



# Modelo bi-objetivo de localización para la ubicación de los custodios en la UCI

Bi-objective location model for the location of the custodies in the UCI

**Daciel Alberto Olivera Cortina**

**Efrén Vázquez Silva**

**Iyatne Mompié Fuentes**

**Universidad de las Ciencias Informáticas. La Habana. Cuba.**

**Universidad Politécnica Salesiana, Sede Matriz. Cuenca. Ecuador.**

**Universidad de las Ciencias Informáticas. La Habana. Cuba.**

## Resumen

Usando como base los problemas de localización de instalaciones se construye un modelo bi-objetivo de localización por cubrimiento para la ubicación de los agentes de seguridad en la Universidad de las Ciencias Informáticas que maximiza la cobertura a la población y al patrimonio con un número dado de agentes. Se expone la metodología empleada para resolver los problemas generados y su resolución en el OpenSolver. Los resultados se obtienen al resolver 42 problemas de programación lineal entera, presentándose variantes de solución y como proceder en caso de necesitar nuevas soluciones en virtud de nuevos intereses del decisor. Además, se comparan las variantes de ubicación de agentes usadas hoy con las propuestas por el modelo Maximal Covering Location Problem bi-objetivo desarrollado, con resultados interesantes.

Palabras clave: Localización, Localización de servicios de emergencia, Programación lineal entera, Open-Solver.



## Abstract

*Using as a base the facility location problems, a bi-objective covering location model is constructed for the location of the security agents in the University of Information Sciences that maximizes the coverage to the population and the patrimony with a given number of agents. The methodology used to solve the generated problems and their resolution in the OpenSolver is exposed. The results are obtained by solving 42 problems of integer linear programming, presenting variants of solution and how to proceed in case of needing new solutions under new interests of the decision maker. In addition, the location variants of agents used today are compared with those proposed by the bi-objective Maximal Covering Location Problem model developed, with interesting results.*

*Keywords: Location, Location of emergency services, Integer linear programming, OpenSolver.*

## Introducción

La Universidad de las Ciencias Informáticas está emplazada en un área de 268 hectáreas y por su objeto social, estructura urbanística, composición socio-económica y funcionamiento le impone particularidades distintivas a la organización y realización del sistema de seguridad y protección, el cual debe proteger diariamente más de 7000 personas, múltiples edificaciones y tecnologías con un patrimonio superior a los \$150,000,000 pesos en moneda total. La mayor parte de la planificación del sistema de vigilancia, y en particular la forma de ubicar los agentes de seguridad en el área de la universidad, está basada netamente en la experiencia y criterios de sus participantes, y no ha sido efectiva registrándose múltiples incidencias. El proceso de ubicar los agentes, teniendo en cuenta el área a cubrir y los factores adversos que se exponen en (Director de Seguridad y Protección, 2012), es un problema combinatorio. Esta situación de ubicar  $n$  elementos en  $n$  de las  $m$  posibles ubicaciones pudiera ser abordada como un problema de localización.

Los problemas de localización de instalaciones investigan dónde ubicar físicamente a un conjunto de instalaciones para reducir al mínimo el costo de satisfacer un conjunto de demandas sujeto a un conjunto de restricciones (Hale & Moberg, 2003). O donde el término Análisis de Localizaciones se refiere a la modelización, formulación y solución de una clase de problemas que puede ser mejor descrito como la ubicación de las instalaciones en un espacio dado (ReVelle & Eiselt, 2005). Los enfoques más generales utilizados para la localización de instalaciones fueron acuñados por Hakimi (Hakimi, 1964) como  $p$ -mediana y  $p$ -centro, sin embargo, se han desarrollado muchos más, como por ejemplo enfoques multiobjetivos (Chanta, Mayorga, & McLay, 2014). Una visión detallada de objetivos y modelos se puede encontrar en las revisiones (Başar, Çatay, & Ünlüyurt, 2012; Daskin & Murray, 2012; Farahani, Asgari, Heidari, Hosseininia, & Goh, 2012).

