aumentando hacia abajo (sur), en sentido contrario al que siguen las coordenadas geográficas y las representaciones en un modelo vectorial. Puesto que la primera fila es la número 0, éstas se numeran desde 0 hasta $n_f - 1$, y lo mismo para las columnas. Todo ello da lugar a una serie de relaciones entre las variables que definen la situación espacial de las celdas y que van a utilizarse a la hora de visualizar la capa raster en pantalla y de realizar consultas sobre ellas. Algunas relaciones se definien como: El número de celdas es $n_c \times n_f$. Normalmente r_x y r_y son constantes y van a tener el mismo valor aunque en el caso de imágenes de satélite de baja resolución se ven afectadas por la curvatura de la Tierra. Las ecuaciones para obtener las coordenadas del centro de cada

celda partiendo de su número de columna y de fila son:

$$X = w + (c + 0,5) \times r_x \tag{2.9}$$

$$Y = s + (nf - f + 0,5) \times r_y \tag{2.10}$$

A la inversa pueden obtenerse el número de columna y de fila a partir de los valores de X e Y:

$$c = \frac{int(X - w)}{r_x} \tag{2.11}$$

$$f = n_f - \frac{int(Y - s)}{r_y} \tag{2.12}$$

Estas dos últimas ecuaciones asumen además la convención de que la primera fila y la primera columna son la fila 0 y la columna 0. Sabiendo el número de fila y columna de una celda es también sencillo obtener el número de orden del pixel:

$$N = n_c \times f + c \tag{2.13}$$

de manera que la primera celda es la número cero y la última es la $(n_c \times n_f) - 1$.

2.4. Altimetría SRTM

La misión entre la NASA y la NIMA (hoy NGA) denominada *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) generó un modelo de elevación global de la tierra utilizando interferometría mediante radar generando una base de datos de topografía digital [29]. Los datos SRTM están organizados en celdas individuales en formato raster o mosaicos, cada uno cubriendo un grado de latitud y un grado de longitud. Las muestras de cobertura para cada punto indiviual es de 1 arcosegundo, 3 arcosegundos y 30 arcosegundos, referidos como STRM1, STRM3 y STRM30 respectivamente. Un arcosegundo en la línea del ecuador corresponde aproximadamente a 30 metros de extensión.

Cada uno de los mosaicos SRTM contiene un conjunto de elevaciones generado por la media de todos los datos que se encuentran dentro del

mosaico. El nombre de cada uno de los mosaicos individuales se refiere a la latitud y a la longitud de la esquina de la parte inferior izquierda del mosaico. Por ejemplo, las coordenadas de la esquina inferior izquierda del mosaico N40W118 se refiere a 40 grados latitud norte y 118 grados de longitud oeste. La Figura 2.4 muestra la división en mosaicos de los contintentes y da una idea de como se distribyen las muestras en el interior de cada uno de ellos.

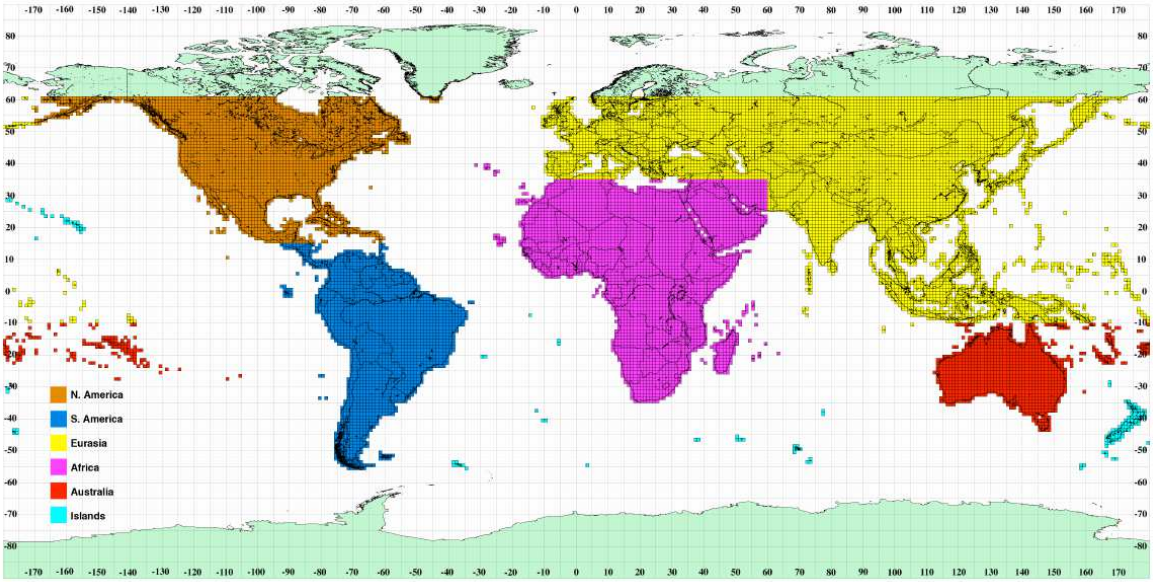


Figura 2.4: Muestreo continental SRTM

Las alturas pertenecientes al SRTM1 son un muestreo de un segundo de arco de latitud y longitud y cada archivo contiene 3601 líneas con 3061 muestras. Esto significa que se forma una matriz de alturas de 3601 filas por 3601 columnas. Las elevaciones para SRTM3 son un muestreo de tres segundos de arco de latitud y longitud y cada archivo contiene 1201 líneas con 1201 muestras generando una matriz de alturas de 1201 filas por 1201 columnas.

2.5. Trazo de líneas rectas para las trayectorias del rayo

Para poder determinar el conjunto de puntos entre el emisor y el receptor se debe trazar una línea recta entre ambos tomando las alturas

de cada uno de los puntos intermedios. Esto permite determinar los obstáculos entre los puntos y es una información fundamental para el cálculo de la cobertura.

2.5.1. Ecuación de la recta

La ecuación de intersección de la pendiente cartesiana de una línea recta es:

$$y = mx + b \tag{2.14}$$

donde m representa la pendiente de la línea y b la intersección de y. Dado que los dos extremos de un segmento de línea se especifica en las posiciones $(x1, y1)$ y $(x2, y2)$, se puede determinar valores para la pendiente y la intersección de y en b con los siguientes cálculos:

$$m = \frac{(y2 - y1)}{(x2 - x1)} \tag{2.15}$$

$$b = y1 - m.x1 \tag{2.16}$$

2.5.2. Algoritmo DDA para el trazo de líneas

El algoritmo básico sería utilizar la ecuación 2.14 para calcular y en término de x (o viceversa). El analizador diferenciador digital (DDA - *Digital Differential Analyzer*) es un algoritmo de conversión de rastreo que se basa en el cálculo ya sea de Δy o Δx por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta y = m.\Delta x \tag{2.17}$$

$$\Delta m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{2.18}$$

Se efectúa un muestreo de la línea en intervalos unitarios en una coordenada y se determina los valores enteros correspondientes más próximos a la trayectoria de la línea para la otra coordenada. Tomemos una línea con pendiente positiva, si la pendiente $|m| \leq 1$, se hace el muestreo en x en intervalos unitarios ($\Delta x = 1$ y $\Delta y = m$ dado que $m = \Delta y$ / Δx) y se calcula cada valor sucesivo de y como:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{1}{m} \tag{2.19}$$

El subíndice k toma valores enteros a partir de 1 y aumenta a razón de 1 hasta alcanzar el valor final. Ya que m puede ser cualquier número real entre 0 y 1, los valores calculados de y deben redondearse al entero más cercano. Para líneas con una pendiente $|m| > 1$, se revierten las funciones de x e y, o sea, se realiza un muestreo de y en intervalos unitarios ($\Delta y = 1$ y $\Delta x = 1/m$ dado que $m = \Delta y/\Delta x$) y se calcula cada valor sucesivo de x como:

$$x_{k+1} = x_k + 1/m \tag{2.20}$$

El algoritmo 1 muestra el procedimiento completo para el trazo de una línea recta.

Algoritmo 1 Pseudocódigo para el algoritmo DDA

```
1: void Line(Display* display, Window win, GC gc, int x0, int y0, int x1, int y1)
2: {
3:   float x, y, xs, ys;
4:   int dx, dy, steps;
5:   dx = x1 - x0;
6:   dy = y1 - y0;
7: /* se asigna el punto de donde se comenzara a dibujar la línea */
8:   x = x0;
9:   y = y0;
10: /* verificar si la pendiente es mayor de x o y, para luego asignarla a steps */
11:  if (abs(dx) > abs(dy))
12:    steps = abs(dx);
13:  else
14:    steps = abs(dy);
15: /* se divide por la pendiente mayor, para dar xs o ys igual a 1 (o -1) */
16:  if (steps == 0) {
17:    XDrawPoint(display,win,gc,round(x),round(y));
18:    fprintf(stderr,´this line is a point ´);
19:  return;
20: }
21: xs = dx/steps;
22:  ys = dy/steps;
23: /* se cicla uno a la vez hasta llegar al numero de steps máximo */
24:  for (i = 0; i ⩽ steps; i++)
25:  {
26:    XDrawPoint(display,win,gc,round(x),round(y)); /* round(x) → x+0,5 */
27:    x = x + xs;
28:   y = y + ys;
29:   }
30: }
```

Las líneas 5 y 6 determinan las distancias a recorrer tanto de las ordenadas como de las absisas, permitiendo determinar la cantidad de pasos que se deben dar para cumplir el recorrido de la recta a trazar. Las líneas 8 y 9 determinan el punto de partida para el dibujo de la recta y las líneas 11 a 14 el tipo de pendiente de la recta (positiva o negativa). Las líneas 21 y 22 dererminan el valor del paso para determinar el próximo valor de x e y. Luego las líneas 24 a 26 indican los valores sucesivos de x e y conforme a la cantidad de pasos determinados en las líenas 5 y 6.

2.6. Conclusiones

En este capítulo hemos revisado los conceptos relacionados con el campo de las telecomunicaciones, los modelos matemáticos para el desarrollo de cálculos de enlace, las fuentes de radiación de radio frecuencia y el modelo de representación del terreno para el área que se desea cubrir. A partir de la ecuación de la recta se presentó el algoritmo DDA *(Digital Differential Analyzer)* para determinar los puntos intermedios entre el emisor y el receptor. De este modo podemos generar un mapa digital con los valores más representativos del terreno y que sea la referencia de obstáculos para el modelo de propagación seleccionado. El modelo digital del alturas (MDA) está basado en los archivos generados por la misión topográfica SRTM, cuyos archivos están disponibles en internet. A su vez, para el cálculo de los enlaces se utiliza un modelo que permite establecer la veracidad de sus predicciones a través de valores estadísticos y que está debidamente probado en su uso. El modelo ITM fue desarrollado en los años 60 y brinda lo que se denomina atenuación de referencia. Este valor indica cuál es la pérdida en espacio libre asociada a la zona geográfica donde se lo aplica. El modelo tiene como datos de entrada los parámetros del sistema (frecuencia, distancia, la altura de las antenas y su polarización, vertical / horizontal), parámetros del entorno (coeficiente de irregularidad del terreno, refractividad del terreno, clima, etc.) y parámetros estadísticos para establecer un nivel de confianza sobre los datos obtenidos.

Capítulo 3

Conceptos de metaheurísticas

Encontrar soluciones óptimas para determinados problemas de optimización con importancia científica o industrial, muchas veces se vuelve intratable para ser abordados computacionalemnte. En la práctica usualmente nos conformamos con soluciones buenas para el problema, que son obtenidas por algoritmos heurísticos o metaheurísticos. Las metaheurísticas representan una familia de técnicas aproximadas de optimización que han ganado mucha popularidad en las últimas dos decadas pasadas. Las metaheurísticas brindan soluciones aceptables en un tiempo razonable para resolver problemas duros y complejos en la ciencia y la ingeniería pero no garantizan encontrar la solución óptima entre el conjunto de soluciones obtenidas. En el presente capítulo se desarrollan los conceptos relacionados con las metaheurísticas y los algoritmos que se emplean en este trabajo para resolver el problema planteado.

3.1. Definición de metaheurística

La palabra *heurística* tiene su orígen en la palabra del griego antiguo *heuriskein*, cuyo significado es el arte de descubrir nuevas estrategias para resolver problemas. El sufijo *meta*, también deriva del griego y significa metodología de alto nivel. El término *metaheurística* fue introducido por [35]. Los métodos de búsqueda basados en metaheurísticas pueden ser definidos como metodologías generales de alto nivel que pueden ser utilizadas como estrategias para el diseño de las heurísticas subyacentes para resolver problemas específicos de optimización. Hasta el momento no existe una definición común aceptada para el término metaheurísti-

ca. En los últimos años algunos investigadores del campo intentaron proponer una definición. En la Figura 3.1 se muestran los métodos de optimización clásicos, que pueden dividirse en dos grandes grupos, los métodos exactos y los métodos aproximados.

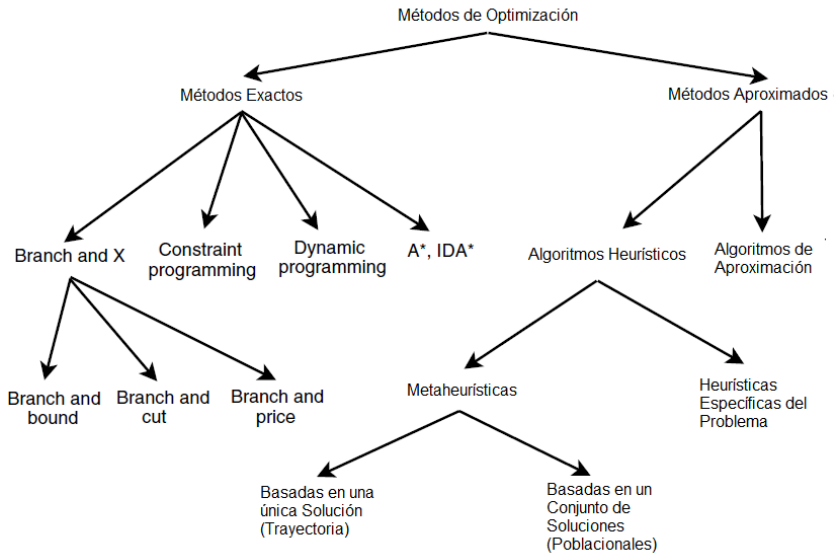


Figura 3.1: Metaheurísticas como método de optimización

Podemos observar que las metaheurísticas pertenecen a la rama de los Métodos Aproximados para la resolución de problemas de optimización. A su vez están incluídas como una subdivisión de los los Algoritmos Heurísticos pudiendo ser estas de Trayectoria o Poblacionales.

3.2. Clasificación de las metaheurísticas

Existen diferentes maneras de clasificar y describir los algoritmos metaheurísticos. Dependiendo de las caracteríticas seleccionadas se pueden establecer las diferencias entre los mismos dando lugar a muchas clasificaciones posibles, muchas de ellas siendo el resultado de un punto de vista específico. A continuación se muestra un breve resumen de las formas más importantes de clasificar las metaheurísticas:

- Bio inspiradas Vs No Bio inspiradas: Quizás, la manera más intuitiva de clasificar las metaheurísticas está basada en el orígen del algoritmo. Existen un conjunto de algoritmos inspidados en la naturaleza tales como Algoritmos Genéticos [42], Algoritmos de Colonia

de Hormigas [13]. Otros algoritmos que no son bio inspirados tales como Búsqueda Tabú [34] y la Búsqueda Local Iterada [51].

- Basadas en poblacion vs. basadas en trayectoria: Otra característica que puede ser utilizada para la clasificación de las metaheurísticas es el número de soluciones que utiliza al mismo momento. Los algoritmos que trabajan con una solución por vez se denominan *métodos de trayectoria* y abaracan las metaheurísticas basadas en búsqueda local tales como Búsqueda Tabú, Búsqueda Local Iterada y Búsqueda con Vecindario Variable [57] entre otras. Por el contrario, las metaheurísticas basadas en población realizan el proceso de búsqueda que describen la evolución de un conjunto de soluciones en el espacio de búsqueda.

- Función objetivo estática o dinámica: Las metaheurísticas también pueden ser clasificadas conforme al uso de la función objetivo. Mientras algunos algoritmos mantienen la función objetivo establecida para el problema, otros, como la Búsqueda Local Iterada la modifican durante el proceso de búsqueda. La idea detrás de este enfoque es escapar de un óptimo local mediante la modificación del espacio de búsqueda. Durante el proceso, la función objetivo es alterada tratando de incorporar información recolectada durante el proceso de búsqueda.

- Uso de memoria vs. métodos sin memoria: Un aspecto muy importante para clasificar metaheurísticas es el uso de la historia de búsqueda de la metaheurística. Los algoritmos que no utilizan memoria realizan un proceso de Marcov como información y utilizan el estado actual del proceso de búsqueda para determinar la próxima acción a realizar. Existen muchas formas de hacer uso de la memoria, generalmente se establece una diferencia entre el uso de memoria a corto plazo o a largo plazo. El primero mantiene en la memoria los movimientos recientes, las soluciones visitadas o en general las decisiones tomadas. El segundo realiza una acumulación o una síntesis de los parámetros de búsqueda.

De las clasificaciones anteriores una de las más populares es la que divide a las metaheurísticas en métodos de trayectoria y métodos basados en población. Esta elección es motivada por el hecho que esta clasificación permite una clara descripción de los algoritmos y además incoporar el concepto de hibridación. Esta es una tendencia actual que permite la combinación de un algoritmo de búsqueda simple dentro de una metaheurística basada en población. La Figura 3.2 muestra algunos ejemplos de metaheurísticas conforme a esta clasificación.

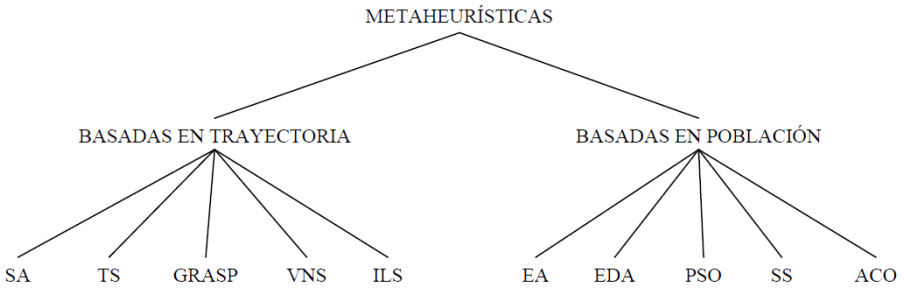


Figura 3.2: Metaheurísticas basadas en trayectoria y población

Las siglas que pertenecien a la categoría de trayectoria corresponden a: *Simulated Annealing* (SA) [46] , *Taboo Search* (TS) [34], *Greedy Randomized Adaptative Search Procedure* (GRASP) [20], *Variable Neighborhood Search* (VNS), *Iterated Local Search* (ILS). Las siglas que se encuentran en la rama basada en población se corresponde a: *Evolutionary Algorithm* (EA), *Estimation of Distribution Algorithms* (EDA) [58], *Particulary Swarm Optimization* (PSO) [44], *Scatter Search* (SS) [32], *Ant Colony Optimization* (ACO).

3.3. Metaheurísticas basadas en trayectoria

El término trayectoria es utilizado para describir el proceso de búsqueda caracterizado por la mejora de una solución individual. Esto puede verse como pasos a través del vecindario o trayectorias de búsqueda a través del espacio de búsqueda del problema a manejar. Los pasos o trayectorias son relizados mediante procedimientos iterativos que permiten realizar movimientos de la solución actual a otra dentro del espacio de búsqueda. Este tipo de metaheurísticas aplican de un modo iterativo un

procedimiento de generación y reemplazo de la solución actual. En la fase de generación, un conjunto de soluciones candidatas es generdo a partir de la solución actual s. Este conjunto $C(s)$ se obtiene generalmente mediante una transformación de la solución. En la fase de reemplazo, se realiza una selección del conjunto candidato de soluciones $C(s)$ para el reemplazo de la solución actual, eso significa que una solución $s' \in C(s)$ es seleccionada como la nueva solución. Este proceso se realiza hasta que se cumple el criterio de fin establecido. El algoritmo 2 ilustra el procedimiento de alto nivel de una metaheurística basada en trayectoria.

