

# Diseño Óptimo de Redes Inalámbricas utilizando Oscilación Estratégica

**Ivana P. Cruz**

Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería  
Río Cuarto, Argentina, 5800  
[icruz@ing.unrc.edu.ar](mailto:icruz@ing.unrc.edu.ar)

**Silvia B. Simón**

Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería  
Río Cuarto, Argentina, 5800  
[ssimon@ing.unrc.edu.ar](mailto:ssimon@ing.unrc.edu.ar)

**María L. Fissore**

Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería  
Río Cuarto, Argentina, 5800  
[mfissore@ing.unrc.edu.ar](mailto:mfissore@ing.unrc.edu.ar)  
and

**Héctor E. Magnago**

Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería  
Río Cuarto, Argentina, 5800  
[hmagnago@ing.unrc.edu.ar](mailto:hmagnago@ing.unrc.edu.ar)

## Abstract

Determining wireless networks infrastructure involves antennas placement as its main task. This is especially important in cellular networks, since the antenna's emplacement determines the area that it covers and therefore coverage that will offer the network. The optimal design problem that arises is to find these locations candidates to cover the greatest area possible, considering the different demands for each of the areas involved, while minimizing the number of antennas to be installed and interference arising between them. The objective of this work is to solve this problem using a metaheuristic based on tabu search, enhanced by mean a technique known as strategic oscillation which have been successful solving other problems in the combinatorial optimization field. An application example is provided and results are analyzed to verify the efficiency of the proposed method.

**Keywords:** wireless networks, strategic oscillation, combinatorial optimization.

## Resumen

La determinación de la infraestructura de redes inalámbricas involucra como tarea principal la ubicación de las antenas. Esto es especialmente importante en las redes de tipo celular, ya que el emplazamiento de una antena determina la celda que cubre y en definitiva la cobertura que ofrecerá la red. El problema de diseño óptimo que se plantea entonces, es encontrar aquellas localizaciones candidatas que permitan cubrir la mayor área posible, considerando las diferentes demandas de cada una de las áreas involucradas, al tiempo que se minimiza el número de antenas que deben instalarse y la interferencia resultante entre ellas.

El objetivo de este trabajo es resolver este problema a través de la utilización de metaheurísticas basadas en búsqueda tabú, enriquecidas a través de la técnica denominada oscilación estratégica que han resultado exitosas en la resolución de otros problemas en el campo de la optimización combinatoria. Se presenta un ejemplo de aplicación del problema y se analizan los resultados obtenidos para comprobar la eficiencia del método propuesto.

**Palabras claves:** Redes inalámbricas, Oscilación estratégica, Optimización combinatoria.

## 1 Introducción

En la búsqueda de métodos efectivos para el diseño de redes móviles celulares, se estudian los distintos escenarios que permitan avanzar en la toma de decisiones a la hora de dimensionar o re dimensionar una red de telefonía celular.

Existen distintos factores a tener en cuenta cuando se desea estructurar un sistema de telefonía celular, tales como: cantidad de Radio Bases (RB) a utilizar, ubicación de las mismas, potencia de la señal emitida, solapamiento de cobertura e interferencia entre las frecuencias de las RB.

Un sistema de telefonía móvil o una red de datos inalámbrica de gran cobertura deben asegurar la comunicación entre las terminales móviles y cualquier otro dispositivo de usuario, sea este fijo o móvil. Cualquier cliente móvil debería poder conectarse en cualquier momento y en cualquier lugar dentro del área de cobertura que se garantiza, a través de ondas de radio.