En los años setenta los problemas que se enfrentaban necesitaron de nuevos objetivos y también aumentaron los problemas afines con instalaciones públicas, surgiendo así los problemas de cubrimiento, que tenían como objetivo atender a toda la población y minimizar al mismo tiempo el número de centros de servicio que se debían ubicar (Toregas, Swain, ReVelle, & Bergman, 1971), o bien atender al máximo número posible de usuarios con un número limitado de centros de servicio (Church & ReVelle, 1974). Ejemplos de aplicaciones del Location Set Covering Problem (LSCP, por sus siglas en inglés) se pueden



encontrar en (Daskin & Murray, 2012; Murray, 2013; Snyder, 2011) y sobre el Maximal Covering Location Problem (MCLP, por sus siglas en inglés) en (Başar & Çatay, 2011; Murray, 2013).

Los modelos basados en cubrimiento han sido siempre muy atractivos debido a su aplicabilidad, especialmente para localización de centros de servicios y de emergencia (Farahani et al., 2012, p.1). Sin embargo, en sistemas de seguridad y protección no se han aplicado tanto y la cantidad de trabajos existente, en comparación con los que se encuentran de localización, es poca; evidenciando en esta área una brecha entre la teoría y la práctica. De igual modo en (Başar et al., 2012, p.8) se demuestra que los problemas de localización de estaciones de policías han sido poco estudiados. Las aplicaciones realizadas están relacionadas a la localización de estaciones de policía (Curtin et al., 2010; Hakimi, 1964), o de sensores o cámaras para apoyar el proceso de vigilancia (Murray et al., 2007; Solano-Pinzón et al., 2017).

El modelo Police patrol area covering (PPAC, por sus siglas en inglés) desarrollado por Curtin, Hayslett y Qiu (Curtin et al., 2010) está basado en un modelo de cobertura con backup (consultar (Farahani et al., 2012, p. 13)), el cual tiene el fin de localizar patrullas para maximizar la demanda (el nivel de incidentes) cubierta por estas y cada nodo demanda se puede cubrir más de una vez. En (Başar & Çatay, 2011; Ordóñez et al., 2013) se incluyen ejemplos de aplicaciones. Este modelo, para nuestro propósito, tiene dos inconvenientes: en primer lugar utiliza backup, lo cual en este caso no se considera necesario pero es atractivo, y si se sustituye la restricción sobre  $z_i$  por  $z_i \in \{0, 1\}, \forall i \in I$ , el modelo que resulta es similar al MCLP; en segundo lugar,  $h_i$  representa el nivel de incidentes o de crímenes de un nodo  $i$ , y no se tiene acceso a tal índice. Luego, se pretende desarrollar un modelo bi-objetivo de localización por cubrimiento para ubicar los agentes de seguridad de la Universidad de la Ciencias Informáticas.

## Materiales y métodos

Teniendo en cuenta el análisis de Başar y otros (Başar et al., 2012) sobre la localización de servicios de emergencia donde se evidencia que 42 de 84 artículos analizados usan programación lineal en enteros y de acuerdo con Borrás en (Rocher, 2012), donde aborda las vías que son más utilizadas para tratar el problema de la ubicación de las unidades de emergencia, utilizaremos la modelización de los sistemas mediante formulaciones lineales enteras.

Contextualizando, las instalaciones serán los custodios o agentes de seguridad. Las localizaciones están dadas por un conjunto finito de puntos que va a coincidir en este caso con todos los nodos considerados de demanda (un subconjunto se muestra en figura 1). Los clientes o nodos de demanda serán un número finito de puntos que se distribuyen por toda el área del centro e incluye todos los docentes, instalaciones, locales, edificaciones, etc. Para obtener las demandas de población y patrimonio a proteger de cada nodo, el autor se auxilia de las herramientas SIGuci (GEYSED, 2013), del sitio web Directorio UCI (Dirección de Informatización, 2016) y del Listado de Activos Fijos (Grupo de Activos Fijos, 2014). Para la distancia entre todos los nodos se utilizó la Distancia Euclidiana y se calculó mediante una herramienta que se construyó para este propósito (Pupo & Olivera, 2015).

Se abordan dos situaciones, en la primera (LSCP) se desea minimizar la cantidad de agentes que se necesitan para cubrir la demanda y se siguió la propuesta descrita en (Li, Zhao, Zhu, & Wyatt, 2011, p.4);



para la segunda, se desea maximizar la cantidad de demanda (población y patrimonio) a cubrir con un número dado de agentes y se parte de la metodología descrita en (Xueping Li et al., 2011, p. 6) donde se describe un modelo mono objetivo que localiza  $p$  instalaciones que maximicen la demanda cubierta, y se transforma como sigue hasta llegar al modelo bi-objetivo propuesto que maximiza la cobertura a la población y al patrimonio con un número dado de agentes.