Algoritmo 2 Pseudocódigo de las metaheurísticas basadas en trayectoria

1: **Input** Solución unicial s_0
2: $t = 0$;
3: **Repeat**
4: Generar $(C(s_t))$;
5: s_{t+1} = Seleccionar $(C(s_t))$; // Aplica una ILS a la solución perturbada
6: s_* = Aceptar(s_*,s');//Aplica el criterio de aceptación
7: **Until** Criterio de parada
8: **Output** Mejor solución encontrada

3.3.1. Recocido simulado (SA)

El SA [46] está basado en el principio de la mecánica estadística mediante el cual el proceso de templado requiere un caletamiento y luego un enfriamiento lento a costa de conseguir un reacomodamiento de la estructura cristalina de la materia, volviendose ésta más resistente. La fortaleza de la estructura depende del grado de calentamiento del metal. Si la temperatura inicial no es lo suficientemente elevada o si se aplica un enfriamiento demasiado acelerado se generan imperfecciones en el material. Para este caso, el enfriamiento del sólido no alcanza el equilibrio térmico adecuado. El algoritmo SA simula los cambios energéticos en un sistema sujeto a un proceso de enfriamiento hasta que el mismo alcanza un equilibrio energético. La función objetivo del problema es análoga al estado energético del sistema. La solución del problema se corresponde con el estado del sistema. Las variables de decisión asociadas a la so-

lución del problema son análogas a las posiciones de las moléculas. El óptimo global se corresponde con el estado fundamental del sistema y encontrar el mínimo local implica que se ha alcanzado el meta estado del sistema. SA es un algoritmo estocástico que bajo determinadas condiciones permite una degradación de la solución. El objetivo es escapar de un óptimo local y a su vez demorar la convergencia. SA es un algoritmo sin memoria en el sentido que el mismo no reune información durante el proceso de búsqueda. A partir de una solución inicial, SA realiza una serie de iteraciones. Por cada iteración, se genera un vecindario de manera aleatoria. Los movimientos que mejoran los valores de la función objetivo siempre son aceptados. Por otra parte, el vecino es seleccionado con una probabilidad de aceptación que depende de la temperatura actual T y de la cantidad de degración ΔE de la función objetivo. El valor ΔE representa la diferencia en el valor objetivo entre la solución actual $f(s)$ y la solución generada en el vecindario $f(s')$. A medida que el algoritmo progresa, la probabilidad de aceptación de un movimiento decrece. Esta probabilidad en general sigue la distribución de Boltzmann:

$$P(\Delta E, T) = e^{-\frac{f(s')-f(s)}{T}} \tag{3.1}$$

El algoritmo 3 describe la estructura del algoritmo SA.

Algoritmo 3 Pseudocódigo del recocido simulado (SA)

1: **Input** : Esquema de enfriamiento
2: $s = s_0$ // Se genera la solución inicial
3: $T = T_{max}$ // Temperatura inicial
4: **Repeat**
5: **Repeat** // Hasta una temperatura determinada
6: Generar un vecindario aleatrorio s';
7: $\Delta E = f(s')$ - $f(s)$;
8: **If** $\Delta E \leqslant 0$ **Then** $s = s'$ // Se acepta la solución obtenida del vecindario
9: **Else** Aceptar s' con probabilidad $e^{-\frac{f(s')-f(s)}{T}}$;
10: **Until** Condición de equilibrio
11: $T = \mathrm{g}(T)$; // Actualización de la temperatura
12: **Until** Criterio de parada satisfecho // ej. $T < T_{min}$
13: **Output** Mejor solución encontrada

3.3.2. Búsqueda local iterada (ILS)

La ILS está basada en un principio simple, primero se aplica una búsqueda local a una solución inicial, luego, por cada iteración, se realiza una perturbación de cada óptimo local obtenido [53]. Finalmente, se aplica una búsqueda local a cada solución perturbada. La solución generada es aceptada como la nueva solución actual bajo las mismas condiciones anteriores. El proceso itera hasta que se llega a la condición de parada. La calidad del óptimo local obtenido mediante el método ILS depende de la solución inicial. Como se pueden generar óptimos locales con una alta variabilidad, ILS puede ser utilizada para mejorar la calidad de los óptimos locales sucesivos.

El algoritmo 4 describe el algoritmo ILS.

Algoritmo 4 Pseudocódigo de la búsqueda local iterada

1: s^* = Busqueda local(s_0) // Se aplica una ILS a la solución inicial
2: **Repeat**
3: s' = Perturbar (s^*);
4: s^* = Busqueda Local(s'); // Aplica una ILS a la solución perturbada
5: s^* = Aceptar(s^*,s');//Aplica el criterio de aceptación
6: **Until** Criterio de parada
7: **Output** Mejor solución encontrada

3.4. Metaheurísticas basadas en población

Las metaheurísticas basadas en población comienzan con una población inicial de soluciones, luego, se aplica de manera iterativa la generación de una nueva población y el reemplazo de la población actual. En la fase de generación, se crea una nueva población de soluciones, en la fase de reemplazo se lleva a cabo una selección de soluciones entre la nueva población y la población actual. Este proceso se repite hasta que se alcanza una condición de parada. La mayoría de las metaheurísticas basadas en población son bioinspiradas tales como los algoritmos evolutivos, optimización por colonia de hormigas, colonia de abejas, etc. El algoritmo 5 muestra el esquema de alto nivel del funcionamiento de las metaheurísticas poblacionales.

Algoritmo 5 Pseudocódigo de las metaheurísticas basadas en población

1: $P = P_0$ // Generación de la población inicial
2: $t = 0$;
3: **Repeat**
4: Generar (P'_t); //Generación de la nueva población
5: P_{t+1} = SeleccionarPoblación ($P_t \bigcup P'_t$); // Selección de la nueva población
6: $t = t + 1$;
7: **Until** Criterio de parada
8: **Output** Mejores soluciones encontradas

Los métodos basados en población más estudiados en los problemas de optimización son los Algoritmos Evolutivos (AEs). Los AEs son metaheurísticas poblacionales estocásticas que han sido aplicadas con éxito en muchos problemas reales de gran complejidad y son los algoritmos más estudiados en la actualidad. Su éxito resolviendo problemas de optimización en diferentes dominios (optimización combinatoria y continua [68], sistemas de modelización [45] e identificación [1], planeamiento [61] y control [31], diseño de ingeniería [67], minería de datos [64] y aprendizaje de máquinas [41]) ha promovido un campo denominado **computación evolutiva**. Los AEs están basados en la noción de competencia, ellos representan una clase de algoritmos iterativos de optimización que simulan la evolución de las especies. La evolución de la población de individuos parte de una población inicial generada de manera aleatoria. Cada individuo es una versión codificada de una posible solución. Una función objetivo asocia un valor de *fitness* a cada individuo indicando su calidad como solución al problema. En cada paso, los individuos son seleccionados para formar parejas. Esta selección está basada en un paradigma por el cual los individuos de mejor *fitness* tienen una alta probabilidad de ser elegidos. Luego, los individuos seleccionados son reproducidos utilizando operadores de variación (ej. intercambio genético, mutación) para generar descendientes. Finalmente, se aplica un esquema de reemplazo para determinar cuales serán los individuos entre padres e hijos que formen la nueva población. Cada iteración representa una nueva generación y este proceso se repite hasta que se satisface un criterio de parada. El algoritmo 6 muestra el pseudocódigo de un AE.

Algoritmo 6 Pseudocódigo del AE.

1: Generar (P_0) // Generación de la población inicial
2: $t = 0$;
3: **While** no se cumple el criterio de finalización **Do**
4: Evaluar (P_t); //Generación de la nueva población
5: P'_t = Seleccionar(P_t);
6: P'_t = Reproducir(P'_t);
7: Evaluar (P'_t);
8: P_{t+1} = Reemplazar(P_t, P'_t);
9: $t = t + 1$;
10: **End While**;
11: **Output** Mejor individuo o mejor población de soluciones encontradas

3.4.1. Algoritmos genéticos (AGs)

Los AGs fueron desarrollados por [38] en la década del 1970 y son una clase muy popular de AE. Los AGs son algoritmos de búsqueda que imitan el comportamiento de la selección natural. Buscan la mejor solución de un determinado problema (ej. maximizar una función) mediante la generación de un conjunto (población) de soluciones potenciales (individuos) para el problema a las que aplican operaciones de mutación y recombinación y se espera que surjan mejores soluciones a partir del conjunto inicial. Este proceso continúa hasta que se encuentra una solución lo suficientemente aceptable para el problema. Los AGs codifican las variables de decisión de un problema de búsqueda dentro de un alfabeto finito representado mediante una cadena de caracteres con una cierta cardinalidad. La cadena que representa una solución candidata para el espacio de búsqueda del problema es el cromosoma, el alfabeto son los genes y el valor de los genes son los alelos. Para evolucionar las "buenas" soluciones e implementar la selección natural, se necesita una medida para distinguir las "buenas" soluciones de las "malas" soluciones. La medida es la función de *fitness* cuyo cálculo se basa en la función objetivo, que puede ser representada mediante un modelo matemático, una simulación de computadora o podría ser una función que permita seleccionar las mejores soluciones de otras peores. En esencia, la función objetivo, establece una medida que debe determinar la calidad de la solución candidata, que luego será utilizada por el AG como guía en su

evolución a mejores soluciones. La Figura 3.3 muestra la relación entre la biología y los AGs.

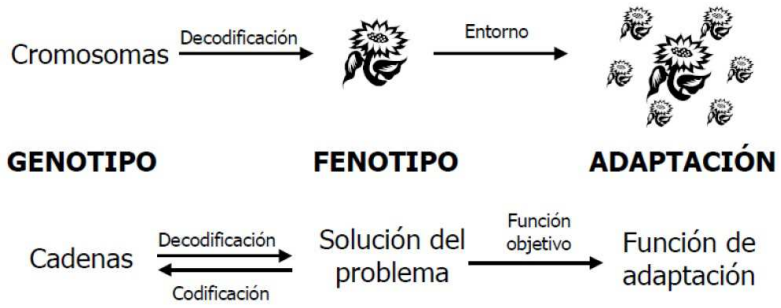


Figura 3.3: Relación entre la metaheurística y la Biología

Otro concepto importante en los AGs es la noción de población, al igual que los métodos tradicionales de búsqueda, los AGs se refieren a una población como un conjunto de soluciones candidatas. El tamaño de la población (generalmente es un parámetro predefinido por el usuario) es uno de los factores más importantes que afectan la escalabilidad y el desempeño de los AGs. Por ejemplo, una población pequeña podría guiar a una convergencia prematura dando como resultado soluciones de baja calidad. Por el otro lado, poblaciones de gran tamaño llevan a incrementar el tiempo computacional del algoritmo de manera innecesaria. Una vez que el problema fue codificado dentro de un cromosoma y la función de *fitness* puede ser aplicada a la población, se puede comenzar a evolucionar las soluciones en el espacio de búsqueda del problema utilizando los siguientes pasos:

1. Inicialización: La población inicial es generada aleatoriamente a través del espacio de búsqueda. Sin embargo, conocimiento específico del contexto del problema o cualquier otra información puede ser fácilmente incorporada.

2. Evaluación: Una vez que la población fue inicializada o una población descendiente es creada, el *fitness* de cada solución candidata es calculado.

3. Selección: La selección coloca más copias de las soluciones con mayor *fitness* e impone un mecanismo de supervivencia para las soluciones candidatas. La principal idea de la selección es preferir las

mejores soluciones de las peores. Muchos métodos de selección han sido propuestos para complementar esta idea, incluyendo la selección por rueda de la ruleta, selección estocástica universal, selección por *ranking* y selección por torneos.

4. Recombinación: La recombinación combina parte de dos o más soluciones padres para crear una nueva solución, posiblemente mejores soluciones (descendientes). Hay muchas maneras de llevar a cabo la misma, y el buen desempeño depende de un diseño apropiado del mecanismo de recombinación. La descendencia luego de la recombinación no será idéntica a cualquiera de los padres en particular y en su lugar recombinará los rasgos de sus padres de una nueva forma [36].

5. Mutación: Mientras que la recombinación opera sobre dos o más cromosomas padres, la mutación de manera local pero aleatoria modifica la solución. Nuevamente, hay muchas variantes para realizar una mutación, pero usualmente ésta involucra uno o varios cambios sobre uno o varios rasgos de cada individuo.

6. Reemplazo: La población descendiente creada mediante selección, recombinación y mutación reemplaza la población original de padres. Muchas técnicas de reemplazo son utilizadas por los AGs, tales como reemplazo elitista, reemplazo completo de la generación y estado estacionario.

7. Se repiten los pasos de 2 a 6 hasta que la condición de terminación es alcanzada.

En el Algoritmo 7 se presenta el pseudocódigo de un AG canónico.

3.4.1.1. Métodos de selección

Como en el resto de técnicas metaheurísticas, las solución de partida (la población en este caso) se puede obtener de forma aleatoria o partir de la aplicación de alguna regla sencilla o, simplemente, a partir de soluciones conocidas obtenidas por experiencias anteriores. La generación de una población de forma aleatoria es ventajosa en cuanto que permite

Algoritmo 7 Pseudocódigo de un AG

```
1:  /* Parámetros de un AG */
2:  t = 0 //número de generación
3:  P(0)
4:  evaluar P(0)
5:  While not (Condición de terminación)
6:     P'(t)=seleccionar(P(t))
7:     P'(t) =aplicar operadores de cruce(P(t))
8:     P'(t) =aplicar operador de mutación(P(t))
9:     P(t+1) = reemplazar (P(t),P'(t))
10:    evaluar P(t+1)
11:    t=t+1
12: End While
13: Return Mejor Solución Encontrada
```

que el proceso de búsqueda comience con un conjunto de soluciones suficientemente diferentes. Por otro lado, al generar una población aleatoria, si el resultado del proceso de búsqueda es satisfactorio, esto será por las bondades del propio proceso y no por el método de generación de la primera población. En términos biológicos, los individuos más adaptados tienen más probabilidad de sobrevivir y de procrear en mayor medida. La técnica metaheurística, igualmente, selecciona aquellas soluciones cuya función de adaptación sea mayor. Sin embargo, si sólo se eligieran aquellos individuos cuya función de adaptación fuera mayor existiría el peligro de converger en torno a un óptimo local de forma prematura. La probabilidad de que este operador seleccione a cada individuo es mayor cuanto mayor sea su función de adaptación. Algunas de las formas de establecer esta relación son las siguientes:

- **Selección proporcional**: Es el criterio de selección de la propuesta original de Holland. La probabilidad de selección de cada individuo es proporcional a su función de adaptación. Cabe destacar que se trata de una probabilidad y no una proporción determinista: los individuos mejor adaptados tienen más probabilidad de ser seleccionados y, por lo tanto, por término medio serán elegidos en mayor proporción, pero no existen garantías de que en una iteración particular los individuos sean seleccionados en proporciones idénticas

a sus probabilidades de selección.

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{n} F_j} \tag{3.2}$$

donde n es la cantidad de individuos de la población, P_i es la probabilidad de seleccionar el individuo i, F_j es el valor de *fitness* del individuo j.

- **Selección determinista**: Los individuos son seleccionados en una proporción directamente proporcional a su función de adaptación. Con este tipo de selección se acelera la convergencia del algoritmo: si existen soluciones mejor adaptadas que otras pero próximas a un óptimo local, la búsqueda se centrará en la región de dicho óptimo local, a pesar de que puedan existir otros individuos peor adaptados alejados de dicho óptimo y más próximos a otro óptimo local (mejor que el anterior) o incluso más próximo al óptimo global.

- **Selección por torneo**: Está basado en comparaciones (torneos) entre individuos. En el proceso se van comparando parejas y se va estableciendo una clasificación de los individuos. En primer lugar, se escogen dos individuos de la población al azar. Aquel cuya función de adaptación sea menor pasa a formar parte de la lista de clasificación, y como se trata del primer elemento elegido ocupará el último lugar. Este elemento deja de ser un candidato para participar en nuevas comparaciones porque ya ha sido clasificado. El otro elemento de la comparación (mejor adaptado) sí vuelve a ser candidato para participar en nuevas comparaciones. Repitiendo este proceso se obtiene finalmente una lista con la clasificación definitiva de los individuos de la población. Esta clasificación, tal y como se obtiene, es la que se emplea en el proceso de selección. Ya no es necesario realizar ningún tipo de asignación de probabilidad proporcional porque, de hecho, el elemento aleatorio se introduce mediante la elección de los individuos que participan en cada comparación.

3.4.1.2. Operadores de recombinación

Luego de la selección, los individuos del conjunto de apareamiento son recombinados para crear una nueva población mediante su descendencia que se espera sea de mejor calidad que la de sus padres. El objetivo del operador es combinar elementos de información de diferentes individuos, de modo que las características interesantes que estaban dispersas en diferentes individuos queden reunidas en uno nuevo, confiando en que los individuos obtenidos de esta manera representen soluciones de mejor calidad. La forma en que se realiza el cruce depende del tipo de representación que se escoja. Para ilustrar algunas posibilidades supondremos que la representación de las soluciones de un determinado problema es de tipo binario y es una cadena de ocho elementos. Los individuos A y B han sido seleccionados para someterlos al operador del cruce:
Individuo A: 1 1 1 0 1 0 0 1
Individuo B: 0 1 0 0 1 1 0 0
Podemos describir los siguientes tipos de cruce (que no son los únicos):

- Operador de cruce simple: Según este tipo se cruce, se selecciona un punto de la cadena en cada uno de los padres y se generan nuevos individuos combinando las partes que generan los cortes anteriores, como aparece en la Figura 3.4

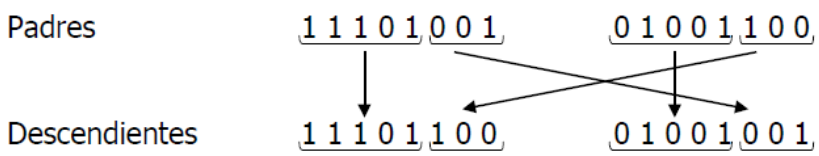


Figura 3.4: Operador de cruce simple

- Operador con dos puntos de corte: Es análogo al anterior, salvo que se seleccionan dos puntos de corte y los padres intercambian

los elementos de la cadena que quedan entre dichos puntos para generar los descendientes. La Figura 3.5 muestra un ejemplo de este operador.

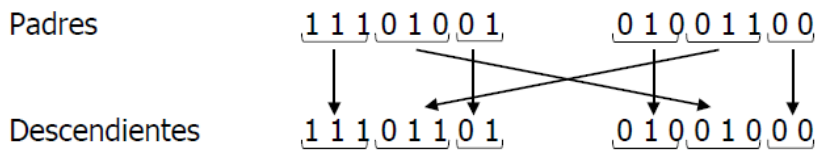


Figura 3.5: Operador de cruce de dos puntos

- Operador de cruce conforme a una máscara de cruce uniforme: En este caso, los genes de los descendientes se obtienen de acuerdo con el criterio dado por una máscara. La máscara, en el ejemplo, es una cadena de ceros y unos. Para cada posición de la descendencia se tomará el gen del padre 1 si el valor de la máscara para dicha posición es 1 y del padre 2 si el valor del gen es 0. La Figura 3.6 ilustra un ejemplo de este operador.

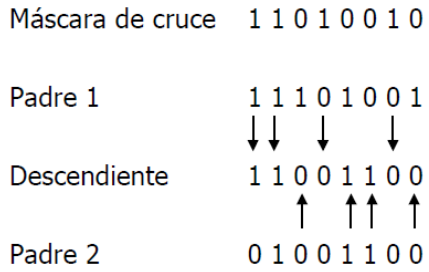


Figura 3.6: Operador de cruce uniforme

3.4.1.3. Operador de selección poblacional

En términos biológicos, los individuos mejor adaptados perduran durante varias operaciones. Por eso, el operador de selección escoge aquellos

individuos con buenas características y que deben perdurar a lo largo del tiempo y no desperdigarse entre otros individuos nuevos. El operador de reproducción selecciona a los individuos de una determinada población que pertenecen también a la siguiente, sin sufrir ningún otro tipo de modificación.