Dada un área a cubrir, el sistema de telefonía celular consiste en dividir la misma en pequeñas regiones llamadas celdas; cada una de ellas posee una antena en su centro (RB) que irradia señal para dar cobertura a la demanda solicitada por dicha región. La instalación de una única antena para cubrir una zona relativamente grande requiere la utilización de potencias de irradiación que superan los límites permitidos por las reglamentaciones vigentes representando, además, una baja eficiencia en zonas de gran densidad de demanda. Para lograr esta disponibilidad el sistema debe estar conformado por un conjunto de radio bases fijas con potencias admisibles, instaladas dentro del área de cobertura y por transeceptores móviles de potencia más reducida. Cada RB cubre una celda dando servicio a una pequeña región de tamaño variable, entre 100 metros (alta densidad de demanda) y unas decenas de Km (baja densidad de demanda).

El problema se denomina Localización de Radio Bases (LRB) y es parte de la etapa de planificación celular. El planteo anterior se puede asimilar al problema del Conjunto Mínimo Dominante (*Minimum Dominating Set*, MDS), el cual ha sido catalogado como NP-Completo, [1] y es de gran importancia en el diseño de redes eficientes y de bajo costo. Los problemas de tipo NP-Completo o NP-Hard, son aquellos para los cuales no se conoce, hasta la fecha, la forma de resolver cualquier instancia de los mismos en tiempos acotados polinomialmente.

Esta clase de problemas son de gran relevancia, no sólo por su interés teórico, sino también porque pueden asimilarse a una gran cantidad de problemas de optimización topológica de redes, que son problemas clásicos de investigación operativa, con aplicabilidad práctica en diversos campos de las telecomunicaciones, diseño de redes de computadoras, etc.

Uno de los más importantes objetivos de la planificación de sistemas de telecomunicaciones móviles es el diseño de la configuración necesaria para prestar un servicio de manera óptima respecto de algún criterio de desempeño, a la vez que se satisface un conjunto de restricciones. Los criterios de desempeño pueden ser, por ejemplo el costo asociado a la topología o la calidad del servicio ofrecido.

## 2 Planteamiento del problema

Existen diferentes modelos para el LRB los cuales difieren principalmente en la definición de los elementos del problema: el área de trabajo, el conjunto de localizaciones candidatas y el criterio de desempeño elegido [2].

El área de trabajo o de servicio puede ser modelada introduciendo el concepto de “nodos de demanda” propuesto en [3], el cual permite discretizar la misma y considerar que la demanda está uniformemente distribuida en toda el área a cubrir.

Es posible entonces dividir el área total de servicio en una grilla de  $m \times n$  cuadros, algunos de los cuales albergan a las posiciones candidatas a colocar RB. De esta manera el área de cobertura total puede ser representada por una matriz  $\mathbf{A}$  de dimensión  $m \times n$  donde cada elemento  $a_{ij}$  representa un nodo de demanda.

Las localizaciones en las que es posible instalar RBs para dar servicio a un área se denominan “Localizaciones Candidatas”. Las mismas se determinan por diversas restricciones, siendo las geográficas y las económicas las principales.

Posteriormente al proceso de obtener las localizaciones candidatas, se lleva a cabo el proceso de optimización para determinar en cuales de ellas se colocará una RB para dar el servicio requerido.

El problema de optimización combinatoria planteado, en este trabajo, es encontrar una topología para la ubicación del conjunto de RB candidatas de tal manera de maximizar el área de cobertura total y minimizar la cantidad de RB utilizadas a la vez que se satisface la restricción de no superar un umbral prefijado para el solapamiento de la cobertura individual de cada RB.

Para computar el área cubierta por una RB se calcula la pérdida de potencia de la señal  $P_p$ , respecto de cada nodo en función de su distancia a la antena a través de la siguiente expresión:

$$P_p = a + b * \log(d) + N(\mu, \sigma) \quad (1)$$

Donde  $a$  y  $b$  son constantes,  $d$  es la distancia euclidiana de la antena a cada nodo,  $N(\mu, \sigma)$  es una variable aleatoria gaussiana con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ . La  $P_p$  es calculada para cada radio base y cada nodo de demanda. Si  $P_p$  es

menor que cierto umbral  $\delta$  en un nodo dado, entonces el nodo es cubierto por la radio base y se considera como atendido.