Se tienen dos funciones a maximizar,  $f_1(y)$  cuyos coeficientes son la población de cada nodo demanda y  $f_2(y)$  cuyos coeficientes son el patrimonio de cada nodo demanda. Al ser entonces un modelo bi-objetivo, se usa el enfoque de los promedios ponderados para la unificación de la función objetivo (Marler & Arora, 2004, 2010) (Lin, Xiang-lin, Yue, Yong-Zhe, & Hui, 2013), específicamente realizamos una modificación al enfoque utilizado en (Stanimirovic, Zlatanovic, & Petkovic, 2011, p. 4), pues en el enfoque clásico la normalización depende de los valores óptimos de las funciones objetivo, y en nuestro caso, cada modelo depende del radio de cobertura y la cantidad de agentes y ello impide que al usar la herramienta el usuario interactúe con estos parámetros sin tener que modificar la función objetivo. Luego, en lugar de normalizar las funciones objetivo, se normalizan los coeficientes de las funciones objetivo como sigue:

$$c'_j = \frac{c_j - c_i^{\min}}{c_i^{\max} - c_i^{\min}}, \forall j \text{ de los coeficientes de la función objetivo } i \text{ donde:}$$

$$c_i^{\max} = \text{máximo valor de los coeficientes de la función objetivo } i$$

$$c_i^{\min} = \text{valor mínimo de los coeficientes de la función objetivo } i$$

El modelo se transforma a:

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^q w_i f'_i(y)$$

Sujeto a las restricciones originales donde  $f'_i(y)$  es la función objetivo  $i$  con coeficientes normalizados y  $w_i$  el peso de importancia relativa del objetivo  $i$ , tal que  $\sum_{i=1}^q w_i = 1$ .

Formalización del Modelo MCLP bi-objetivo para maximizar la demanda a cubrir con un número  $p$  de agentes. Sea  $I$  el conjunto de nodos de demanda;  $i$  el índice para los objetivos;  $J$  el conjunto de las posibles localizaciones para las postas;  $j$  el índice para las localizaciones;  $d_{ij}$  distancia del objetivo  $i$  a la posta en la localización  $j$ ;  $r$  el umbral de la distancia para que un objetivo sea considerado como cubierto;  $W_i = \{j \in J: d_{ij} \leq r\}$  el conjunto de localizaciones que cubren el objetivo  $i$ , sea la matriz  $A$  cuyos elementos toman valor 1 si y solo si la distancia de una posible localización  $j$  a un objetivo  $i$  no es mayor que  $r$ , es decir, para cada fila  $i$  el elemento  $a_{ij} = 1$  si  $j \in W_i$  y 0 en otro caso. Sean  $h_i$  y  $k_i$  las demandas del objetivo  $i$ ;  $p$  el número de postas a localizar;  $y_i$  variable binaria, igual a 1 si y solo si el objetivo  $i$  es cubierto al menos una vez. Por último, sea  $x_j$  variable binaria, igual a 1 si y solo si una posta es localizada en el sitio  $j$ .

$$\text{objetivo 1 } \max f_1(y) = \sum_{i=1}^m h_i y_i$$

$$\text{objetivo 2 } \max f_2(y) = \sum_{i=1}^m k_i y_i$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = p \quad (2) \quad \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \geq y_i, \forall i (i = 1, \dots, m) \quad (1)$$

$$x_j, y_i \in \{0, 1\}, j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m; \text{ con } n = m = 154 \quad (3)$$

Los objetivos maximizan la cobertura o cubrimiento a la población y al patrimonio respectivamente. Las restricciones (1) garantizan que un punto de demanda  $i$  esté cubierto solo si una o más instalaciones se ubican dentro de la norma de la distancia y la restricción (2) especifica que el número total de servicios disponibles es igual a  $p$ .