3.4.1.4. Operador de mutación

Con los operadores anteriores se obtienen individuos que combinan rasgos que están presentes en los individuos de la población. Sin embargo, pueden existir características que quedan sin explorar si sólo se emplean los operadores anteriores. Con la mutación se introducen modificaciones en los individuos de la descendencia. Siguiendo con el ejemplo anterior, la mutación consistiría en transformar un cero en uno (o viceversa) con una probabilidad determinada. La Figura 3.7 muestra un ejemplo de este concepto.

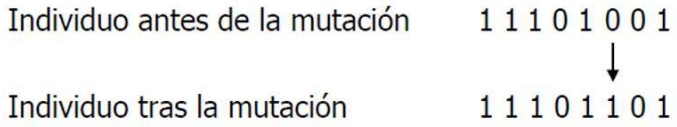


Figura 3.7: Operador de mutación

Si la probabilidad con la que tiene lugar la mutación en muy pequeña, es difícil que vuelvan a aparecer características que han sido abandonadas por el operador de cruce. Si la probabilidad de mutación es elevada, es probable que alguna de las características adecuadas de la solución se pierda y la técnica se desvíe de regiones potencialmente interesantes sin haber explorado con suficiente profundidad las regiones visitadas.

3.4.2. Algoritmo CHC

El algoritmo CHC *Cross generational elitist selection, Heterogeneous recombination and Cataclism mutation* es un AG no tradicional [17] que aplica una estrategia de selección conservativa que preserva los mejores individuos encontrados.

Introduce cuatro componentes novedosas:

1. **Selección Elitista:** Selecciona los N mejores cromosomas entre padres e hijos.

2. **Cruce Uniforme HUX:** Intercambia exactamente la mitad de los alelos que son distintos en los padres. Garantiza que los hijos tengan una distancia Hamming máxima a sus dos padres.

3. **Prevención de Incesto:** Se forman $N/2$ parejas con los elementos de la población. Sólo se cruzan las parejas cuyos miembros difieren en un número determinado de bits (umbral de cruce). El umbral se inicializa a $L/4$ (L es la longitud del cromosoma). La Figura 3.8 muestra este proceso con dos cromosomas de 16 bits. Se destacan los bits seleccionados para realizar el intercambio. Del mismo modo se muestran los hijos generados resaltando los bits seleccionados aleatoriamente.

4. **Reinicialización:** Si durante un ciclo no se crean descendientes mejores que los de la población anterior, al umbral de cruce se le resta 1. Cuando el umbral de cruce es menor que cero, la población se reinicializa utilizando alguno de los siguientes métodos:

   - Se mantiene una copia del mejor individuo de la población y la cadena es utilizada como base para reinicializar el resto de la población. Cada individuo nuevo es una mutación del mejor individuo [60].
   - La nueva población se genera conservando el mejor individuo y variando solamente un porcentaje de bits de la cadena original [62].

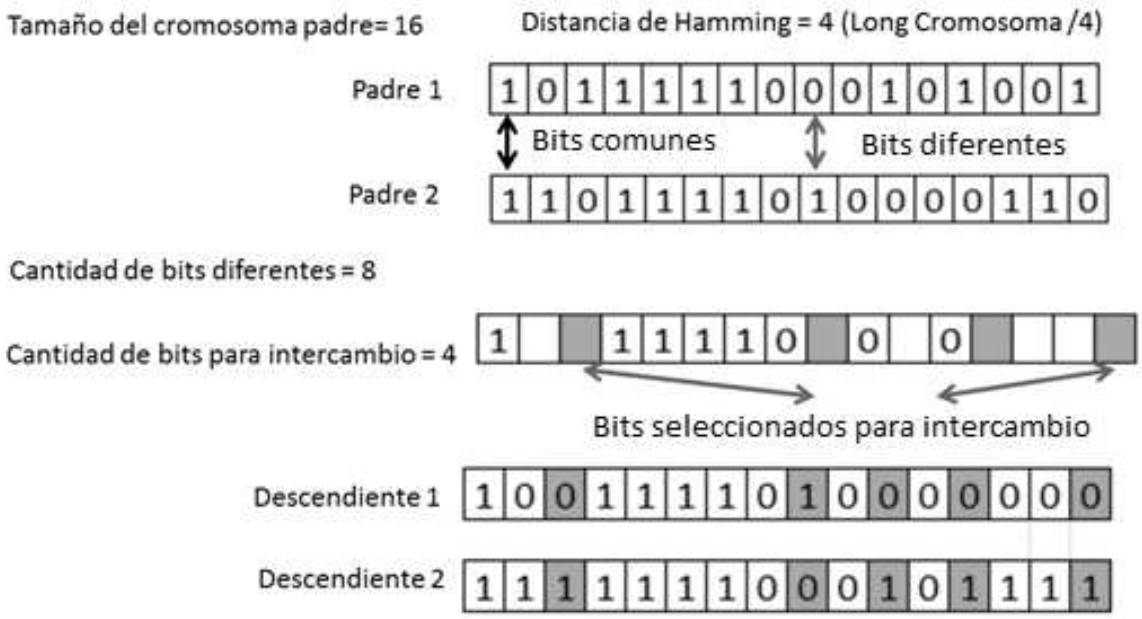


Figura 3.8: Operador de mutación HUX

El algoritmo 8 muestra el pseudocódigo del CHC canónico.

Algoritmo 8 Pseudocódigo CHC

```
t = 0 //generación de tiempo
Inicializar (Pa, umbralIncesto)
While Not (Condición de terminación(t,Pa)) Do
padres=seleccionarPadres(Pa,umbralIncesto)
hijos=HUX(P(t))
evaluar(hijos,padres)
Pn = SelecciónElitista(hijos,padres)
If not (modificación (Pa,Pn))
  umbralIncesto=umbralIncesto-1
   If umbralIncesto <= k
     Pn = reinicio(Pa)
  End If
End If
t = t+1
Pa = Pn
End While
Return Mejor Solución Encontrada
```

En general, CHC presenta un mejor patrón de explotación que el AG tradicional, al impedir que se crucen individuos muy similares. Si el ope-

rador de reinicialización es eficaz las poblaciones resultantes presentan una mayor diversidad que las del AG tradicional. Al proporcionar mayor diversidad genética, es capaz de obtener resultados superiores a los del AG tradional para problemas con espacio de búsqueda muy disperso, con funciones de *fitness* cuyos óptimos locales son altamente atractores.

3.5. Indicadores de rendimiento

El análisis de rendimiento de una metaheurística es una tarea necesaria que se debe llevar a cabo sobre base de referencia. Un enfoque teórico generalmente no es suficiente para evaluar una metaheurística. Para evaluar el rendimiento de una metaheurística se deben considerar una serie de aspectos que brinden indicadores que permitan tomar decisiones sobre los resultados obtenidos. A continuación se describen los elementos para definir los indicadores de rendimiento.

3.5.1. Diseño de experimentos

En los experimentos computacionales con metaheurísticas los objetivos deben ser definidos de manera clara y precisa. Todos los experimentos, reportes de las medidas de rendimientos y los análisis estadísticos van a depender del propósito de diseño de las metaheurísticas. Ciertamente, una contribución puede ser obtenida mediante diferentes criterios tales como tiempo de búsqueda, calidad de la solución, facilidad de implementación, facilidad de combinarse con otros algoritmos, flexibildiad para resolver otros problemas, etc. Una vez que los objetivos están defindos, la selección de las instancias de entrada debe realizarse cuidadosamente. Existen dos tipos de instancias:

- **Instancias de la vida real:** Representan instancias prácticas sobre el problema a ser resuelto y constituyen una buena medida de desempeño para la evaluación de la metaheurística.

- **Instancias construídas artificialmente:** Existen muchas librerías públicas de instancias estándar disponibles en Internet. Las mismas

contienen instancias muy conocidas para problemas de optimización global, optimización combinatoria, etc.

El conjunto de instancias debe ser diverso en términos de tamaño, complejidad y estructura. Éstas deben ser definidas en dos subconjuntos: (a) el primero debe ser utilizado para sintonizar los parámetros de la metaheurística y el segundo (b) para evaluar el desempeño del algoritmo de búsqueda.

3.5.2. Parámetros de desempeño

Los parámetros de desempeño para una metaheurística dada pueden ser clasificados en cuatro grupos:

1. **Calidad de la solución:** En términos de precisión en general la medida se basa en la distancia o el porcentaje de desviación de la solución obtenida con respecto a una de las siguientes soluciones:

   - **Óptimo global:** El uso del óptimo global permite definir un valor de rendimiento más general para diferentes metaheurísticas. La solución óptima global puede ser encontrada por un algoritmo de búsqueda exacta o puede estar disponible utilizando una instancia contruída donde el óptimo es conocido *a priori*.
   - **Solución de máximo y mínimo valor conocido:** Para problemas de optimización donde el óptimo global no es conocido, este tipo de soluciones puede considerarse una alternativa al óptimo global.
   - **Mejor solución conocida:** Para muchos problemas clásicos, existen librerías para instancias estándar dispobibles en la Web. Para todas esas instancias, la mejor solución disponible es conocida y es actualizada cada vez que se encuentra una mejora.
   - **Solución actualmente implementada**: Para problemas de la vida real alguien debe definir un requerimeinto sobre la calidad de la solución obtener.

2. **Esfuerzo computacional:** La eficiencia de una metaheurística puede ser demostrada mediante un análisis teórico o empírico. Se pueden utilizar diferentes criterios de parada tales como el tiempo en obtener una determinada solución (ej. óptimo global, mejor solución conocida, etc.), número de iteraciones.

3. **Robustez:** En general, la robustez mide el desempeño de un algoritmo con respecto a su comportamiento con diferentes tipos de instancias y problemas. La metaheurística debería ser capaz de resolver una variedad de instancias o problemas utilizando los mísmos parámetros.

4. **Análisis estadísticos**: Una vez que se obtuvieron los resultados estadísticos del experimento, estos pueden ser utilizados como parámetros de desempeño de la metaheurística. Diferentes test estadísticos pueden ser llevados a cabo para comparar diferentes metaheurísticas. Los test estadísticos permiten estimar el grado de confianza de los datos obtenidos con validez científica [24], [12]. Se debe establecer qué tipo de test será aplicado, ya sea, paramétrico o no paramétrico. Para la aplicación de un test paramétrico los datos deben cumplir tres condiciones:

   - **Independencia:** Los datos de la muestra deben ser independientes.
   - **Normalidad:** El comportamiento de los datos observados sigue una distribución normal o Gauss con media μ y varianza σ.
   - **Homocedasticidad:** Propiedad que indica si existe violación de la hipótesis de igualdad de varianzas.

   Para las instancias que cumplen normalidad y homocedasticidad se aplicará el test paramétrico de ANOVA a los resultados obtenidos cuando se analizan más de dos algoritmos, caso contrario se aplica t-Test. Para las instancias que no cumplan con los requisitos para realizar test paramétricos, se aplica el test no paramétrico de Kruskal-Wallis en caso de tener más de dos resultados obtenidos, caso contrario se aplica el test U de Mann Whitney o Wilcoxon.

Los test permiten determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados obtenidos por los algoritmos. En caso de haber diferencias se aplica el test de Tukey para determinar entre cuales algoritmos están esas diferencias y establecer de esta manera un ranking de rendimiento.

3.5.3. Reportes

La interpretación de los resultados debe ser explícita y estar relacionada con los objetivos establecidos considernado las medidas de desempeño. En general no es suficiente presentar un gran cúmulo de resultados utilizando tablas. Las herramientas de visualización para el análisis de datos son muy útiles para complementar el análisis numérico.

3.6. Conclusiones

En este capítulo se han introducido los conceptos básicos referentes a las metaheurísticas mostrando su definición, clasificación y desarrollo de los algoritmos básicos utilizados en el presente trabajo. En particular las descripciones se han desarrollado siguiendo la clasificación basada en el número de soluciones definiéndolas en dos tipos: (a) de trayectoria y (b) poblacional. Los algoritmos genéticos, que pertenecen a la clase de algoritmos evolutivos fueron desarrollados en profundidad dado que son la base de referencia comparativa de este trabajo en la sección experimental. Se presenta el algoritmo CHC como una variante no convencional de un AG junto con sus características distintivas que junto con el algoritmo de búsqueda local iterada (ILS) van a componer una versión híbrida en la fase de experimentación. Se establecen los conceptos para hacer el diseño de un experimento utilizando metaheurísticas para luego realizar un análisis del rendimiento de la misma avalado por los test estadísticos correspondientes.

Parte II

Modelos Computacionales

Capítulo 4

Modelado del problema

En el presente capítulo se muestran las diferentes formulaciones matemáticas que permiten describir los variados aspectos del problema de RND, tales como, el terreno, el diagrama de cobertura de la antena, la distribución de las antenas en el terreno y en particular la calidad de cada una de las posibles redes de radio. La función objetivo propuesta relaciona la cobertura de la red de radio y el uso de los recursos utilizados. Tal como lo establece el modelo tradicional de desarrollo de una red de radio, se busca lograr máxima cobertura sobre una superficie predeterminada. Esto difiere de lo propuesto por [7] que intenta satisfacer la cobertura de un conjunto de puntos preestablecidos en el terreno. Se brinda un ejemplo de aplicación para analizar los resultados obtenidos de los parámetros de evaluación.

4.1. Discretización de la superficie

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los MDT. Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo. Para discretizar la superficie del terreno se utiliza nuevamente una matriz T (Matriz del Terreno) de $f \times c$, donde se relacionan la latitud y la longitud con los subíndices i, j de las celdas de la matriz. La altura de cada punto a nivel del mar se almacena en las celdas de la matriz.

La Figura 4.1 muestra gráficamente el concepto, donde cada celda de la cuadrícula encierra una porción del terreno a representar y que

las mismas se referencian a través de los subíndices (i, j) como filas y columnas de una matriz.

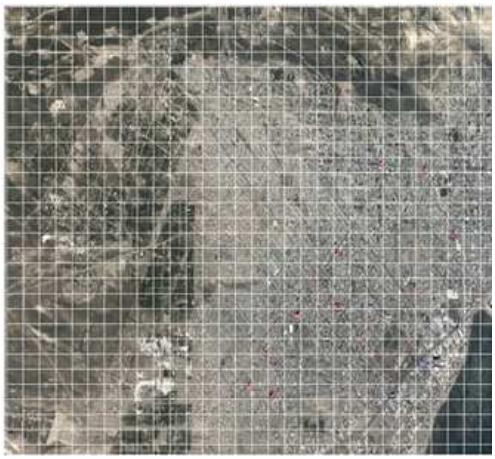
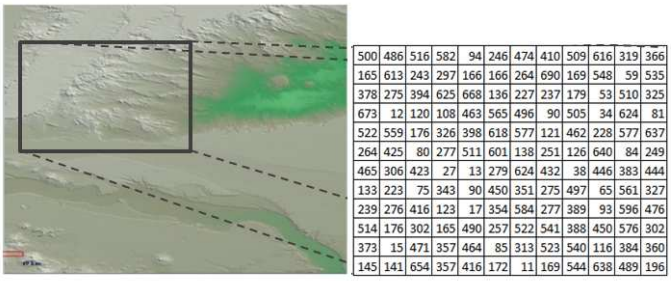


Figura 4.1: Discretización de una superficie de terreno.

Esta forma de discretización responde al modelo raster utilizado en los SIG y ha sido empleada en [8] para resolver el problema de RND. Las alturas son tomadas de las bases de datos generadas por la misión SRTM, disponibles en internet. El terreno seleccionado para este trabajo se encuentra dentro de las coordenadas -47^0S y -69^0O a -46^0S y -68^0O y las alturas fueron tomadas del archivo SMTR3 (un punto cada 90 m) denominado *S47W069.hgt*. El tamaño de la matriz T resultante de la zona es de 1201 filas y 1201 columnas, esto abarca una superficie de 108 Km^2 aproximadamente. La Figura 4.2 muestra la representación gráfica del terreno generada por el archivo propuesto y la configuración de una parte de la matriz M con las alturas correspondientes utilizando el modelo de raster.



500	486	516	582	94	246	474	410	509	616	319	366
165	613	243	297	166	166	264	690	169	548	59	535
378	275	394	625	668	136	227	237	179	53	510	325
673	12	120	108	463	565	496	90	505	34	624	81
522	559	176	326	398	618	577	121	462	228	577	637
264	425	80	277	511	601	138	251	126	640	84	249
465	306	423	27	13	279	624	432	38	446	383	444
133	223	75	343	90	450	351	275	497	65	561	327
239	276	416	123	17	354	584	277	389	93	596	476
514	176	302	165	490	257	522	541	388	450	576	302
373	15	471	357	464	85	313	523	540	116	384	360
145	141	654	357	416	172	11	169	544	638	489	196

Figura 4.2: Representación gráfica del terreno y parte de la Matriz M con alturas relevadas como modelo raster

4.2. Diagrama de cobertura de una antena

El modelado de la cobertura de una antena omnidireccional sobre la matriz de terreno T consiste en buscar el conjunto de celdas t_{ij} de T que se encuentren a la misma distancia en celdas (lóbulo de la antena) con respecto al centro establecido por el lugar candidato c_{ij}. Para el caso de la matriz la idea de omnidireccional se modeló mediante una matriz cuadrada alrededor del punto candidato c_{ij}. Éstos serán el centro de irradiación de cada antena k, generando señal a su alrededor sobre un conjunto de celdas t_{ij}.

La Tabla 4.1 muestra un ejemplo de modelado de una antena omnidireccional de radio 1 alrededor del punto $c_{i,j}$.

Tabla 4.1: Modelado de puntos del terreno cubiertos por una antena omnidireccional

$t_{(1,1)}$	$t_{(1,...)}$	$t_{(1,...)}$	$t_{(1,...)}$	$t_{(1,...)}$	$t_{(1,...)}$	$t_{(1,c)}$
$t_{(...,1)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,c)}$
$t_{(..,1)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(i-1,j-1)}$	$t_{(i-1,j)}$	$t_{(i-1,j+1)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,c)}$
$t_{(...,1)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(i,j-1)}$	$c_{(i,j)}$	$t_{(i,j+1)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,c)}$
$t_{(...,1)}$	$t_{(...,...)}$	$(t_{i+1,j-1})$	$t_{(i+1,j)}$	$t_{(i+1,j+1)}$	$t_{(...,...)}$	$t_{(...,c)}$
$t_{(f,1)}$	$t_{(f,2)}$	$t_{(f,..)}$	$t_{(f,...)}$	$t_{(f,..)}$	$t_{(f,..)}$	$t_{(f,c)}$

Podemos definir al lóbulo de radiación como

$$t_{(i,j)} \subseteq lr_{(c_{(i,j)},(i+-r,j+-r))} \tag{4.1}$$

donde lr es el lóbulo de radiación con centro $c_{(i,j)}$ y radio r.

Por lo tanto, una antena a queda definida de la siguiente manera:

$$a_{(c_{(i,j)},lr)} \tag{4.2}$$

donde $c_{(i,j)}$ es el centro de radiación y lr su lóbulo de radiación.

Cuando se realiza un relevamiento se encuentran muchos *lugares* (puntos factibles) donde sería posible instalar una antena y cuyas coordenadas están dentro de la matriz de terreno M. Esto forma un conjunto S definido de la siguiente manera:

$$S = \{c_{(1,i,j)}, c_{(2,i,j)}, ...c_{(k,i,j)}, c_{(n,i,j)}\} \tag{4.3}$$

donde k identifica el punto $c_{(k,i,j)}$ dentro del conjunto S para la antena a_k y n es la cantidad total de puntos factibles del terreno.