Si un nodo de demanda es atendido por dos o más RB se considera que existe solapamiento en la cobertura. El grado de solapamiento ( $g_s$ ) exhibido es igual a la cantidad de RB que dan servicio a un mismo nodo. En función del valor de  $g_s$  se define el umbral de solapamiento  $u_s$  como una cota máxima de solapamiento permitida.

Sea  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$  el conjunto de localizaciones candidatas, se define a  $\mathbf{x}$  como un vector binario de dimensión  $k$  que representa la topología de RB propuesta, tal que  $x_i=1$  si  $S_i$  del conjunto  $S$  es utilizado y  $x_i=0$  caso contrario.

Dada  $A^{m \times n}$ , matriz que representa el área a cubrir de tal manera que  $a_{ij}=1$  si el nodo de demanda  $ij$  es cubierto por una RB,  $a_{ij} \geq 2$  si es cubierto por 2 ó más RB, respectivamente, y  $a_{ij}=0$  si el nodo de demanda no recibe cobertura.

Sea  $C_m$  la cobertura máxima inicial del problema, calculada como sigue:

$$C_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad \text{dado que } \sum_{i=1}^k x_i = k$$

donde

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 & ; \text{si es cubierta por al menos una RB} \\ a_{ij} = 0 & ; \text{caso contrario.} \end{cases} \quad (2)$$

Por lo tanto,  $C_m$  es el área cubierta por el sistema cuando son utilizadas todas las RB candidatas.

Formalmente, el problema a resolver en este trabajo puede ser expresado como sigue:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^k x_i \\ \max & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

Sujeto a

$$a_{ij} \leq u_s$$

Es decir, se pretende minimizar la cantidad de RB utilizadas maximizando el área de cobertura, contemplando que la cobertura de los nodos de demanda no supere el umbral de solapamiento  $u_s$ .

### 3 Metodologías utilizadas

El problema de optimización combinatoria planteado, dada su categoría *NP-Hard* necesita ser abordado mediante métodos de resolución que posibiliten la entrega de soluciones en tiempos razonables. Las técnicas metaheurísticas han probado ser una alternativa válida en el tratamiento de este tipo de problemas. En este trabajo se ha aplicado una metodología de resolución basada en la heurística de búsqueda tabú (*tabú search*, *TS*) enriquecida con una técnica de oscilación estratégica (SO). A continuación se describen los aspectos fundamentales de la estrategia utilizada.

### 4 Búsqueda Tabú

La Búsqueda Tabú es una técnica metaheurística que utiliza un procedimiento de búsqueda local para explorar el espacio de soluciones, junto con mecanismos de memoria adaptiva diseñados para evitar el estancamiento en mínimos locales y la visita cíclica de las mismas soluciones. La información histórica acerca del proceso de búsqueda de soluciones es almacenada en las llamadas listas tabú.

A partir de una solución inicial ( $\mathbf{x}_0$ ), se define en cada iteración una vecindad de posibles soluciones,  $N(\mathbf{x})$ , modificando la solución corriente a través de una secuencia de movimientos.

Los elementos de dicha vecindad son examinados para determinar el mejor de ellos que está ausente de la lista tabú, ( $\mathbf{x}'$ ). Esta solución es seleccionada como punto de partida para una nueva iteración aún cuando no mejore la solución anterior  $\mathbf{x}$ , a la vez que se guarda la mejor solución encontrada hasta el momento ( $\mathbf{x}^*$ ).