4.3. Modelado de una red de radio

Se define como la red de radio, al conjunto de puntos factibles que tienen una antena activa y su diagrama de cobertura generado por los lóbulos de radiación de todas las antenas. Los puntos factibles están definidos en la ecuación 4.3 y la definición de una antena está en la ecuación 4.2, por lo tanto podemos definir la red de radio como la suma de todos los puntos $t_{(i,j)}$ que pertenecen a los lóbulos de radiación lr de las antenas a_k instaladas en los puntos factibles seleccionados. Sean los puntos factibles seleccionados $\{c_{(1,i,j)}, c_{(2,i,j)}, ..., c_{(k,i,j)}, c_{(n,i,j)}\}$ y las antenas $\{a_1, a_2, ..., a_k, ..., a_n\}$, el diagrama de cobertura queda definido como:

$$\sum_{k=1}^{n} t_{i,j} \in a_{(k)} \tag{4.4}$$

Cuando combinamos varias antenas en el terreno representado por la matriz T obtendremos una matriz de cobertura M según la selección de puntos que se haga del conjunto S quedando definido un subconjunto R formado por los sitios candidatos $r_{k,i,j}$ y con $R \subseteq S$. Los sitios candidatos para la instalación de las antenas se representan como un subconjunto de celdas pertenecientes a la matriz T. Cada posible red de radio se modela mediante un vector binario de tamaño n, conformando un individuo dentro de la población y siendo n la cantidad de sitios candidatos en el terreno. Cada valor del vector indica la activación (1) o no (0) de un emplazamiento candidato cuya combinación conforma una red de radio candidata. El individuo X_i^n, de longitud n que se encuentra en la posición i y pertenece a la población P de tamaño k cuyos valores posibles son 0 y 1. Cada individuo se define como:

$$X_i^n = [0, 1] \in P^k \tag{4.5}$$

con $i = [1, 2, ..., k]$.

Este concepto se representa gráficamente mediante la Figura 4.3 .

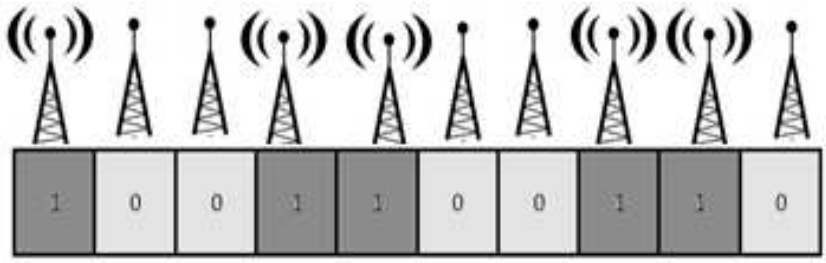


Figura 4.3: Modelado de una red de radio.

La matriz M resultante para cada individuo X_i^n queda caracterizada por tres tipos de puntos conforme a la red de radio:

- Puntos $m_{(i,j)}$ cubiertos por alguna antena $a_{(k)}$
- Puntos $m_{(i,j)}$ NO cubiertos por ninuna antena $a_{(k)}$
- Puntos $m_{(i,j)}$ cubiertos por más de una antena $a_{(k)}$

Se define una función $f_{(m_{(i,j)})}$ para caracterizar cada punto en el terreno

$$f_{(m_{(i,j)})} = \begin{cases} 1, & \text{si } m_{(i,j)} \text{ está cubierto por una antena } a_{(k)} \\ 0, & \text{si } m_{(i,j)} \text{ no está cubierto por ninguna antena } a_{(k)} \\ -1, & \text{si } m_{(i,j)} \text{ está cubierto por más de una antena } a_{(k)} \end{cases} \tag{4.6}$$

La Figura 4.4 representa una caracterización de la matriz M luego de aplicar la función de asignación de la ecuación 4.6

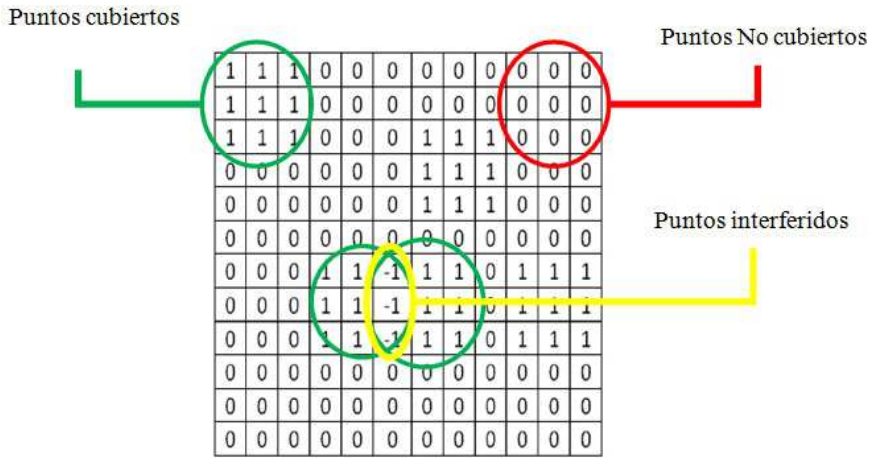


Figura 4.4: Terreno caracterizado con valores de cobertura de una red de radio.

4.4. La función objetivo

La función objetivo propuesta utiliza las marcas de la matriz de terreno M y asigna un único valor numérico a cada solución. Este valor es una medición de la calidad de la red de radio evaluada que debe guiar a los diferentes algoritmos en la búsqueda de la red de radio que maximice la cobertura, minimice las interferencias y optimice el uso de recursos. Al aplicar la ecuación de asignación 4.6, a la matriz de terreno M, con la red de radio del individuo X_i^n obtenemos una matriz de cobertura L, donde la suma de los $l_{(i,j)} = 1$ indica la cantidad total de puntos cubiertos (PtosCubiertos), la suma de $l_{(i,j)} = 0$ determina la cantidad de puntos no cubiertos (PtosNoCubiertos) y la suma de los $l_{(i,j)} = -1$ establece la cantidad de sitios abarcados por más de una antena (PtosInterferidos). De este modo queda caracterizada la red conforme a la totalidad de los puntos del terreno (TotaldePtosdelTerreno). Podemos definir los puntos iluminados totales (TotaldePtosIluminados) como la suma de los puntos cubiertos e interferidos, en la siguiente ecuación:

$$PtosIluminados + PtosNoCubiertos = TotaldePtosdelTerreno \quad (4.7)$$

$$\frac{PtosIluminados}{TotaldePtosdelTerreno} + \frac{PtosNoCubiertos}{TotaldePtosdelTerreno} = 1 \quad (4.8)$$

Basados en la propocionalidad de la ecuación 4.8 podemos decir:

$$\frac{PtosIluminados}{TotaldePtosdelTerreno} = 1 - \frac{PtosNoCubiertos}{TotaldePtosdelTerreno} \quad (4.9)$$

Con respecto a los sitios iluminados en la totalidad del terreno podemos establecer que:

$$PtosCubiertos + PtosInterferidos = TotaldePtosIluminados \quad (4.10)$$

$$\frac{PtosCubiertos}{TotaldePtosIluminados} + \frac{PtosInterferidos}{TotaldePtosIluminados} = 1 \quad (4.11)$$

$$\frac{PtosCubiertos}{TotaldePtosIluminados} = 1 - \frac{PtosInterferidos}{TotaldePtosIluminados} \quad (4.12)$$

Podemos observar que tanto para la ecuación 4.9 y la ecuación 4.12 que el lado derecho de la igualdad representa una propocionalidad del lado izquierdo. Para el caso de la ecuación 4.9, si la proporción del lado izquierdo es igual a 1 significa que la cantidad de puntos sin iluminar es 0 llegando a una máxima cobertura. Para la ecuación 4.12 podemos ver que si de la totalidad de los puntos iluminados, no hay puntos interferidos, entonces el lado derecho es igual a 1. Esto significa que no hay interferencias en la cantidad de puntos cubiertos en la red de radio.

Se pueden relacionar ambas ecuaciones para determinar la calidad de red de radio definiendo la siguiente función:

$$F_{(X_i^n)} = (1 - \frac{PtosNoCubiertos}{TotaldePtosdelTerreno}) \times (1 - \frac{PtosInterferidos}{TotaldePtosIluminados}) \tag{4.13}$$

En la ecuación 4.13 se muestra la función objetivo, el primer factor determina el grado de cobertura del terreno ya que si todos los sitios tienen señal, el numerador del cociente es 0. Con esto se satisface la primera parte del objetivo que es maximizar el área cubierta. El segundo factor de la ecuación 4.13 analiza la calidad con la cual se realiza la cobertura del terreno. Cuanto menor es la cantidad de sitios interferidos es mejor la calidad de la cobertura lograda de los puntos irradiados. Finalmente, la aptitud de la solución es mejor cuando el valor objetivo es más cercano a uno. El peor caso sería poner en funcionamiento todos los sitios, de esta forma se alcanzaría la máxima cobertura pero también tendríamos el máximo nivel de interferencias y utilización de recursos. Si todos los sitios están cubiertos pero a su vez todos interferidos el resultado final de la ecuación sería 0, quedando esta solución descartada. A continuación se brinda un ejemplo consistente en el análisis de cuatro posibles soluciones de un conjunto candidato de 5 sitios en una matriz que discretiza un terreno de 5x5. Las antenas tienen un lóbulo de radiación de una celda.

4.4.1. Ejemplo de aplicación de la función objetivo

Sea $S = \{(1,5),(2,2),(3,4),(4,1),(5,3)\}$, el conjunto de todos los sitios candidatos y T la matriz de $n \times m$ que discretiza el terreno a

representar, la distribución de la totalidad de los sitios queda definida según se muestra en la matriz representada por Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Distribución de sitios candidatos

	1	2	3	4	5
1				X	
2		X			X
3					
4			X		
5	X				

Luego se analizan los subconjuntos $R \subseteq S$ aplicando la función objetivo propuesta:

- **Solución candidata 1:** Sea $R1 = \{(1,2),(2,4),(3,1)\}$ el subconjunto de S cuya matriz de distribución se muestra en la Tabla 4.3 y la cobertura se muestra en la Tabla 4.4, siendo ésta última el resultado de aplicar la función de cobertura.

Tabla 4.3: Matriz de distibución de antenas R_1

	1	2	3	4	5
1		X			
2				X	
3	X				
4					
5					

Tabla 4.4: Matriz de cobertura para R_1

	1	2	3	4	5
1	1	***1***	-1	1	1
2	-1	-1	-1	***1***	1
3	***1***	1	1	1	1
4	1	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0

Luego de aplicar la función de asignación representada por la ecuación 4.6 se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4.5: Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_1

Cubiertos	No Cubiertos	Interferidos	Antenas	Puntos Totales
17	8	4	3	25

La evaluación de la calidad de la solución para R_1 se muestra conforme a la ecuación 4.13

$$\begin{aligned} f(x) &= (1 - \frac{8}{25}) \times (1 - \frac{4}{17}) \\ f(x) &= (1 - 0,320) \times (1 - 0,235) \\ f(x) &= (0,68) \times (0,764) \\ f(x) &= 0,519 \end{aligned} \tag{4.14}$$

- **Solución candidata 2:** Sea $R_2 = \{(1,5),(2,2),(5,3)\}$ el subconjunto de S cuya matriz de distribución se muestra en la Tabla 4.6 y la cobertura se muestra en la Tabla 4.7, siendo esta última el resultado de aplicar la función de cobertura.

Tabla 4.6: Matriz de distribución de antenas R_2

	1	2	3	4	5
1					**X**
2		**X**			
3					
4					
5			**X**		

Tabla 4.7: Matriz de cobertura para R_2

	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	***1***
2	1	***1***	1	1	1
3	1	1	1	0	0
4	0	1	1	1	0
	0	1	***1***	1	0

Luego de aplicar la función de asignación representada por la ecuación 4.6 se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4.8: Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_2

Cubiertos	No Cubiertos	Interferidos	Antenas	Puntos Totales
19	6	0	3	25

La evaluación de la calidad de la solución para R_2 se muestra conforme a la ecuación 4.13

$$\begin{aligned} f(x) &= (1 - \frac{6}{25}) \times (1 - \frac{0}{19}) \\ f(x) &= (1 - 0,240) \times (1 - 0,000) \\ f(x) &= (0,760) \times (1,000) \\ f(x) &= 0,760 \end{aligned} \tag{4.15}$$

- **Solución candidata 3:** Sea $R_3 = \{(2,2),(3,4),(1,5)\}$ el subconjunto de S cuya matriz de distribución se muestra en la Tabla 4.9 y la cobertura se muestra en la Tabla 4.10, siendo ésta última el resultado de aplicar la función de cobertura.

Tabla 4.9: Matriz de distribución de antenas R_3

	1	2	3	4	5
1					**X**
2		**X**			
3				**X**	
4					
5					

Tabla 4.10: Matriz de cobertura de antenas R_3

	1	2	3	4	5
1	1	1	-1	1	***1***
2	1	***1***	-1	-1	-1
3	1	1	-1	***1***	**1**
4	0	0	1	1	1
5	0	0	0	0	0

Luego de aplicar la función de asignación representada por la ecuación 4.6 se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4.11: Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_3

Cubiertos	No Cubiertos	Interferidos	Antenas	Puntos Totales
18	7	4	3	25

La evaluación de la calidad de la solución para R_3 se muestra conforme a la ecuación 4.13

$$\begin{aligned} f(x) &= (1 - \frac{7}{25}) \times (1 - \frac{4}{18}) \\ f(x) &= (1 - 0,280) \times (1 - 0,222) \\ f(x) &= (0,720) \times (0,778) \\ f(x) &= 0,560 \end{aligned} \tag{4.16}$$

- **Solución candidata 4:** Sea $R_4 = \{(1,5),(2,2),(3,4),(4,1),(5,3)\}$ el subconjunto de S cuya matriz de distribución y cobertura se muestran en la Tablas 4.12 y 4.13 respectivamente. La Tabla 4.14 muestra el resultado de aplicar la función de cobertura.

Tabla 4.12: Matriz de distribución de antenas R_4

	1	2	3	4	5
1					**X**
2		**X**			
3				**X**	
4	**X**				
5			**X**		

Tabla 4.13: Matriz de cobertura de antenas R_4

	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	**1**
2	0	**1**	-1	-1	-1
3	-1	-1	-1	**1**	1
4	**1**	-1	-1	-1	1
5	1	-1	**1**	1	0

Luego de aplicar la función de asignación representada por la ecuación 4.6 se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4.14: Cuantificación de los puntos del terreno de la matriz de cobertura R_4

Cubiertos	No Cubiertos	Interferidos	Antenas	Puntos Totales
24	1	10	5	25

La evaluación de la calidad de la solución para R_4 se muestra conforme a la ecuación 4.13

$$\begin{aligned} f(x) &= (1 - \frac{1}{25}) \times (1 - \frac{10}{24}) \\ f(x) &= (1 - 0,040) \times (1 - 0,416) \\ f(x) &= (0,960) \times (0,583) \\ f(x) &= 0,559 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Basados en la función objetivo podemos realizar una comparativa entre las diferentes soluciones y establecer observaciones que permiten seleccionar el individuo que cumple con el objetivo planteado. La Tabla 4.15 resume los valores obtenidos por cada uno de los subconjuntos candidatos.

Tabla 4.15: Valoración de soluciones candidatas

Individuo	Cubiertos	No Cubiertos	Interferidos	Antenas	$f(x_i^j)$
R_1	13	12	0	2	0,519
R_2	**19**	**6**	**0**	**3**	**0,760**
R_3	18	7	4	3	0,560
R_4	24	1	10	5	0,559

Podemos observar que la solución R_2 es la que mejor cumple con el objetivo propuesto con el mayor valor objetivo $(0,76)$. Está claro que la cobertura de la solución R_2 (19 puntos) es menor que la cobertura de solución R_4 (24 puntos). Pero la calidad de R_2 utilizando 3 antenas sin interferencias, hace que sea preferible a R_4, que utiliza 5 antenas con 10 interferencias. También podemos observar que R_4 es la peor de todas las soluciones a pesar de lograr casi una cobertura total, esto indica que la función objetivo propuesta en este trabajo castiga el uso excesivo de recursos e interferencias.

4.5. Definición del equipamiento de comunicaciones

Para definir el equipamiento se toma como referencia el radio utilizado por las principales operadoras de la zona para sus sistemas de telemetría. Las antenas para las bases se configuraron con una cobertura de $18Km^2$ a una altura promedio de $30m$ siendo del tipo omnidireccional con una ganancia de 6,5 dBi. Los puntos remotos se configuraron a 6 m de altura con una antena de tipo yagui de 7 elementos con una ganancia de 10 dBi. Los equipos utilizados son del tipo Inet II de 900 Mhz, ajustados a una potencia de $23dBm$ utilizando un cable de tipo Eliax LDF4 con una atenuación de 6,85$db/100$ m a $900Mhz$.

4.6. Aplicación del modelo Longly Rice

Por cada conjunto de puntos formado entre centro de la antena y su límite de iluminación se genera un perfil del terreno. Por cada punto de los perfiles que conforma la iluminación omnidireccional se registra la atenuación de referencia otorgada por el modelo Longly-Rice generando un perfil de iluminación. Por cada punto que esté dentro del lóbulo de radiación, donde la atenuación de referencia es mayor al umbral de recepción (-80dBm) se coloca un valor 1 en la matriz heurística H. Si el punto no supera el umbral se coloca un 0 y en caso de que el punto haya sido iluminado por otra antena se coloca un -1. A dicha matriz se le aplica la función objetivo definida en la ecuación 4.13 para determi-

nar la calidad de cada individuo candidato como solución del problema. Estos valores se corresponden con los puntos que superen el umbral de recepción en la matriz M del terreno.

4.7. Modelado de los componentes metaheurísticos

A continuación se presentan los algoritmos que permiten tratar computacionalmente los mecanismos propuestos como así también las distintas versiones de CHC propuestas en este trabajo.

4.7.1. Algoritmos CHC propuestos

Las versiones de CHC propuestas difieren del CHC canónico presentado en el algoritmo 8 en el uso de la variabilidad genética como mecanismo de detección de incesto y de estancamiento de la población. El mecanismo propuesto para detectar estancamiento toma como base la probabilidad de aceptación del algoritmo Recocido Simulado (SA) [10], pero a la inversa del SA, la temperatura T aumenta con el paso del tiempo, incrementado la probabilidad de un cataclismo. Por cada iteración sin mejoras se compara la variabilidad de la población generada con respecto a la variabilidad patrón. La diferencia entre estas dos debe ser siempre menor al entorno con centro en la variabilidad patrón y de radio igual a la probabilidad de aceptación. A medida que las iteraciones pasan el entorno se reduce y si la variabilidad de la población generada queda fuera del entorno, se produce el cataclismo.
El algoritmo 9 presenta el pseudocódigo que utiliza la variabilidad genética de la población como mecanismo de prevención de estancamiento.

Algoritmo 9 Pseudocódigo para prevención de estancamiento

```
1: float varPatron =0.5; // variabilidad patrón
2: float varPoblacion =0.0;
3: bool cataclismo = False;
4:   varPoblacion =VariabilidadPoblaciónEstancada(Pa);
5:   cataclismo = RadioAceptacion(T,valorObjetivoSinMejora,varPoblacion);
6:    If cataclismo Then
7:      Cataclismo(Pa,metodo);
8:    Else
9:      T = T+1; // se incrementa T disminuyendo el rango de aceptación
10:   End If
```

La función de la línea 4 del algoritmo 9 calcula el valor de la variabilidad de la población, cuyo pseudocódigo se muestra en el algoritmo 10.

Algoritmo 10 Pseudocódigo para obtener la variabilidad de $P_{(a)}$

```
1: VariabilidadPoblaciónEstancada(Pa)
2: int j = 0
3: float varPob =0.0f
4: float alelosPob = n × k // k individuos de tamaño n
5: // suma el contenido de los alelos de los k individuos de la población
6: For (i = 0;j < k;j++)
7:   varPob = varPob + P[ ][j]
8: End For
9: varPob = varPob /alelosPob; // Cantidad total de alelos de la población
10: Return varPob;
```

La función de la línea 5 del algoritmo 9 determina si se produce o no el cataclismo y aquí es donde se emplea la función propuesta basada en el SA, cuyo pseudocódigo se muestra en el algoritmo 11.

El mecanismo de prevención de incesto recibe como parámetros las parejas, el umbral de incesto y se establece el margen de aceptación como un entorno con centro en el umbral establecido y un radio r. Se saca la variabilidad de cada pareja sumando el valor de cada alelo del cromosoma de cada una de las parejas y se divide por el tamaño n del vector. Luego se promedia las variabilidades de las parejas y se verifica si dicho valor se encuentra dentro del entorno de aceptación. Si la condición se cumple la función devuelve verdadero y se procede a aplicar el operador de cruce,

Algoritmo 11 Pseudocódigo para determinar el cataclismo

```
1: RadioAceptacion(T,valorObjetivoSinMejora,varPoblacion)
2: float e = 2,28 ;// número e
3: float mejorValor =1 // cobertura ideal
4: float ea = 0.0;
5: cataclimo = False;
6: float limSup = 0.0;
7: float limInf = 0.0;
8: float expSAmodif = (valorObjetivoSinMejora - mejorValor) / T;
9: ea = 1 - exp(e,expSAmodif); // mecanismo propuesto
10: limSup = varPatron + ea;
11: limInf = varPatron -ea;
12: If (varPoblación > limSup) Or (varPoblación < limInf) Then
13:   cataclimo = True; //
14: End If
15: Return cataclismo;
```

caso contrario las parejas son demasiado similares y no aplica el operador. El Algoritmo 12 muestra el pseudocódigo para la función *detectarIncesto*.

Algoritmo 12 Pseudocódigo para la detección de incesto

```
1: bool detectarIncesto (pareja[2][n], umbralIncesto)
2: int j = 0;
3: bool aceptarCruce = False;
4: float variabCromosma01 =0.0;
5: float variabCromosma01 =0.0;
6: float variabilidadPareja =0.0;
7: entornoIncesto = 0.25 ;
8: For (j = 0;j < n;j++)
9:    variabCromosma01 = variabCromosma01 + pareja[0][j];
10:   variabCromosma02 = variabCromosma02 + pareja[1][j];
11: End For
12: variabCromosma01 = variabCromosma01 /n;
13: variabCromosma02 =variabCromosma01 /n;
14: variabilidadPareja = (variabCromosma01 + variabCromosma02) /2;
15: If (variabilidadPareja > umbralIncesto − entornoIncesto) And
16: (variabilidadPareja < umbralIncesto + entornoIncesto) Then
17:   aceptarCruce = True;
18: End If
19: Return aceptarCruce;
```

El algoritmo CHC propuesto queda definido según el Algoritmo 13 en el que se modifican las líneas 9 a 13 del Algoritmo 9 incorporando la prevención del estancamiento y la forma de detección del incesto.

Algoritmo 13 Pseudocódigo QCHC

```
1: t = 0 //generación de tiempo
2: Inicializar (Pa, umbralIncesto)
3: while not (Condición de terminación(t,Pa)) do
4:    padres=seleccionarPadres(Pa,umbralIncesto)
5:    hijos=HUX(P(t))
6:    evaluar(padres,hijos)
7:    Pn = SelecciónPoblación(padres, hijos,método)
8:    if not (modificación (Pa,Pn))
9:    varPatron =0.5 // variabilidad patrón
10:      VariabilidadPoblaciónEstancada(Pa)
11:      RadioAceptacion(T,valorObjetivoSinMejora)
12:       if variabilidad está fuera de rango
13:         Cataclismo(Pa,metodoCataclismo)
14:       else
15:         T = T+1 // se incrementa T disminuyendo el rango de aceptación
16:      end if
17:   t = t+1
18:   Pa = Pn
19: end while
20: return Mejor Solución Encontrada
```

Para todos los casos, el mecanismo de selección de las parejas se basa en el método de la ruleta.

A continuación se detallan los mecanismos de selección poblacional y de cataclismo utilizados para generar la batería de algoritmos utilizados en el presente trabajo.

4.7.2. Mecanismos de selección poblacional

La forma en que se seleccionan los individuos para que formen parte de la nueva población determina el modo en que la evolución de la población irá seleccionando los mejores individuos a través del tiempo. A continuación se describen los tres mecanismos de selección poblacional utilizados en este trabajo.

4.7.2.1. Selección elitista

La selección elitista es uno de los métodos con los que fue creado originalmente el algoritmo CHC, consiste en generar la descendencia

correspondiente con las parejas seleccionadas, ordenar por *fitness* a todos los indiviudos entre padres e hijos y seleccionar los mejores individuos para conformar la nueva población. El pseducódigo del algoritmo 14 muestra el procedimiento de selección y el algoritmo que utiliza este método se denomina QCHC-RE.

Algoritmo 14 Mecanismo de selección poblacional elitista

1: SelecciónPoblación(padres, hijos,método)
2: **Case** método = seleccionElisitsta;
3: Pe = 0; //Población para evaluacion
4: evaluar (hijos); // Calcular el valor objetivo de los hijos generados
5: Pe=padres + hijos; // Se copian padres e hijos en un solo arreglo
6: ordenar(Pe);// Se ordenan los individuos conforme a su *fitness*
7: **For** i = 0; i <k; i++; // tamaño de población k
8: **Copy** $Pn_{(i)} = Pe_{(i)}$
9: **End For**
10: mezclar (Pn); // Mezcla aleatoriamente todos los individuos
11: **End Case**
12: **Return** Pn

4.7.2.2. Torneo elitista

El torneo elitista seleccionado para este experimento es del tipo determinista, una vez que se llevó a cabo la cruza de los individos se genera una población compuesta por los padres y los hijos ordenados de manera aleatoria. Luego se seleccionan parejas para la competencia y el individuo de mejor *fitness* es seleccionado para integrar la mejor población. El pseudocódigo del algoritmo 15 muestra el procedimiento de selección y el algoritmo que utiliza este método se denomina QCHC-TE.

Algoritmo 15 Mecanismo de selección poblacional torneo elitista

1: SelecciónPoblación(padres, hijos,método)
2: **Case** método = torneoElitista;
3: Pe = 0; //Población para evaluacion
4: Pc = 0 ;// Poblacion de parejas
5: evaluar (hijos); // Se saca el valor objetivo de los hijos generados
6: Pe=padres + hijos ;// Se copian padres e hijos en un solo arreglo
7: Pc = generarParejas(Pe);
8: **For** i = 0; i< cantParejas; i++;
9: $Pn_{(i)}$=seleccionarMejorIndividuo ($Pc_{(i)}$); // Se selecciona el individuo de mejor *fitness* de cada pareja.
10: **End For**
11: mezclar (Pn); // Mezcla de manera aleatoria las posiciones de todos los individuos.
12: **End Case**
13: **Return Pn**;

4.7.2.3. Mu + Lambda

La seleción Mu + Lambda consiste en que el mejor individuo generado reemplaza al peor individuo de la población actual, conformando de esa manera la nueva población. El pseudocódigo del algoritmo 16 muestra el procedimiento de selección y el algoritmo que utiliza este método se denomina QCHC-ML.

Algoritmo 16 Mecanismo de selección poblacional Mu + Lambda

1: SelecciónPoblación(padres, hijos,método)
2: **Case** metodo = muLambda;
3: mejorHijo;
4: peorPadre;
5: Pn = Pa;
6: // Se saca el valor objetivo de los hijos generados
7: evaluar (hijos);
8: mejorHijo=seleccionarMejorIndividuo(hijos);
9: peorPadre =seleccionarPeorIndividuo(padres);
10: reemplazarIndividuos(Pn,mejorHijo,peorPadre);
11: // Mezcla de manera aleatoria todos los individuos de la población.
12: mezclar (Pn);
13: **End Case**
14: **Return** Pn;

4.7.3. Mecanismos de cataclismo

Cuando el umbral de incesto es alcanzado, la población se reinicializa utilizando algún tipo de patrón conservando el mejor individuo. A continuación se muestran los métodos utilizados en este trabajo incluyendo un nuevo método denominado Método Dinámico.

4.7.3.1. Método dinámico

El método dinámico propuesto en este trabajo conserva el mejor individuo de la población y el resto de los individuos se genera a partir de la variabilidad del mejor individuo. Esto permite generar una nueva población, diversificando el espacio de búsqueda sobre el mejor individuo.

El pseudocódigo del algoritmo 17 muestra el procedimiento de cataclismo y el algoritmo que utiliza este método se denomina QCHC-MD.

Algoritmo 17 Mecanismo de sacudida Método Dinámico

```
1: Cataclismo(Pa,metodo);
2: mejorIndividuo=mejorIndividuo(Pa); // Se extrae el mejor individo de la población
   actual
3: nuevoIndividuo=0;
4: variabilidadIndviduo = 0;
5: Case metodo : metodoDinamico;
6: For (i=0;i< n;i++) // individuos de tamaño n
7: // Se suma el valor del contenido de los alelos
8:   variabilidadIndividuo=variabilidadIndividuo + mejorIndividuo[i];
9:  End For
10: variabilidadIndividuo = (variabilidadIndividuo / n);
11: Pn(0) =mejorIndividuo; //Se conserva el mejor individuo
12: For (i = 1;i<k;i++) // tamaño de población k
13:  For (j=0;j<n;j++)
14:    probabilidadAlelo = random();// Generacion de un valor entre 0 y 1
15:     If probabilidadAlelo < variabilidadIndividuo Then
16:       nuevoIndividuo[j] = 1;
17:     Else
18:       nuevoIndividuo[j] = 0;
19:     End If
20:   End For ;
21: Pn(i) = nuevoIndividuo;
22: nuevoIndividuo=0; // Se blanquea el vector para el nuevo individuo
23: End For
24: End Case;
25: Return Pn;
```

4.7.3.2. Método de conservación de bits

En el método de conservación de bits (MCB) la nueva población se genera conservando el mejor individuo y el resto de la población se genera variando solamente un porcentaje de bits de la cadena original [63]. El pseudocódigo del algoritmo 18 muestra el procedimiento de cataclismo y el algoritmo que utiliza este método se denomina QCHC-MCB.

Algoritmo 18 Mecanismo de sacudida Método de Conservación de Bits

```
1: Cataclismo(Pa,metodo)
2: mejorIndividuo=mejorIndividuo(Pa); //Selección del mejor individo de Pa
3: nuevoIndividuo=0; // Nuevo individuo generado
4: Case metodo : metodoAleatorio
5: alelosMutado = 0; // alelos a mutar
6: Pn(0) =mejorIndividuo;
7: cantidadAlelos = n*(Porcentaje/100);// individuo de tamaño n;
8: nuevoIndividuo =mejorIndividuo ; //Se toma como plantilla el mejor individuo
9: GenerarAletaorioNoRepetido(alelosMutados,cantidadAlelos); // generar alelos no
   repetidos para mutar
10: For (i = 1;i<k;i++) // población de tamaño k
11:  For (j=0;j < cantidadAlelos;j++)
12:    alelo = alelosMutatos[j] ;// Se extraen los valores que indican cual alelo del
   cromosoma base mutar
13:    If nuevoIndividuo[alelo] = 1 Then
14:      nuevoIndividuo[alelo] = 0;
15:     Else
16:      nuevoIndividuo[alelo] = 1;
17:    End If
18:  End For ;
19: Pn(i) = nuevoIndividuo;
20: nuevoIndividuo=0; // Se blanquea el vector para el nuevo individuo
21: End For
22: End Case
23: Return Pn;
```

4.7.3.3. Método ILS

Por cada individuo de la población se genera una subpoblación mediante una cadena de Marcov, alterando una cantidad de bits basada en un porcentaje que se ingresa como parámetro del algoritmo. Luego se aplica una ILS y el individuo de mejor valor objetivo con respecto a sus vecinos es el que pasa a la nueva población. El algoritmo 19 muestra el pseudocódigo de la subrutina que realiza la ILS por cada uno de los individuos.

Algoritmo 19 Búsqueda ILS por cada individuo de la población actual

1: mejorIndividuoILS($Pa_{(i)}$,cantidadAlelos)
2: Pi = 0 ;// Población intermedia
3: individuoParaMutacion = $Pa_{(i)}$;
4: mejorIndividuoIntermedio;
5: tamPoblIntermedia = $2^{cantidadAlelos}$; // Alelos a modificar por individuo;
6: **For** (i=1;i<tamPoblacionIntermedia;i++)
7: GenerarAletaorioNoRepetido(alelosMutados,cantidadAlelos);
8: $Pi_{(k)}$ = mutarIndividuo(alelosMutados,individuoParaMutacion);
9: **End For**;
10: evaluar(Pi);
11: mejorIndividuoIntermedio = extraerMejorIndividuo(Pi);
12: **Return** mejorIndividuoIntermedio;

El algoritmo 20 muetra el pseudocódigo del mecanismo de cataclismo que actua sobre la población estancada. El algoritmo que utiliza este método se denomina QCHC-ILS.

Algoritmo 20 Mecanismo de sacudida Método ILS

1:
2: Cataclismo(Pa,metodo)
3: mejorIndividuo=mejorIndividuo(Pa) // Se extrae el mejor individo de la población actual y se lo coloca en la nueva población
4: nuevoIndividuo=0 // Nuevo individuo generado
5: **Case** metodo : metodoIls
6: alelosMutado = 0;
7: $Pn_{(0)}$ =mejorIndividuo;
8: cantidadAlelos = n*(Porcentaje/100);// determina la cantidad de alelos a cambiar;
9: **For** (i = 1;i<k;i++) // población de tamaño k
10: nuevoIndividuo =mejorIndividuoILS($Pa_{(i)}$,cantidadAlelos) ; //Se genera una busqueda local iterada
11: $Pn_{(i)}$ = nuevoIndividuo;
12: nuevoIndividuo=0; // Se blanquea el vector para el nuevo individuo
13: **End For**
14: **End Case**
15: *Return* Pn;

4.8. Conclusiones

En el presente capítulo se examinaron los conceptos metaheurísticos orientados a la resolución del problema planteado, se explicó la función objetivo que va a guiar a la metaheurística a través el espacio de búsqueda, mostrándose un ejemplo de aplicación. Se desarrollaron las variantes propuestas del algoritmo CHC (QCHC-ME, QCHC-SE, QCHC-ML, QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS), aplicando la variabilidad como mecanismo de detección de incesto y convergencia de la población. Se formuló matemáticamente el concepto de lóbulo de radiación, posición del terreno etc., junto con todo lo referido al problema de representación del terreno y reconocimiento de puntos. Se definó una red de radio y su relación con los puntos del terreno, su eficiencia de cobertura y se la representó como individuo de una población a través de un vector binario. Se dio una explicación de cómo aplicar el modelo de comunicaciones real y su relación con la matriz que será procesada por la metaheurística seleccionada. Todos los modelos usados en la formulación se acercan a la realidad, de forma que los algoritmos se enfrentarán a problemas reales y no a abstracciones simples del problema.

Parte III

Diseño de experimento y evaluación de los algoritmos propuestos

Capítulo 5

Diseño y evaluación de los algoritmos propuestos para el problema de RND

En el presente capítulo se muestra la aplicación de las diferentes versiones de CHC presentadas en el capítulo anterior para la resolución del problema de RND. Se comparan los resultados obtenidos por los algoritmos propuestos en una serie de instancias artificiales de diferente complejidad, para luego seleccionar el de mejor rendimiento que será aplicado en un caso real.

5.1. Descripción del experimento

Conforme a lo establecido en el capítulo 3 una metaheurística puede ser evaluada através de la experimentación utilizando instancias artificiales o con la aplicación en casos reales. Para el presente trabajo se tomaron estos dos puntos a fin de definir un experimento en dos etapas. En la primera etapa se establece una serie de instancias artificiales con un grado de complejidad creciente del espacio de búsqueda de tamaño 2^n. Para evaluar el desempeño de los algoritmos CHC propuestos (QCHC-RE, QCHC-TE, QCHC-ML, QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS), se toma como base los resultados obtenidos en esta etapa por los AGs, con operadores de cruce de un punto (AG-OPX), dos puntos (AG-TPX) y uniforme (AG-UX). En la segunda etapa, el algoritmo que obtuvo el mejor rendimiento es aplicado a un caso real. Para cada una de las ins-

tancias del experimento y en ambas etapas, se realizaron 30 corridas independientes para asegurar la significación estadística y se le aplicaron test estadísticos a los resultados obtenidos utilizando la herramienta SSPS 15.0. La condición de finalización para ambas etapas está dada por dos factores, a) el grado de cobertura obtenido, (100 % para la primera y un valor superior al 98, 99 % para la segunda) y b) haber alcanzado el número máximo de evaluaciones. La plataforma utilizada fue Windows 8 con procesador Intel $Core^{tm}$ i7-3630QM con 12 Gb de memoria RAM y 1 Tb de disco rígido.

5.2. Fase de selección

En esta etapa se utiliza un entorno simulado donde la superficie del terreno se considera plana y se modela mediante una matriz M de $f \times c$ y se relaciona la latitud y la longitud con los subíndices i, j de las celdas de la matriz. Los sitios candidatos para la instalación de las antenas se representan como un subconjunto de celdas pertenecientes a la matriz M y cada posible red de radio se modela mediante la activación o no de los emplazamientos candidatos. Se emplean antenas omnidireccionales de radio de una celda conforme se muetra en la Tabla 4.1 del capítulo 4. De esta manera cada antena cubre nueve celdas de la matriz del terreno T, ocho $t_{(ij)}$ más el centro $c_{(ij)}$.

Por cada matriz se varió la cantidad de sitios candidatos. La configuración de las siete instancias utilizadas se muestran en la Tabla 5.1. La columna *Instancia* presenta el nombre de cada una de las instancias, la columna *Matriz* muestra los valores que indican la cantidad de filas y columnas de cada una de las matrices utilizadas para discretizar el terreno. La columna *Tamaño* indica la cantidad de celdas de cada una de las matrices como resultado del producto de las filas por las columnas. La columna *Sitios* indica la cantidad de sitios candidatos para cada instancia. El tamaño inicial de la matriz es de 144 celdas, (12×12), y con incremento de 3 celdas por fila y 3 celdas por columna hasta llegar a una matriz de 900 celdas, (30×30). Se analiza el comportamiento de los algoritmos con los diferentes grados de complejidad, tanto en las

dimensiones del terreno como en la cantidad de sitios que componen la solución óptima.

Tabla 5.1: Configuraciones de los escenarios de cobertura

Instancia	Matriz	Tamaño	Sitios
Inst_01	12x12	144	32
Inst_02	15x15	225	50
Inst_03	18x18	324	72
Inst_04	21x21	441	98
Inst_05	24x24	576	128
Inst_06	27x27	729	162
Inst_07	30x30	900	200

5.2.1. Aplicación de los AGs a las instancias artificiales

Los resultados obtenidos por el experimento se organizan en diferentes tablas para poder evaluar el rendimiento de los algoritmos presentados. Se toma como parámetro las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones para las instancias en las que al menos dos algoritmos hayan alcanzado el 100 % de la veces el mejor valor conocido en las 30 corridas independientes. En las instancias en las que ningún algoritmo haya alcanzado la condición anterior se toma la variable valor objetivo como métrica de rendimiento. También se presenta una tabla con los resultados de los test estadísticos donde se indica si existen diferencias estadísticamente significativas entre los algoritmos. Los AGs utilizan una población de 100 individuos y 5.000 iteraciones con una probabilidad de cruce de 0,9 y de mutación de 0,001. Las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4 muestran el valor promedio de las 30 corridas de las variables de desempeño porcentaje de éxitos, tiempo en segundos y número de evaluaciones obtenidos por AG-UX, AG-OPX, AG-TPX respectivamente para las siete instancias. Para las tres Tablas la columna *Instancia* contiene la referencia de las diferentes configuraciones descriptas en la Tabla 5.1. Las columnas restantes tienen el nombre de cada algoritmo analizado y el resultado obtenido conforme a la variable analizada para cada instancia. La fila

Promedio muestra una primera aproximación sobre la eficiencia de cada algoritmo conforme a la complejidad de cada instancia. Se destacan en negrita los mejores resultados de cada uno de los algoritmos. La Tabla 5.2 muestra el porcentaje de éxitos obtenidos por los AGs. Podemos observar que AG-TPX tuvo el mayor porcentaje promedio de éxito (82 %) logrando un 100 % en 3 de las 7 instancias (Inst_01, Inst_02 e Inst_03) con respecto a AG-UX y AG-OPX. También podemos señalar que AG-UX y AG-TPX obtuvieron rendimientos muy similares, con sólo 2 de las 7 instancias con un 100 % de éxito (Inst_01 e Inst_04) y con un promedio de éxito para AG-UX de 77 % y para AG-OPX de 78 %. En resumen, todos los algoritmos competidores resolvieron la instancia Inst_01, solamente AG-TPX resolvió las instancias Inst_02 e Inst_03 y AG-UX y AG-OPX resolvieron la instancia Inst_4. Ninguno de los AGs propuestos logró resolver con el 100 % de éxitos las instancias Inst_05, Inst_06 e Inst_07 .