El método lleva un registro de los movimientos efectuados para alcanzar  $\mathbf{x}'$  desde  $\mathbf{x}$  en cada iteración. Esta memoria del proceso modifica la generación de la vecindad determinando que soluciones pueden ser alcanzadas por un movimiento a partir de la solución corriente. Normalmente esto se lleva a cabo a través de una lista de movimientos temporalmente prohibidos llamada lista tabú basada en lo reciente, la cual se actualiza en cada iteración. Pasado un cierto número de iteraciones, llamado período tabú (pt), el movimiento es nuevamente permitido. La lista tabú representa la memoria a corto plazo del proceso. El estado tabú asociado a un movimiento puede eventualmente ser revocado si se satisface algún criterio de aspiración como por ejemplo la generación de una solución de mejor calidad que cualquier otra visitada previamente durante la búsqueda

En contraste, la lista tabú basada en la frecuencia con que ciertos movimientos son realizados, representa la memoria a largo plazo de la técnica y permite la diversificación de la búsqueda al seleccionar movimientos que han sido menos utilizados o nunca se han elegido.

En algunas aplicaciones, TS básico puede ser suficiente; sin embargo existen otras en las cuales es necesaria la incorporación de otras estrategias adicionales para favorecer la búsqueda.

En este trabajo se propone para la resolución del problema de Localización de Radio Bases, una heurística de Búsqueda Tabú basada en Oscilación Estratégica a través de los límites de la región factible. Esta técnica que consiste en una secuencia de fases constructivas y destructivas, permite alcanzar un buen balance entre las etapas de intensificación y diversificación [4].

Dada una solución factible, la búsqueda es guiada estratégicamente hasta alcanzar el límite de la región factible y continúa en la región no factible hasta que cierta profundidad en la misma es alcanzada. En este punto se invierte la dirección de la búsqueda. El proceso de atravesar repetidamente los límites de la región factible, desde diferentes direcciones, origina un comportamiento oscilatorio. Para evitar recorrer nuevamente trayectorias ya visitadas, se utilizan los mecanismos básicos de búsqueda tabú [5].

Para el problema de localización de RBs el procedimiento se aplica como sigue. Dada una topología inicial de RBs factible, la fase destructiva consiste en eliminar una RB por iteración con la consecuente degradación del grado de solapamiento, hasta que éste alcanza  $u_{si}$  prefijado y que constituye un parámetro del algoritmo de resolución. En este punto la dirección de la búsqueda se invierte y comienza una fase constructiva consistente en el agregado de una estación por iteración, que procede aún en la región no factible hasta alcanzar nuevamente un límite  $u_{ss}$  de solapamiento prefijado.

En lo que sigue se detallan los aspectos de implementación del mecanismo de resolución propuesto.

#### 4.1 Definición de vecindades

Dada una solución  $\mathbf{x}$ , su vecindad  $N(\mathbf{x})$  está definida como el conjunto de soluciones  $\mathbf{x}'$  obtenidas por el agregado (fase constructiva) o la eliminación (fase destructiva) de una estación de RB. El conjunto de soluciones  $\mathbf{x}'$  comprende soluciones que están a una distancia de Hamming de uno respecto a  $\mathbf{x}$ , esto es

$$N(\mathbf{x}) = \{ \mathbf{x}' / x'_i \neq x_i \text{ y } x'_j = x_j \ \forall j \neq i \} \quad (4)$$

#### 4.2 Memorias de corto y largo plazo

La lista tabú basada en lo reciente está representada por un vector de dimensión  $k$ . Una componente distinta de cero en dicho vector indica que el movimiento de dicha variable está prohibido ya que ha sido modificada recientemente. Su valor es precisamente el número de iteraciones restantes hasta que el periodo tabú de este movimiento haya transcurrido.

La lista tabú basada en la frecuencia también se representa mediante un vector  $\mathbf{h}$  de dimensión  $k$ , sólo que a diferencia del caso anterior la  $i$ -ésima componente de  $\mathbf{h}$  reporta el número de movimientos de la variable  $i$  usado para generar la próxima solución durante las  $p_h$  iteraciones. Esto permite dirigir la búsqueda hacia regiones no visitadas o exploradas con menor frecuencia. Como consecuencia la función de evaluación correspondiente al  $i$ -ésimo movimiento permitido se penaliza en proporción a  $h_i$ . Luego de  $p_h$  iteraciones el vector  $\mathbf{h}$  es reiniciado.