Tabla 5.2: Porcentaje de éxitos obtenidos por AG-UX, AG-OPX y AG-TPX

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX
Inst_01	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Inst_02	93 %	96 %	**100 %**
Inst_03	67 %	67 %	**100 %**
Inst_04	**100 %**	**100 %**	87 %
Inst_05	**90 %**	80 %	70 %
Inst_06	63 %	67 %	**87 %**
Inst_07	27 %	**33 %**	30 %
Promedio	77 %	78 %	**82 %**

La Tabla 5.3 muestra los resultados obtenidos para la variable de desempeño tiempo y se puede observar que el AG-UX resulta el de mejor rendimiento para 3 de las 7 las instancias (Inst_01, Inst_04 e Inst_05). El AG-TPX obtiene el mejor tiempo para 4 de las 7 instancias (Inst_02, Inst_03, Inst_06 y Inst_07). El AG-OPX obtiene el peor rendimiento, inclusive en las instancias donde logra el 100 % del éxito. Con respecto al promedio el AG-TPX tiene el mejor valor $(21,511)$ con respecto a AG-UX y AG-TPX.

La Tabla 5.4 muestra los valores obtenidos para la variable de desem-

Tabla 5.3: Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño tiempo por AG-UX, AG-OPX y AG-TPX

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX
Inst_01	**1,710**	2,808	1,953
Inst_02	7,448	6,959	**3,317**
Inst_03	22,799	27,924	**5,674**
Inst_04	**9,878**	17,528	19,097
Inst_05	**24,640**	29,534	32,097
Inst_06	41,985	39,845	**32,116**
Inst_07	57,080	57,705	**56,327**
Promedio	23,649	26,043	**21,511**

peño número de evaluaciones requeridas para alcanzar el óptimo. El AG-UX obtiene el mejor rendimiento con respecto al AG-OPX y el AG-TPX para la instancia Inst_01 donde todos los AGs lograron el 100 % de porcentaje de éxitos. Podemos observar que el AG-TPX logra los mejores valores para 3 de las 7 intancias (Inst_02, Inst_03 e Inst_06) y el AG-UX también consigue el mejor rendimiento para 3 de las 7 las instancias (Inst_04, Inst_05 e Inst_07). El AG-TPX obtiene el mejor rendimiento promedio para la variable de desempeño número de evaluaciones (183613) con respecto a AG-UX y AG-OPX.

Tabla 5.4: Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño número de evaluaciones por AG-UX, AG-OPX y AG-TPX

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX
Inst_01	**17023**	28217	19663
Inst_02	72433	68427	**32307**
Inst_03	200356	266550	**52793**
Inst_04	**86246**	153673	175893
Inst_05	**179930**	252993	283907
Inst_06	344616	322397	**268657**
Inst_07	**453473**	472010	452073
Promedio	193440	223467	**183613**

5.2.2. Aplicación de los CHCs propuestos a las instancias artificiales

Todos los algoritmos QCHC-* utilizan una población de 500 individuos y 2.500 iteraciones. En todos los casos el mejor individuo siempre fue conservado en la nueva población. A continuación se muestran los resultados obtenidos por los algoritmos propuestos para cada una de las variantes.

5.2.2.1. Variaciones con el operador de selección poblacional

Los operadores de selección poblacional propuestos para este trabajo son: (1) Reemplazo Elitista (RE), (2) Torneo Elitista (TE) y (3) $\mu + \lambda(ML)$. El mejor individuo generado reemplaza al peor individuo de la población actual, conformando de esa manera la nueva población.

Observando los resultados de la Tabla 5.5 podemos ver que el algortimo propuesto QCHC-RE logra el 100 % de los éxitos en 5 de las 7 instancias utilizadas. También obtiene el mayor porcentaje promedio de todos los algoritmos propuestos (90 %) seguido por el QCHC-TE que logró resolver 4 de las 7 instancias (84 %) y es el que ha obtenido un mejor desempeño en la instancia Inst_06.

Tabla 5.5: Porcentaje de éxitos obtenidos por QCHC-RE, QCH-TE y QCHC-ML

Instancia	QCHC-RE	QCH-TE	QCHC-ML
Inst_01	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Inst_02	**100 %**	**100 %**	93 %
Inst_03	**100 %**	**100 %**	93 %
Inst_04	**100 %**	**100 %**	87 %
Inst_05	**100 %**	97 %	77 %
Inst_06	90 %	80 %	30 %
Inst_07	43 %	13 %	0 %
Promedio	**90 %**	84 %	68 %

Podemos observar los resultados obtenidos en la Tabla 5.6 para la variable de desempeño tiempo en este caso y el algoritmo QCHC-RE también resulta el de mejor rendimiento para casi todas las instancias artificiales (6 de las 7 instancias). Solamente es superado por el QCHC-

Tabla 5.6: Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño tiempo por QCHC-RE, QCH-TE y QCHC-ML

Instancia	QCHC-RE	QCH-TE	QCHC-ML
Inst_01	**0,522**	1,036	2,205
Inst_02	2,286	1,848	11,788
Inst_03	**4,063**	9,1534	13,548
Inst_04	**7,412**	20,437	39,836
Inst_05	**13,830**	68,151	66,275
Inst_06	**61,753**	114,460	122,100
Inst_07	**132,013**	195,240	162,167
Promedio	**31,697**	58,618	59,703

Tabla 5.7: Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño número de evaluaciones por por QCHC-RE, QCH-TE y QCHC-ML

Instancia	QCHC-RE	QCHC-TE	QCHC-ML
Inst_01	**6550**	8100	33567
Inst_02	26733	**11800**	173500
Inst_03	**40650**	54400	171900
Inst_04	**67000**	73933	457833
Inst_05	**112133**	234633	659167
Inst_06	**416617**	697800	1070500
Inst_07	**848083**	1173900	1250000
Promedio	**216824**	322081	545210

TE en la instancia Inst_02. El Algoritmo QCHC-ML es el de peor rendimiento en todas las instancias. La Tabla 5.7 muestra los valores obtenidos para la variable de desempeño número de evaluaciones requeridas para alcanzar el óptimo. Nuevamente el algoritmo QCHC-RE obtiene el menor número de evaluaciones para casi todas las instancias artificiales (6 de las 7 instancias) con respecto a las otras versiones de QCHC. Solamente en la Inst_02, QCHC-TE obtiene el mejor valor de rendimiento. El Algoritmo QCHC-ML nuevamente obtiene los peores valores para las instancias analizadas.

5.2.2.2. Variaciones con el operador de sacudida

Los operadores de reinicio propuestos para este trabajo son: (1) Método Dinámico (MD), (2) Método de Conservación de Bits (MCB) y (3) Método con la hibridación con Búsqueda Local Iterada (ILS), por cada individuo se genera un vecindario con diferencia de un bit y se selecciona el mejor individuo del vecindario.

Para el algoritmo QCHC-MCB se utilizó una probabilidad de mutación de 0,05 y se definió como porcentaje de conservación el 95 % de los individuos, variando solamente el 5 % del total de los individuos.

Podemos observar en la Tabla 5.8 que el algortimo propuesto QCHC-ILS es el único que logra el 100 % de los éxitos en todas las instancias. Luego los algoritmos QCHC-MD y QCHC-MCB resolvieron 2 de las 7 instancias (Inst_01 e Inst_02), siendo éstas las de menor complejidad.

Tabla 5.8: Porcentaje de éxitos obtenidos por QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS

Instancia	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Inst_02	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Inst_03	97 %	90 %	**100 %**
Inst_04	90 %	90 %	**100 %**
Inst_05	73 %	93 %	**100 %**
Inst_06	80 %	93 %	**100 %**
Inst_07	63 %	87 %	**100 %**
Promedio	86 %	93 %	**100 %**

Podemos observar los resultados obtenidos en la Tabla 5.9 para la variable de desempeño tiempo en este caso y el algoritmo QCHC-ILS también resulta el de mejor rendimiento para todas las instancias artificiales. Cabe destacar que el QCHC-ILS es apenas superior en rendimiento que el QCHC-MD en las instancias de menor complejidad (Inst_01 e Inst_02)

Tabla 5.9: Valores promedio para la variable de desempeño tiempo obtenidos por QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS

Instancia	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	0,528	1,020	**0,405**
Inst_02	0,955	7,639	**0,754**
Inst_03	1,290	21,541	**1,127**
Inst_04	18,201	28,643	**1,806**
Inst_05	48,108	22,832	**2,527**
Inst_06	39,150	41,168	**3,342**
Inst_07	74,926	72,895	**4,569**
Promedio	26,165	27,962	**2,076**

La Tabla 5.10 muestra los valores obtenidos para la variable de desempeño número de evaluaciones requeridas para alcanzar el óptimo. El algoritmos QCHC-MD obtiene los mejores valores en 3 de las 7 instancias (Inst_01, Inst_02 e Inst_03) con respecto al QCHC-MCB y el QCHC-ILS. El algoritmo QCHC-ILS obtiene el menor número de evaluaciones en 4 de las 7 instancias (Inst_04, Inst_05, Inst_06 e Inst_07).

Tabla 5.10: Valores promedio para la variable de desempeño número de evaluaciones obtenidos por QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS

Instancia	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	**5283**	16167	6417
Inst_02	**8850**	107733	10550
Inst_03	**10500**	272933	13183
Inst_04	140550	341683	**18333**
Inst_05	348750	241833	**22100**
Inst_06	270033	359483	**25150**
Inst_07	476783	547217	**28217**
Promedio	180107	269579	**17707**

5.2.3. Comparativas entre los AGs y los QCHCs en las instancias artificiales

Para analizar el desempeño de los algoritmos CHC propuestos (QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS) se los compara con los AGs con operadores de cruce de un punto (AG-OPX), dos puntos (AG-TPX) y uniforme (AG-UX). Se toma como parámetro las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones para las instancias en las que al menos dos algoritmos hayan alcanzado el 100 % de las veces el mejor valor conocido en las 30 corridas independientes. También se presenta una tabla con los resultados de los test estadísticos donde se indica si existen diferencias estadísticamente significativas entre los algoritmos. Para todas las pruebas realizadas se usó un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Por la naturaleza del experimento los valores obtenidos cumplen la condición de independencia, se aplica el test de Kolmogorov-Smirnov para determinar si los datos se ajustan a una distribución normal y el test de Levene para verificar si los datos tienen homocedasticidad.

En la Tabla 5.11 se muestra el porcentaje de éxitos obtenido por cada uno de los algoritmos en las siete instancias. Los valores obtenidos indican que en una proporción de 30 corridas independientes la cantidad de veces que se llegó en cada instancia al mejor valor objetivo conocido, para este caso es el valor 1 (uno). La fila *Promedio* muestra una primera aproximación sobre la eficiencia de cada algoritmo conforme a la complejidad de cada instancia. Podemos observar que el algoritmo propuesto QCHC-ILS es el único que logra el 100 % de los éxitos en todas las instancias seguido por el QCHC-RE que logró resolver 5 de las 7 instancias. En cuanto a los AGs, podemos observar que AG-TPX tuvo el mayor porcentaje (82 %) resolviendo 3 de las 7 instancias con el 100 % de éxito con respecto a AG-UX y AG-OPX. Estos últimos tuvieron rendimientos similares, con solo 2 de las 7 instancias con 100 % y un promedio para AG-UX de 77 % y para AG-OPX de 73 %.

Tabla 5.11: Porcentaje de éxitos obtenidos por los algoritmos

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX	QCHC-RE	QCH-TE	QCHC-ML	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Inst_02	93 %	96 %	**100 %**	**100 %**	**100 %**	93 %	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Inst_03	67 %	67 %	**100 %**	**100 %**	**100 %**	93 %	97 %	90 %	**100 %**
Inst_04	**100 %**	**100 %**	87 %	**100 %**	**100 %**	87 %	90 %	90 %	**100 %**
Inst_05	90 %	80 %	70 %	**100 %**	97 %	77 %	73 %	93 %	**100 %**
Inst_06	63 %	67 %	87 %	90 %	80 %	30 %	80 %	93 %	**100 %**
Inst_07	27 %	**33 %**	30	43 %	13 %	0 %	86 %	93 %	**100 %**
Promedio	77 %	78 %	82	90 %	84 %	68 %	86 %	93 %	**100 %**

La figura 5.1 muestra la cantidad de instancias resueltas por cada uno de los algoritmos con el 100 % de éxito.

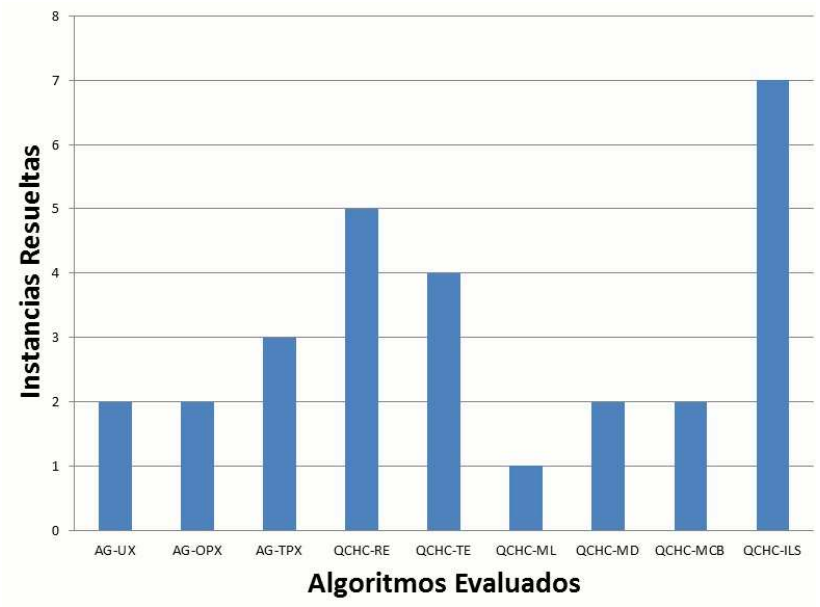


Figura 5.1: Instancias resueltas por los algoritmos propuestos

La Tabla 5.12 muestra un resumen de los algorimtos que lograron el 100 % de los éxitos y a los que se les aplican los test estadísticos a las variables tiempo y número de evaluaciones para establecer si existen diferencias estadísticamente significativas. Se utiliza la sigla N/A a los valores que no cumplen esta condición.

Las Tablas 5.12 y 5.13 muestran los valores promedio obtenidos por cada uno de los algoritmos evaluados en las instancias que lograron el 100 % de éxitos, para las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones respectivamente. Para ambas tablas la columna *Instancia* indica las configuraciones del terreno, las columnas AG-UX, AG-OPX,

Tabla 5.12: Instancias con el 100 % de éxitos logrados por cada algoritmo

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX	QCHC-RE	QCH-TE	QCHC-ML	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Inst_02	N/A	N/A	✓	✓	✓	N/A	✓	✓	✓
Inst_03	N/A	N/A	✓	✓	✓	N/A	N/A	N/A	✓
Inst_04	✓	✓	N/A	✓	✓	N/A	N/A	N/A	✓
Inst_05	N/A	N/A	N/A	✓	N/A	N/A	N/A	N/A	✓
Inst_06	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	✓
Inst_07	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	✓

AG-TPX, QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS muestran los valores promedio obtenidos por cada uno de los algoritmos evaluados en las instancias que lograron el 100 % de éxitos. Podemos observar en la Tabla 5.13 el algoritmo QCHC-ILS obtiene los mejores resultados para la variable de desempeño tiempo en todas las instancias con respecto a los otros algoritmos.

Tabla 5.13: Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño tiempo

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX	QCHC-RE	QCH-TE	QCHC-ML	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	1,710	2,808	1,953	0,522	1,036	2,205	0,528	1,020	**0,405**
Inst_02	N/A	N/A	3,317	2,286	1,848	N/A	0,955	7,639	**0,754**
Inst_03	N/A	N/A	5,674	4,063	9,1534	N/A	N/A	N/A	**1,127**
Inst_04	9,878	17,528	N/A	7,412	20,437	N/A	N/A	N/A	**1,806**
Inst_05	N/A	N/A	N/A	13,830	N/A	N/A	N/A	N/A	**2,527**

La Tabla 5.14 muestra los valores obtenidos para la variable de desempeño número de evaluaciones requeridas para alcanzar el óptimo. El algoritmo QCHC-MD obtiene el mejor rendimiento en 2 de las 5 instancias (Inst_01 e Inst_02). El algoritmo QCHC-ILS es el de mejor rendimiento en 3 de las 5 instancias (Inst_03, Inst_04 e Inst_05) con respecto a los AGs y las otras versiones de QCHC.

Tabla 5.14: Valores promedio obtenidos por cada algoritmo para la variable de desempeño número de evaluaciones

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX	QCHC-RE	QCH-TE	QCHC-ML	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	17023	28217	19663	6550	8100	33567	**5283**	16167	6417
Inst_02	N/A	N/A	32307	26733	11800	N/A	**8850**	107733	10550
Inst_03	N/A	N/A	52793	40650	54400	N/A	N/A	N/A	**13183**
Inst_04	86247	153673	N/A	67000	73933	N/A	N/A	N/A	**18333**
Inst_05	N/A	N/A	N/A	112133	N/A	N/A	N/A	N/A	**22100**

A continuación se aplican test estadísticos para analizar las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones. Como se explicó en el Capítulo 3 se debe establecer qué tipo de test será aplicado, ya sea, paramétrico o no paramétrico. Para la aplicación de un test paramétrico los datos deben cumplir las condiciones de independencia, normalidad y homocedasticidad. La independencia se cumple ya que las ejecuciones de las instancias para cada uno de los algoritmos son independientes entre sí. Luego se aplica el test Kolmogorov-Smirnov junto con el análisis de homocedasticidad aplicando el test de Levene. Todos los test utilizados obtienen el p-valor asociado el cual representa desigualdad con respecto a la forma normal. Para todas las pruebas realizadas se usa un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Los p-valores que superen el nivel de significancia cumplen la condición de normalidad. La Tabla 5.15 muestra los resultados del p-valor obtenido para la variable de desempeño tiempo y el símbolo $*$ indica que los resultados no cumplen con la condición de normalidad. Podemos observar que los valores obtenidos de la instancia $Inst_01$ e $Inst_02$ para QCHC_ILS supera el umbral de significancia de $0,05$.

Tabla 5.15: Test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable de desempeño tiempo

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX	QCHC-RE	QCHC-TE	QCHC-ML	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	(0,200)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	(0,110)
Inst_02	N/A	N/A	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	N/A	(0,200)	$*$(0,000)	(0,200)
Inst_03	N/A	N/A	$*$(0,005)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	N/A	N/A	*N/A*	$*$(0,005)
Inst_04	$*$(0,001)	$*$(0,006)	N/A	$*$(0,000)	$*$(0,000)	N/A	N/A	N/A	$*$(0,000)
Inst_05	N/A	N/A	N/A	$*$(0,000)	N/A	N/A	N/A	N/A	$*$(0,000)

La Tabla 5.16 muestra los resultados de la condición de homocedasticidad para la variable de desempeño tiempo. El símbolo $**$ indica que los

resultados no cumplen con la condición de homocedasticidad y el valor entre paréntesis representa el p-valor en cada caso.

Tabla 5.16: Test de Levene para la variable de desempeño tiempo

Instancia	Tiempo
Inst_01	$**$*(0,000)*
Inst_02	$**$*(0,000)*
Inst_03	$**$*(0,000)*
Inst_04	$**$*(0,000)*
Inst_05	$**$*(0,000)*

La Tabla 5.17 muestra los resultados para del test Kolmogorov-Smirnov para la variable de desempeño número de evaluaciones. El símbolo $*$ indica que los resultados no cumplen con la condición de normalidad y el valor a continuación representa el p-valor en cada caso.

Tabla 5.17: Test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para la variable de desempeño número de evaluaciones

Instancia	AG-UX	AG-OPX	AG-TPX	QCHC-RE	QCHC-TE	QCHC-ML	QCHC-MD	QCHC-MCB	QCHC-ILS
Inst_01	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$ (0,021)
Inst_02	N/A	$*$(0,000)	N/A	$*$(0,000)	$*$(0,000)	N/A	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,108)
Inst_03	N/A	$*$ (0,000)	N/A	$*$(0,000)	$*$(0,000)	N/A	N/A	N/A	(0,200)
Inst_04	$*$(0,000)	$*$(0,006)	N/A	$*$(0,000)	$*$(0,000)	N/A	N/A	N/A	$*$(0,006)
Inst_05	N/A	N/A	N/A	$*$(0,000)	N/A	N/A	N/A	N/A	$*$(0,000)

La Tabla 5.18 muestra los resultados de la condición de homocedasticidad para la variable de desempeño evaluaciones. El símbolo $**$ indica que los resultados no cumplen con la condición de homocedasticidad y el valor a continuación representa el p-valor en cada caso.

Tabla 5.18: Test de Levene para la variable de desempeño número de evaluaciones

Instancia	Evaluaciones
Inst_01	$* *$(0,000)
Inst_02	$* *$ (0,000)
Inst_03	$* *$(0,000)
Inst_04	$* *$ (0,000)
Inst_05	$* *$ (0,000)

Ninguna de las instancias cumple la condición de normalidad y homocedasticidad, por lo tanto se aplica el test no paramétrico de Kruskal-

Wallis para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los resultados de más de dos algoritmos. Luego el test de Tukey que indica entre qué algoritmos hay diferencias estadísticamente significativa. Para el caso de que se comparen los resultados de dos algoritmos para detectar diferencias estadísticamente significativas se aplica el test de Wilcoxon.

Las Tablas 5.19 y 5.20 muestran los resultados obtenidos por los test estadísticos para las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones respectivamente. Las columnas $K-W$ $(Kruskal-Wallis)$ y W $(Wilcoxon)$ representan los resultados obtenidos por cada uno de los test estadísticos. Se utiliza el símbolo $(+)$ si existen diferencias, el símbolo $(-)$ en caso contrario. La columna *Resultados*, muestra de forma ordenada de mejor a peor rendimiento los resultados de los algoritmos donde se detectan diferencias estadísticamente significativas. El símbolo ✓ identifica los resultados de las instancias donde se aplica el test de Tukey. El símbolo $\rightarrow$ indica que el algoritmo que se encuentra a la izquierda es el de mejor rendimiento por sobre el resto que se ubica a la derecha y encerrados entre ().

Tabla 5.19: Resultados de test de Kruskal-Wallis, Wilcoxon y Tukey aplicado a los resultados de los algoritmos para la variable de desempeño tiempo

Instancia	K-W	W	Resultados
Inst_01	(+)		(✓) QCHC-ILS →(QCHC-MD, QCHC-RE, QCHC-MCB, QCH-TE, AG-UX, AG-TPX,AG-OPX)
Inst_02	(+)		(✓)QCHC-ILS →(QCHC-MD, QCH-TE, QCHC-RE, AG-TPX)
Inst_03	(+)		(✓) QCHC-ILS →(QCHC-RE, AG-TPX, QCH-TE)
Inst_04	(+)		(✓) QCHC-ILS →(AG-UX, QCHC-RE, AG-OPX, QCH-TE, AG-UX, AG-OPX)
Inst_05		(+)	QCHC-ILS →(AG-UX, QCHC-RE)

Podemos afirmar con un 95 % de confianza que el algoritmo QCHC-ILS es el algoritmo de mejor rendimiento para la variable de desempeño tiempo para todas las instancias artificiales de la fase de selección.

Tabla 5.20: Resultados de test de Kruskal-Wallis, Wilcoxon y Tukey aplicado a los resultados de los algoritmos para la variable de desempeño número de evaluaciones

Instancia	K-W	W	Resultados
Inst_01	(+)		(✓) QCHC-MD →(QCHC-ILS, QCHC-RE, QCH-TE, QCHC-MCB, AG-UX, AG-TPX, AG-OPX, QCHC-ML)
Inst_02	(+)		(✓) QCHC-MD →(QCHC-ILS, QCH-TE, QCHC-RE, AG-TPX, QCHC-MCB)
Inst_03	(+)		(✓)QCHC-ILS →(QCHC-RE, AG-TPX, QCH-TE)
Inst_04	(+)		(✓) QCHC-ILS →(QCHC-RE, AG-UX, QCH-TE, AG-OPX)
Inst_05		(+)	QCHC-ILS →(QCHC-RE)

Podemos observar en la Tabla 5.20 que el algoritmo QCHC-MD obtiene el mejor rendimiento en 2 de las 5 instancias (Inst_01 e Inst_02) con un 95 % de confianza para la variable de desempeño número de evaluaciones. El algoritmo QCHC-ILS es el de mejor desempeño en 3 de las 5 instancias (Inst_03, Inst_04 e Inst_05) con un 95 % de confianza. Además, para las instancias donde el QCHC-MD obtiene el mejor rendimiento, el QCHC-ILS se ubica como el segundo algoritmo de mejor rendimiento con respecto al resto de los algoritmos competidores.

El algoritmo híbrido QCHC-ILS es el único algoritmo que alcanza el óptimo en todas las instancias propuestas con el 100 % de efectividad. Esto significa que esta versión del algoritmo CHC es una mejora efectiva con respecto a las otras versiones del QCHC y AGs.

Finalizada la etapa de selección de los algoritmos se procede a la aplicación del algoritmo QCHC-ILS a un caso de la vida real.

5.2.4. Aplicación de QCHC-ILS a un caso real

El proceso de producción de petróleo (extracción, transporte y venta), involucra una amplia serie de controles en cada una de sus etapas. Por lo tanto el monitoreo y control del proceso es fundamental para cualquier compañía petrolera. Los sistemas SCADA permiten la gestión y control de cualquier sistema local o remoto gracias a una interfaz gráfica HMI. Esto hace que el uso de sistemas SCADA, con pantallas HMI, ubicadas en puntos estratégicos, sea de vital importancia para una compañía petrolera. Para que el SCADA funcione se debe alimentar el sistema con

señales de sensores ubicados a kilómetros de distancia. Además con este control se supervisa de forma automática los posibles puntos de falla que pueden provocar derrames que implican pérdidas y un impacto ambiental. Para lograr la comunicación entre tanta cantidad de dispositivos (miles de pozos petroleros por yacimiento) se necesita una red de radio con una cobertura eficiente.

En la etapa de aplicación a un caso real, los aspectos de la realidad que se interrelacionan con la metaheurística para la resolver el problema son: (i) modelado del terreno para ser tratado computacionalmente y la base de datos de alturas, (ii) el modelo de cálculo de enlace que determina la iluminación o no de un punto del terreno, (iii) el equipamiento que va a dar el servicio, la configuración de las antenas y los cables utilizados para su instalación. La metaheurística aplica la función objetivo a lo que denominaremos la matriz heurística para determinar el valor objetivo de cada individuo de la población (iv).
A continuación se describen cada uno de estos aspectos:
(i) Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son MDT. Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipo. Para discretizar la superficie del terreno se utiliza nuevamente una matriz M (Matriz del Terreno) de $f \times c$, donde se relacionan la latitud y la longitud con los subíndices i, j de las celdas de la matriz. La altura de cada punto a nivel del mar se almacena en las celdas de la matriz. Esta forma de discretización responde al modelo raster utilizado en los SIG y ha sido utilizada en [52] para resolver el problema de RND. Las alturas son tomadas de las bases de datos generadas por la misión SRTM, disponibles en internet. El terreno seleccionado para el experimento se encuentra dentro de las coordenadas -47^0S y -69^0O a-46^0S y -68^0O y las alturas fueron tomadas del archivo SMTR3 (un punto cada 90 m) denominado S47W069.hgt. El tamaño de la matriz M resultante de la zona es de 1201 filas y 1201 columnas, abarcando una superficie de $108Km^2$ aproximadamente. La figura 5.2 muestra la representación gráfica del terreno generada por el archivo propuesto y la configuración de una parte de la matriz M con las alturas correspondientes utilizando

el modelo de raster.

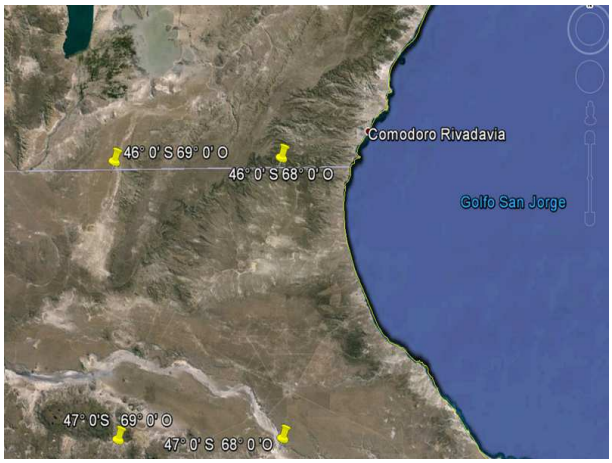


Figura 5.2: Representación gráfica del terreno del caso real.

(ii) El modelo de cálculo de enlace seleccionado es Longley-Rice, o ITM, tiene como datos de entrada los parámetros de sistema (frecuencia, distancia, la altura de las antenas y su polarización, vertical / horizontal), los parámetros del entorno (coeficiente de irregularidad del terreno, refractividad del terreno, clima, etc.). Para los parámetros del entorno se tomaron los valores relacionados con la zona relevada y que se encuentran en tablas brindadas por el modelo. La Tabla 5.21 muestra los valores seleccionados para el caso real.

Tabla 5.21: Parámetros de entrada del modelo Longley - Rice

Parámetros del sistema	
Frecuencia	900 Mhz
Distancia	30 Km máxima
Altura de antenas	Base 30m Remoto 6m
Polarización	Vertical
Parámetros del entorno	
Variable de terreno irregular	90 m
Constantes eléctricas del terreno	15 Ω
Refactividad de la superficie	0,005 (S/m)
Clima	301 Ns

(iii) Para definir el equipamiento se toma como referencia el radio utilizado por las principales operadoras de la zona para sus sistemas de

telemetría. Las antenas para las bases se configuraron con una cobertura de $18Km^2$ a una altura promedio de 30m siendo del tipo omnidireccional con una ganancia de 6.5 dBi. Los puntos remotos se configuraron a 6 m de altura con una antena de tipo yagui de 7 elementos con una ganancia de 10.5 dBi. Los equipos utilizados son del tipo Inet II de 900 Mhz, ajustados a una potencia de 23 dBm utilizando un cable de tipo Eliax LDF4 con una atenuación de 6,85db/100 m a 900 Mhz. La Tabla 5.22 muestra el detalle de las instalaciones y los datos que son utilizados en el modelo real.

Tabla 5.22: Configuración del equipamiento utilizado

Elemento	Características
Radio	Modelo: Inet II Potencia: 23 dBm Frecuencia: 915 Mhz
Antena Base	Tipo: Omni Modelo:YH-ACW10 Ganancia: 6.5 dBi Altura : 30 Mts Frecuencia: 915 Mhz Polarización: Vertical
Antena Remoto	Tipo: yagui Modelo: NYS07B23 Ganancia: 10.5 dbi Altura: 6 Mts Frecuencia: 915 Mhz Polarización: Vertical
Cable	Tipo: Heliax LDF4 $\frac{1}{2}$ Pérdida: 6.85 dB/100

(iv) Por cada punto de los perfiles que conforma la iluminación omnidireccional se registra la atenuación de referencia otorgada por el modelo Longly-Rice generando un perfil de iluminación basado en lineas rectas. Conforme a lo establecido en ecuación 4.6 se aplica la función de asignación de la siguiente manera:

- Por cada punto donde la atenuación de referencia es mayor al umbral de recepción de $-80(dBm)$ se coloca un valor 1 en la matriz

heurística M.

- Si el punto no supera el umbral se coloca un 0.
- Si el punto es iluminado por más de una antena se coloca un -1.

A dicha matriz se le aplica la función objetivo definida en el Capítulo 4 en la ecuación 4.13 para determinar la calidad de cada individuo candidato como solución del problema. Estos valores se corresponden con los puntos que superen el umbral de recepción en la matriz del terreno T y se aplican a la matriz heurística M. La Figura 5.3 muestra el proceso de aplicación de la metaheurística.

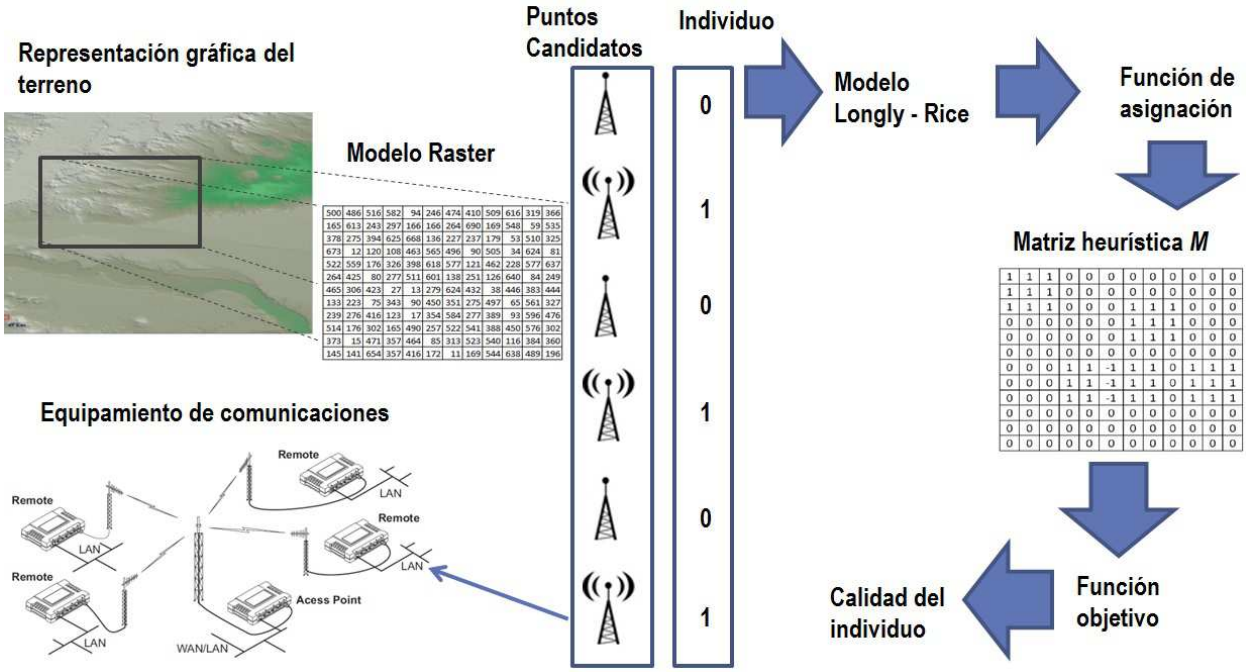


Figura 5.3: Proceso de aplicación de las metaheurísticas a un caso real.

Para verificar la mejor calibración del algoritmo se generaron tres instancias QCHC_RE_ILS_P200, QCHC_RE_ILS_P500 y QCHC_RE_ILS_P800 con diferentes cantidades de individuos, 200, 500 y 800 respectivamente. La Tabla 5.23 muestra los valores promedios obtenidos de las 30 corridas independientes para las variables de desempeño Valor Objetivo, Tiempo en Segundos (s), Evaluaciones y Porcentaje de Éxitos. Todos los algoritmos utilizaron como condición de fin 500.000 evaluaciones o un porcentaje de cobertura del 98.99 % (esto es un parámetro de cobertura aceptado en la vida real).

Tabla 5.23: Valores promedio obtenidos para las variables de desempeño analizadas.

Instancias	Valor Objetivo	Tiempo (s)	Evaluaciones	% Éxitos
QCHC_ILS_P200	0,990677415	1220,06	60306	90 %
QCHC_ILS_P500	0,991575267	**583,08**	**26466**	**100 %**
QCHC_ILS_P600	0,991575267	1159,76	39197	100 %

Se aplicaron test estadísticos para determinar si los valores obtenidos cumplen una distribución normal (normalidad y homocedasticidad) y si existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos. Para todas las pruebas realizadas se usó un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. La Tabla 5.24 muestra los resultados obtenidos para las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones. La columna *Algoritmos* se subdivide en tres columnas indicando el nombre de cada uno de los algoritmos, caracterizados por la población inicial. Las columnas *Tiempo* y *Evaluaciones* muestran el valor del estadístico.

Tabla 5.24: Test de Kolgomorov-Smirnov para las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones

	Algoritmos					
	QCHC_ILS_P200		QCHC_ILS_P500		QCHC_ILS_P800	
	Tiempo	Evaluaciones	Tiempo	Evaluaciones	Tiempo	Evaluaciones
INST_REAL	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)	$*$(0,000)

La Tabla 5.25 muestra los valores del estadístico de Levene para las variables de desempeño *Tiempo* y *Evaluaciones*.

Tabla 5.25: Test de Levene para las variables de desempeño tiempo y número de evaluaciones

	Tiempo	Evaluaciones
INST_REAL	$**$(0,000)	$**$(0,000)

Los test de Kolgomorov-Smirnov y Levene determinaron que los valores obtenidos no responden a una distribución normal. Por lo que se aplicó el test no paramétrico de Kruskal-Wallis para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas. El resultado del test determinó que no hay deferencias estadísticamente significativas entre los algoritmos propuestos.

5.2.5. Conclusiones

En el presente capítulo se muestran seis versiones CHC denominadas QCHC-RE, QCHC-TE, QCHC-ML, QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS. Las tres primeras versiones son variaciones del mecanismo de selección poblacional y las tres restantes varían el operador de sacudida. Se utilizó un nuevo mecanismo de prevención de incesto basado en la variabilidad promedio entre los individuos y una nueva forma de detección de la convergencia basada en la variabilidad de población. El mecanismo propuesto para detectar la convergencia prematura brinda una idea general del comportamiento de toda la población con un menor costo computacional. Además se aplicó una función objetivo orientada a la eficiencia de la cobertura de señal en el terreno. Para obtener un parámetro de rendimiento se utilizaron AGs con operadores de corte de un punto (AG-OPX), de dos puntos (AG-TPX) y de cruce uniforme (AG-UX). Los resultados obtenidos por el experimento se organizaron en una tabla y se tomó como parámetro la variable de desempeño porcentaje de éxitos obtenidos. La misma indica la cantidad de veces que el algoritmo alcanzó el mejor valor conocido en las 30 corridas independientes. En la fase de selección el algoritmo híbrido QCHC-ILS es el único algoritmo que alcanza el óptimo en todas las instancias propuestas con el 100 % de efectividad. Además se comprobó mediante estudios estadísticos (Análisis de Kruskall-Wallis) que existen diferencias estadísticamente significativas en favor del QCHC-ILS para la variable de desempeño tiempo para todas las instancias artificiales. Con respecto a la variable de desempeño número de evaluaciones el algoritmo QCHC-ILS presenta diferencias estadísticamente significativas en 3 de las 5 instancias (Inst_03, Inst_04 e Inst_05). Esto significa que esta versión del algoritmo CHC es una mejora efectiva con respecto a las otras versiones del QCHC en las instancias de mayor complejidad. Finalizada la etapa de selección de los algoritmos se procede a la aplicación del algoritmo QCHC-ILS a un caso de la vida real. Para verificar la mejor calibración del algoritmo se generaron tres instancias QCHC_ILS_P200, QCHC_ILS_P500 y QCHC_ILS_P800 con poblaciones de 200, 500 y 800 individuos respectivamente. Los re-

sultados obtenidos se organizaron en diferentes tablas que muestran los valores promedios de las 30 corridas independientes para las variables de desempeño Valor Objetivo, Tiempo en Segundos (s), Evaluaciones y Porcentaje de Éxitos. Todos los algoritmos utilizaron como condición de fin 500.000 evaluaciones o un porcentaje de cobertura superior al 98.99 %. Se aplicaron test estadísticos y el resultado determinó que no hay deferencias estadísticamente significativas entre los algoritmos propuestos. Pero el QCHC_ILS_P500 obtuvo el mejor rendimiento para las variables de desempeño cantidad de evaluaciones.