#### 4.3 Criterios de aspiración y terminación

El estado tabú de una solución puede ser revocado si esta tiene asociado un mejor valor de función de evaluación que la mejor solución  $\mathbf{x}^*$  encontrada hasta el momento.

El criterio de finalización para el algoritmo fue el de terminación por convergencia: si la mejora en las soluciones obtenidas, luego de  $T$  iteraciones, no es mayor que cierto límite, la búsqueda es detenida.

#### 4.4 Función de evaluación

El problema a resolver planteado en la ecuación 3, constituye un problema multiobjetivo, con dos criterios de desempeño en conflicto. En este trabajo se propone transformarlo en un problema de optimización escalar, donde la nueva función objetivo es una combinación lineal de ambos criterios. La función de evaluación considera esta formulación, incluyendo un escalamiento adecuado.

Además, dado que un movimiento puede originar una solución no factible, cada elemento de una vecindad es evaluado utilizando la función  $\psi(\mathbf{x})$ , que considera la restricción del problema, como sigue:

$$\Psi(\mathbf{x}) = \begin{cases} f(\mathbf{x}) & \text{si } \mathbf{x} \text{ está en la zona factible} \\ f(\mathbf{x}) + P(\mathbf{x}) & \text{si } \mathbf{x} \text{ no es factible} \end{cases}$$

donde (5)

$$f(\mathbf{x}) = \alpha \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i + \beta \frac{1}{m \times n} \left( Cm - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} \right)$$

Siendo:

$\alpha$  y  $\beta$  los pesos de la combinación lineal de las funciones a optimizar.  $1/k$  y  $1/(m*n)$  son factores de escalamiento de cada una de las funciones.  $P(\mathbf{x})$  es la función de penalización que tiene en cuenta el grado de violación de la restricción y está dada por:

$$P(x) = (g_m - u_s)^2 \quad (6)$$

donde  $g_m$  es el grado mayor de solapamiento para la solución corriente y  $u_s$  es el umbral de solapamiento permitido.

#### 4.5 Representación de las soluciones

Como se ha mencionado, el área a cubrir es representada por una matriz  $A^{m \times n}$ . Numerando cada nodo de demanda en forma consecutiva, barriendo la matriz por filas se obtiene una ubicación para las posiciones candidatas que estará comprendida entre 1 y  $m \times n$ .

La ubicación de las RBs candidatas se representa con un vector  $\mathbf{S}$  de dimensión  $k$  que almacena el número de su localización. Cada solución estará representada por un vector binario  $\mathbf{x}$  de dimensión  $k$ , tal que  $x_i=1$  si en la ubicación candidata  $i$  se coloca una RB y  $x_i=0$  en caso contrario.

Cada nodo de demanda  $a_{ij}$  asume un valor igual a la cantidad de radiobases que le prestan servicio. Así,  $a_{ij}=0$  si no fue cubierto por ninguna RB,  $a_{ij}=1$  si fue cubierto por una RB y  $a_{ij} \geq 2$  si fue cubierto por 2 ó más RB respectivamente. De este modo, el valor que toma cada elemento  $a_{ij}$  permite medir el grado de solapamiento de cada nodo.

### 5 Experimentos y resultados

El algoritmo propuesto se ejecutó para un ejemplo de 841 nodos de demanda distribuidos en un área representado por una matriz  $A^{29 \times 29}$ . El conjunto de localizaciones candidatas, representado por el vector  $\mathbf{S}$ , consta de 100 elementos, distribuidos según se muestra en la tabla 1. Además, en la misma se observan los datos correspondientes al área máxima cubierta  $C_m$  (medida en términos de cantidad de nodos de demanda atendidos) y el grado de solapamiento inicial  $g_{si}$ . Los últimos dos valores se obtienen cuando se colocan RBs en todas las localizaciones candidatas. Estos datos fueron utilizados para fijar los límites de solapamiento superior e inferior para la oscilación estratégica. Los valores propuestos fueron:  $u_{si}=2$  y  $u_{sf}=9$ . El número máximo de iteraciones para el algoritmo, fue fijado en 250 iteraciones.

<b>S</b>	1 12 25 37 49 52 62 71 85 96 101 108 112 117 120 122 129 138 161 163 183 189 200
	206 232 242 244 250 266 275 288 294 306 309 325 333 337 350 352 363 364 365 385
	394 404 423 433 434 460 467 471 482 484 495 499 500 509 510 511 514 527 529 539
	542 559 580 585 588 604 609 611 612 613 619 627 637 658 661 682 687 688 692 694
	702 709 711 724 730 752 753 765 780 789 800 801 805 826 835 836 841
<b><math>C_m</math></b>	815
<b><math>g_{si}</math></b>	10

Tabla 1. Datos para el ejemplo propuesto.

En la figura 1 se esquematiza el área de cobertura para la topología correspondiente a la solución de máxima

cobertura,  $\sum_{i=1}^k x_i = 100$ .

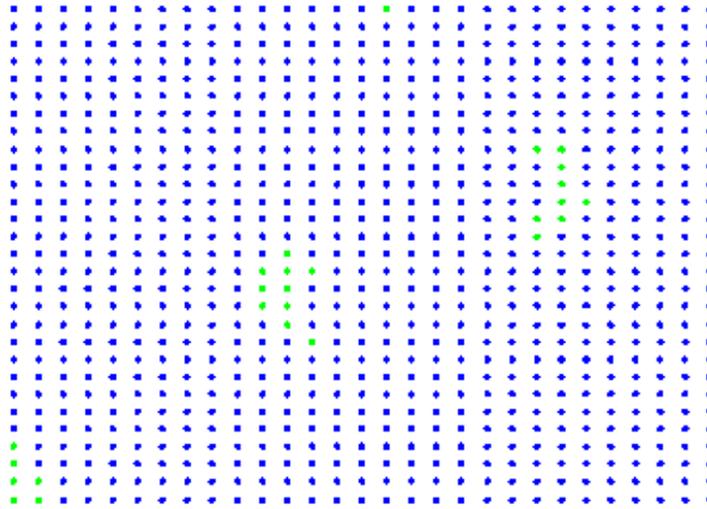


Figura 1- Esquema de máxima cobertura utilizando 100 RB

Se diseñaron dos experiencias con diferentes valores para los umbrales de solapamiento permitidos:  $u_s=2$  y  $u_s=3$ . Dado que la función de evaluación debe contemplar objetivos en conflicto, como son la minimización de RB y la maximización de la cobertura, se ejecutó cada experiencia para diez valores de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ . Las curvas Pareto que se obtuvieron para cada caso, se muestran en la figura 2. El área cubierta se mide en cantidad de nodos de demanda atendidos por al menos una radio base. En la tabla 2 se muestran los resultados de la optimización.