Parte IV

Conclusiones y trabajos futuros

Capítulo 6

Conclusiones

Un medio de comunicación inalámbrico se compone básicamente de un emisor y un receptor, y el vínculo entre ambos puntos se realiza utilizando radio frecuencia basada en ondas hertzianas y el medio que transporta estas ondas es el aire. Para que este fenómeno pueda ser posible, el emisor genera una señal que debe llegar al receptor con un nivel adecuado para que éste pueda recibir correctamente el mensaje. Las ondas, al desplazarse por el espacio libre, están sujetas a ruidos (atenuación, reflexión, refracción y difracción) provocados por fenómenos atmosféricos y obstáculos. Como consecuencia, se generan pérdidas en el nivel de la señal emitida haciendo que muchas veces el receptor no sea capaz de decodificar el mensaje.

El modelo de diseño de redes de radio propuesto por [74] plantea una arquitectura de diseño en capas y fue pensado para redes de celulares. Para este caso en particular, se propone trabajar en la capa de selección de sitios y diseño de la red de radio extendiendo su aplicación a cualquier servicio inalámbrico a través de un modelo de propagación adaptable. Para resolver el problema de RND aplicado al servicio de telemetría en la industria petrolera se aplica una serie de versiones del algoritmo genético no convencional denominado CHC. El algoritmo CHC es un algoritmo genético que combina una estrategia de selección conservativa que preserva los mejores individuos encontrados y para salir de un estancamiento u óptimo local, se produce un reinicio de la población mediante un cataclismo. Las versiones de CHC propuestas difieren del CHC canónico en el uso de la variabilidad genética para detectar el estancamiento de la po-

blación y medir el nivel de diversidad de los individuos como mecanismo de detección de incesto, por lo que se lo denominó QCHC (Quasi CHC). Se proponen versiones diferenciadas por el mecanismo de selección poblacional (QCHC-RE, QCHC-TE, QCHC-ML) y la forma de realizar el cataclismo (QCHC-MD, QCHC-MCB, QCHC-ILS) para salir del estancamiento. En particular el QCHC-ILS es una hibridación que utiliza como método de cataclismo una búsqueda local iterada (ILS). Se emplea una función objetivo propuesta en esta tesis basada en la eficiencia de iluminación de la señal. En todas las versiones se utiliza la variabilidad genética de la población como parámetro de convergencia y detección de incesto y se propone el uso de la variabilidad del mejor individuo como mecanismo de sacudida. Esto permite generar poblaciones dinámicas conforme a las soluciones más promisorias generando diferentes espacios de búsqueda.

En la etapa de selección se generaron escenarios simulados con un tamaño del espacio de búsqueda 2^n con un total de siete instancias. La primer instancia fue resuelta por todos los competidores, pero a medida que se incrementa la complejidad hay algoritmos que no pudieron llegar al óptimo en las 30 corridas. El algoritmo QCHC-ILS es el único algoritmo que alcanza el óptimo en todas las instancias propuestas con el 100 % de efectividad. Se aplicaron test estadísticos para determinar si existen diferenicas estadísticamente significativas en el rendimiento de los algoritmos que podían resolver con éxito las diferentes instancias. En las dos primeras instancias la variante propuesta en esta tesis denomindada algorimto QCHC-MD se presenta como la mejor alternativa con un 95 % de confianza. Para las tres instancias mas complejas el algoritmo QCHC-ILS es mejor que las otras versiones propuestas con un 95 % de confianza.

En la etapa de aplicación a un caso real se hizo un estudio sobre las industrias que podrían hacer uso de esta herramienta siendo la petrolera la de mayor demanda de cobertura de comunicaciones. Esto surge por la necesidad de mantener el control y supervisar de forma automática el proceso de producción de petróleo a través de los sistemas SCADA. Para que el SCADA funcione, se debe alimentar el sistema con señales de

sensores ubicados a kilómetros de distancia. Los oleoductos atraviesan grandes distancias con diferentes geografías y los dispositivos de extracción se encuentran diseminados sobre grandes extensiones de terreno. Además, con este control se supervisa de forma automática los posibles puntos de falla que pueden provocar derrames que impliquen pérdidas e impactos ambientales. Para lograr la comunicación entre tanta cantidad de dispositivos (miles de pozos petroleros por yacimiento) se necesita una red de radio con una cobertura eficiente

Se seleccionó el área donde actualmente están trabajando las principales operadoras de la zona, se generó un modelo de alturas utilizando la cartografía basada en los archivos generados por la misión topográfica SRTM. Para generar predicciones confiables se utilizó un modelo que permita establecer la veracidad de sus predicciones a través de valores estadísticos y que esté debidamente probado en su uso. Se aplicó el modelo de Longley-Rice, o ITM, para los parámetros del entorno se tomaron los valores relacionados con la zona relevada y que se encuentran en tablas brindadas por el modelo. El equipamiento utilizado se toma como referencia el radio utilizado por las principales operadoras de la zona para sus sistemas de telemetría. Las antenas para las bases se configuraron con una cobertura de $18Km^2$ a una altura promedio de 30 mts siendo del tipo omnidireccional con una ganancia de 6.5 dBi. Los puntos remotos se configuraron a 6 mts de altura con una antena de tipo Yagui de 7 elementos con una ganancia de 10.5 dBi. Los equipos utilizados son del tipo Inet II de 900 Mhz, ajustados a una potencia de 23 dBm utilizando un cable de tipo Eliax LDF4 con una atenuación de 6,85$db/100m$ a 900 Mhz.

Se realizó una comparación con diferentes valores de población a fin de determinar cuál es valor para lograr el mejor rendimiento. Podemos concluir que en la instancia real el algoritmo QCHC-ILS logra el grado de cobertura requerido con el 100 % de éxito con dos parametrizaciones diferentes. En sintesis en este trabajo de tesis se han generado los siguientes aportes:

- Un conjunto de instancias artificiales.

- Una nueva función de evaluación (función objetivo) basada en la eficiencia de cobertura.
- Variantes del algoritmo CHC con respecto a su mecanismo de selección (QCHC-RE, QCHC-TE y QCHC-ML).
- Variantes del algoritmo CHC con respecto al mecanismo de sacudida (QCHC-MD, QCHC-MCB y QCHC-ILS).
- Una instancia real ubicada en la zona norte de la provincia de Santa Cruz.

Estos resultados permiten seguir avanzando en el estudio y aplicación de este algoritmo a diferentes instancias reales. En trabajos futuros se podrá abordar el mismo escenario pero con un modelo de cálculo de cobertura más específico, diferentes formas del lóbulo de radiación o la paralelización de los algoritmos. También se pueden abordar como un modelo de capas una salida que permita abordar el problema de asignación de frecuencias y de esta manera generar un sistema completo de cálculo automatizado basado en metaheurísticas.

Bibliografía

[1] A.B. Abdullah and L.Z. Cai. Improving intrusion detection using genetic linear discriminant analysis. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 3(1):34–39, 2015.

[2] E. Alba and F. Chicano. On the behavior of parallel genetic algorithms for optimal placement of antennae in telecommunications. *International Journal of Foundations of Computer Science*, 16(02):343–359, 2005.

[3] M. Algebary. Particle swarm optimization based approach for location area planning in cellular networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 3(2):46–51, 2015.

[4] H.R. Anderson and J.P McGeehan. Optimizing Microcell Base Station Locations Using Simulated Annealing Techniques. In *Proceedings 44th IEEE Conference on Vehicular Technology*, pages 858–862. Morgan Kaufmann, 1994.

[5] F. Barceló and J. Sánchez. Probability distribution of the interarrival time to cellular telephony channels. In *Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th*, volume 1, pages 762–766. IEEE, 1999.

[6] R. Butts. *William Whewell's theory of scientific method*. University of Pittsburgh Pre, 1969.

[7] P. Calégari, P. Kuonen, F. Guidec, and D. Wagner. A genetic approach to radio network optimization for mobile systems. In *VTC'97*, volume 2, pages 755–759, 1997.

[8] P. Callegari, F. Guidec, P. Kuonen, and D. Kobler. Parallel island-based genetic algorithm for radio network design. In *Journal of Parallel and Distributed Computing (47)*, pages 86–90, 1997.

[9] G. Celli, E. Costamagna, and A. Fanni. Genetic algorithms for telecommunication network optimization. In *Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century., IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1227–1232. IEEE, 1995.

[10] V. Černỳ. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of optimization theory and applications*, 45(1):41–51, 1985.

[11] D. Corne, M.J Oates, and G.D Smith. *Telecommunications optimization: heuristics and adaptive techniques.* John Wiley, 2000.

[12] J. Derrac, S. García, D. Molina, and F. Herrera. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1):3–18, 2011.

[13] M. Dorigo, M. Birattari, C. Blum, C. Maurice, T. Stützle, and A. Winfield. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence: 6th International Conference, ANTS 2008, Brussels, Belgium, September 22-24, 2008, Proceedings*, volume 5217. Springer, 2008.

[14] H. Durney, C. Castro, and R. Ortiz. Diseño e implementación de radioenlaces y estaciones repetidoras wi-fi para conectividad de escuelas rurales en zona sur de chile. In *XII Congreso Internacional de Telecomunicaciones SENACITEL, Valdivia Chile*, 2006.

[15] W. El-Beaino, A. El-Hajj, and D. Zaher. On radio network planning for next generation 5g networks: A case study. In *Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA), 2015 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2015.

[16] N. Erradi, F. Alami, N. Aknin, and A. El Moussaoui. Genetic algorithms to optimize base station sitting in WCDMA networks. *International Journal*, 2013.

[17] L.J Eshelman. The CHC Adaptive Search Algorithm: How to Have Safe Search When Engaging in Nontraditional Genetic Recombination. In *Foundations of Genetic Algorithms*, pages 265–283. Morgan Kaufmann, 1991.

[18] A.M Felicísimo. *Modelos digitales del terreno.* Pentalfa Oviedo, 1994.

[19] A.M Felicísimo. La utilización de los MDT en los estudios del medio físico. *150 aniversario de la creación del Instituto Tecnológico Geominero de España*, 1999.

[20] T. Feo and M. Resende. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization*, 6(2):109–133, 1995.

[21] L. Ford and D. Fulkerson. *Flows in networks*, volume 1962. Princeton Princeton University Press, 1962.

[22] T. Fritsch, K. Tutschku, and K. Leibnitz. Field strength prediction by ray-tracing for adaptive base station positioning in mobile communication networks. *ITG FACHBERICHT*, pages 67–67, 1995.

[23] A. Gamst, E-G. Zinn, R. Beck, and R. Simon. Cellular radio network planning. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 1(2):8–11, 1986.

[24] S. García, A. Fernández, J. Luengo, and F. Herrera. Advanced nonparametric tests for multiple comparisons in the design of experiments in computational intelligence and data mining: Experimental analysis of power. *Information Sciences*, 180(10):2044–2064, 2010.

[25] M. Garey and D. Johnson. Computers and intractability: a guide to the theory of np-completeness. 1979. *San Francisco, LA: Freeman*, 1979.

[26] F. Garzia, C. Perna, and R. Cusani. Optimization of umts network planning using genetic algorithms. *Communications and Network*, 2(03):193, 2010.

[27] H. Gauch. *Scientific method in practice.* Cambridge University Press, 2003.

[28] P. Gawrysiak and M. Okoniewski. Applying data mining methods for cellular radio network planning. In *Intelligent Information Systems*, pages 87–98. Springer, 2000.

[29] B. Gesch, J. Muller, and T. Farr. The shuttle radar topography mission-data validation and applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(3):233–233, 2006.

[30] H. Ghazzai, E. Yaacoub, and M. Alouini. Optimized lte cell planning for multiple user density subareas using meta-heuristic algorithms. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th*, pages 1–6. IEEE, 2014.

[31] N. Gintautas, S. Rimvydas, and R. Vidas. Autonomous mobile robot control using if-then rules and genetic algorithm. *Information technology and control*, 37(3), 2015.

[32] F. Glover. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 8(1):156–166, 1977.

[33] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5):533–549, 1986.

[34] F. Glover. Tabu search-part i. *ORSA Journal on computing*, 1(3):190–206, 1989.

[35] F. Glover and G. Kochenberger. *Handbook of metaheuristics.* Springer Science & Business Media, 2003.

[36] D. Goldberg. *The Design of Innovation: Lessons from and for Competent Genetic Algorithmsby David E. Goldberg*, volume 7. Springer Science & Business Media, 2002.

[37] D. Goldberg. *Genetic algorithms.* Pearson Education India, 2006.

[38] D. Goldberg and J. Holland. Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2):95–99, 1988.

[39] D.E Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Artificial Intelligence. Addison-Wesley, 1989.

[40] J. Hendry. *James Clerk Maxwell and the theory of the electromagnetic field*. CRC Press, 1986.

[41] DA. Hoeltzel and W-H. Chieng. Statistical machine learning for the cognitive selection of non-linear programming algorithms in engineering design optimization. In *Artificial intelligence in computational engineering*, pages 147–158. Ellis Horwood, 1990.

[42] J. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.

[43] G. Hufford, A. Longley, and W. Kissick. *A guide to the use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode*. US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, 1982.

[44] J. Kennedy. Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance. In *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*, volume 3, pages 1931–1938. IEEE, 1999.

[45] S. Kikuchi, D. Tominaga, A. Masanori, and T. Katsutoshiand T. Masaru. Dynamic modeling of genetic networks using genetic algorithm and s-system. *Bioinformatics*, 19(5):643–650, 2003.

[46] S. Kirkpatrick. Optimization by simulated annealing: Quantitative studies. *Journal of statistical physics*, 34(5-6):975–986, 1984.

[47] N. Lakshminarasimman, S. Baskar, A. Alphones, and M. Iruthayarajan. Evolutionary multiobjective optimization of cellular base station locations using modified nsga-ii. *Wireless Networks*, 17(3):597–609, 2011.

[48] D.N Le. Performance evaluation of heuristic algorithms for optimal location of controllers in wireless networks. In *Information Systems Design and Intelligent Applications*, pages 843–853. Springer, 2015.

[49] D.N Le, N. Nguyen, and V.T Le. A novel pso-based algorithm for the optimal location of controllers in wireless networks. *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, 12(08):23–27, 2012.

[50] A. Longley and P. Rice. Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain. A computer method. Technical report, DTIC Document, 1968.

[51] H. R. Lourenco, O. Martin, and T. Stutzle. Iterated local search. In Handbook of Metaheuristics. In *Vol. 57 of Operations Research and Management Science*, pages 321–353. Kluwer Academic, 2002.

[52] F. Luna, J. Durillo, A. Nebro, and E. Alba. Evolutionary algorithms for solving the automatic cell planning problem: a survey. *Engineering Optimization*, 42(7):671–690, 2010.

[53] O. Martin, S. Otto, and E. Felten. Large-step markov chains for the traveling salesman problem. 1991.

[54] S. Mendes, G. Molina, M. Vega-Rodríguez, J. Gómez-Pulido, Y. Sáez, M. Miranda, C. Segura, E. Alba, P. Isasi, and C. León. Benchmarking a wide spectrum of metaheuristic techniques for the radio network design problem. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 13(5):1133–1150, 2009.

[55] S. Mendes, J. Pulido, J. Gomez, M. Rodriguez, M. Vega, S. Jaraiz, J. Perez, and M. Sanchez. A differential evolution based algorithm to optimize the radio network design problem. In *e-Science and Grid Computing, 2006. e-Science'06. Second IEEE International Conference on*, pages 119–119. IEEE, 2006.

[56] M. Minelli, M. Maode, M. Coupechoux, J.M Kelif, M. Sigelle, and P. Godlewski. Optimal relay placement in cellular networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 13(2):998–1009, 2014.

[57] N. Mladenović and P. Hansen. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11):1097–1100, 1997.

[58] Heinz Mühlenbein. The equation for response to selection and its use for prediction. *Evolutionary Computation*, 5(3):303–346, 1997.

[59] A. Nebro, E. Alba, G. Molina, F. Chicano, F. Luna, and J. Durillo. Optimal antenna placement using a new multi-objective chc algorithm. In *Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 876–883. ACM, 2007.

[60] S.K Pal and P.P. Wang. *Genetic Algorithms for Pattern Recognition*. Computer science mathematics. Taylor & Francis, 1996.

[61] R. Panda and B.B. Choudhury. An effective path planning of mobile robot using genetic algorithm. In *Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), 2015 IEEE International Conference on*, pages 287–291. IEEE, 2015.

[62] I. Parmee. *Evolutionary and adaptive computing in engineering design*. Springer Science & Business Media, 2012.

[63] I.C. Parmee. *Evolutionary and Adaptive Computing in Engineering Design: With 98 Figures*. Springer London, 2001.

[64] R. Parpinelli, H. Lopes, and A. Freitas. Data mining with an ant colony optimization algorithm. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(4):321–332, 2002.

[65] J.D Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Wiley, 2000.

[66] A. Rodríguez Penin. *Sistemas SCADA*. Marcombo ediciones técnicas, 2012.

[67] D. Powell and M. Skolnick. Using genetic algorithms in engineering design optimization with non-linear constraints. In *Proceedings of the 5th international conference on genetic algorithms*, pages 424–431. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993.

[68] K. Rasheed, H. Hirsh, and A. Gelsey. A genetic algorithm for continuous design space search. *Artificial Intelligence in Engineering*, 11(3):295–305, 1997.

[69] W. Stallings. *Comunicaciones y redes de computadores.* 2004.

[70] R. Storn and K. Price. Differential evolution–a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4):341–359, 1997.

[71] E.G Talbi. *Metaheuristics: From Design to Implementation.* Wiley Series on Parallel and Distributed Computing. Wiley, 2009.

[72] W. Tomasi. *Sistemas de comunicaciones electrónicas.* Pearson educación, 2003.

[73] G. Tongheng and M. Chundi. Radio network design using coarse-grained parallel genetic algorithms with different neighbor topology. In *Intelligent Control and Automation, 2002. Proceedings of the 4th World Congress on*, volume 3, pages 1840–1843. IEEE, 2002.

[74] K. Tutschku, N. Gerlich, and P. Tran-Gia. An integrated Approach to Cellular Network Planning. In *Institute of Computer Science.* University of Wurzburg, 1995.

[75] I. Valavanis, G. Athanasiadou, D. Zarbouti, and G. Tsoulos. Base-station location optimization for lte systems with genetic algorithms. In *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of*, pages 1–6. VDE, 2014.

[76] M. Vasquez and J k. Hao. A heuristic approach for antenna positioning in cellular networks. *Journal of Heuristics*, 7(5):443–472, 2001.

[77] M. Vega-Rodríguez, J. Gómez-Pulido, E. Alba, D. Vega-Pérez, S. Priem-Mendes, and G. Molina. Using omnidirectional bts and different evolutionary approaches to solve the rnd problem. In *Computer Aided Systems Theory–EUROCAST 2007*, pages 853–860. Springer, 2007.

[78] L. O. Vélez. Enfoques no estándar de algoritmos evolutivos en un dilema de optimización. *Mutis*, 2(2):126–138, 2012.

[79] M. Weiner. Use of the longley-rice and johnson-gierhart tropospheric radio propagation programs: 0.02-20 ghz. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 4(2):297–307, 1986.