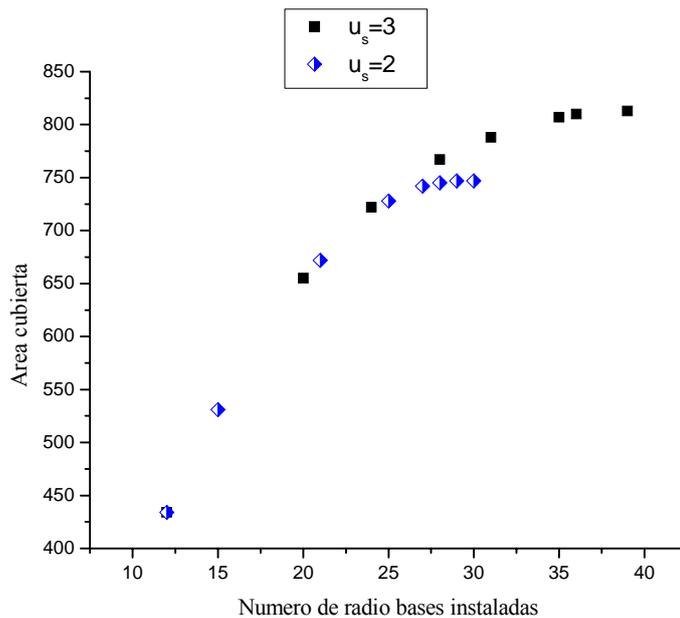


Figura 3. Curva Pareto: RB utilizada y Área de cobertura

Como puede observarse en la figura 3, en función del umbral de solapamiento, si se utiliza una misma cantidad de RB el resultado es una mayor o menor área de cobertura del sistema. Por ejemplo, para 28 RB implementadas, si se utiliza  $u_s=2$  el área de cobertura resultará de 745 nodos de demanda y si se utiliza un mayor solapamiento,  $u_s=3$  el área de cobertura resultará de 767 nodos de demanda. La decisión respecto del valor máximo de solapamiento permitido, está relacionada con ciertos aspectos de la calidad que se desea brindar al usuario, ya que el solapamiento está vinculado con el grado de interferencias entre las radio frecuencias.

Resultados de la optimización										
Umbral de solapamiento utilizado	$u_s = 2$									
$\alpha$	0.01	0.11	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88	0.99
Cantidad de RB utilizadas	30	29	28	27	27	25	21	15	12	12
Número de nodos de demanda atendidos	748	747	745	742	742	728	672	531	434	434
Umbral de solapamiento utilizado	$u_s = 3$									
Variación de $\alpha$	0.01	0.11	0.22	0.33	0.44	0.55	0.66	0.77	0.88	0.99
Cantidad de RB utilizadas	39	36	36	35	31	28	24	20	12	12
Número de nodos de demanda atendidos	831	810	810	807	788	767	722	655	434	434

Tabla 2 – Resultados obtenidos para las experiencias propuestas.

## 6 Conclusiones

En este trabajo se propuso un enfoque metaheurístico basado en el paradigma de búsqueda tabú para la resolución del problema de instalación de radio bases. Se propuso un algoritmo que lleva a cabo la optimización de dos objetivos en conflicto como son minimizar un costo (el número de RB a instalar) y maximizar un beneficio (extender el área de cobertura), obteniéndose curvas Pareto que brindan al prestador de servicio una herramienta para la toma de decisiones. En este sentido, la inclusión del grado de solapamiento en el modelado del problema constituye una variable adicional de gran importancia, ya que permite evaluar, por ejemplo, el grado de interferencias en términos de frecuencias, y por lo tanto analizar uno de los aspectos inherentes a la calidad del servicio. Se pretende en trabajos futuros incorporar este aspecto en el modelado del problema, así como la implementación de otros métodos de resolución que permitan la obtención de curvas Pareto sin la utilización de funciones agregativas.

## Referencias

- [1] Garey, M. y Johnson, D., Computers and Intractability. A guide to the theory of NP-Completeness, W.H. Freeman and Company, New York. 1999
- [2] Touhami, S. Optimization Problems in Cellular Networks. *PhD thesis, Concordia University*, Montreal, 2004.
- [3] Tutschku, K., Gerlich, N., Tran-Gia, P. An integrated approach to cellular network planning. *Proceedings of the 7th International Network Planning Symposium (Networks 96)*, Sydney, 1996.
- [4] Glover, F. y Laguna, M., *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, M.A (1997).
- [5] Punnen, A. y Aneja, P. A Tabu Search Algorithm for the Resource-Constrained Assignment Problem. *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 46, No. 2, pp. 214-220 1995.