Una buena referencia donde se analizan enfoques y tendencias de los métodos de solución es (Farahani et al., 2012, p. 30). En concordancia con Başar, Çatay y Ünlüyurt (Başar et al., 2012, p. 2), hoy en día las soluciones óptimas a varios de estos problemas se pueden encontrar por medio de los avances en la capacidad computacional. Interesaría entonces una herramienta que sea libre, que pueda resolver problemas de gran tamaño de forma exacta de ser posible y que use un lenguaje de modelado algebraico. Existen algunos softwares para resolver problemas de optimización, sin embargo, están especializados en resolver tipos específicos de problemas, el único libre que resuelve problemas de localización es la Librería LoLoLA (Universidad técnica de Kaiserslautern, Alemania) que cuenta con varias funcionalidades y resuelve varios problemas de localización, sin embargo, no es posible adicionar nuevos parámetros para que el usuario final pueda interactuar con la misma y usa un lenguaje muy técnico. Además, existen librerías en Python y R pero que no cuentan con una interfaz de usuario. Considerando los análisis en (Aeschbacher, 2012) y (Ferrand, Magazine, Rao, & Glass, 2011), de la factibilidad de usar OpenSolver, en los cuales mostró sorprendentes resultados comparado con GAMS con el servidor NEO y AMPL en combinación con CPLEX; coincidimos en que OpenSolver desarrollado por (Mason & Dunning, 2012) es una buena alternativa y por ende es usado como base para la herramienta de solución.

Se considera el radio de cobertura  $r = 30$ , ya que actualmente se planifica considerando solo este alcance. En las normas (Consejo de Estado, 1999; MININT, 2001) no se especifica este radio y teniendo en cuenta las pruebas de eficiencia física que se realizan al personal de seguridad a nivel internacional (Secretaría de Estado de seguridad, 2012, p. 84629) y los elementos como la visibilidad, horarios y otros que se exponen en (UCI, 2014) se usa además  $r = 90$  metros, como un radio acertado y conservador.

## Resultados y discusión

Al suponer un radio de cobertura  $r$  igual a 30 m se obtiene como resultado del modelo LSCP que se necesitan 111 agentes para cubrir toda la demanda, las localizaciones de los mismos se pueden ver en la figura 1. Para  $r = 90$  m se necesitan 43 agentes (figura 2).





Figura 1. Solución LSCP UCI 30m



Figura 2. Solución LSCP UCI 90m

Con el LSCP se determinó el número mínimo de agentes necesarios para cubrir la demanda, sin embargo, por el momento se cuenta con solo 25 por turno. A continuación, se muestran los resultados del modelo MCLP bi-objetivo desarrollado para obtener las localizaciones de  $p=25$  agentes que maximicen ambos objetivos. Con el propósito de facilitar las comparaciones y el entendimiento del alcance de las soluciones los niveles de las funciones objetivos se expresan en por ciento de cumplimiento. Para ello se calcularon los máximos niveles en cantidad de personas y en valor del patrimonio de cada objetivo y cada solución se expresa en por ciento respecto a estas cantidades.

### MCLP bi-objetivo con un radio de 30 metros, 25 postas de día (parámetro Noche en 0)

La solución ideal para el problema bi-objetivo es alcanzar un 57,23 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 72,49 % del objetivo 2, la cual es inalcanzable. Luego, se pretende encontrar una solución que esté lo más cercana posible a la ideal. Al variar los parámetros  $w_1$  y  $w_2$  en un paso de 0.1 el balance entre los mismos se observa en la figura 3; además en la figura 4 se observa la relación de cada una de las soluciones con el punto ideal. Y la solución, es decir, las localizaciones óptimas para el problema, al considerar la misma importancia para cada objetivo ( $w_1 = 0.5$ ) alcanzan un 56,37 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 71,10 % del objetivo 2.

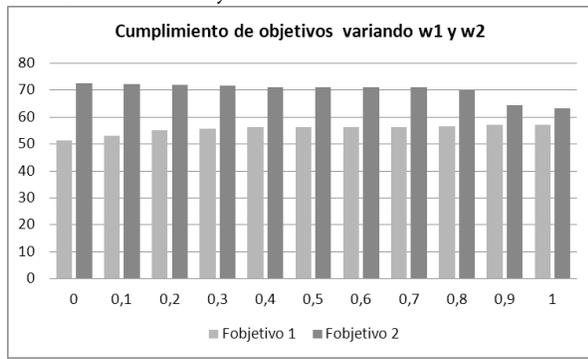


Figura 3. Trade-off entre  $w_1$  y  $w_2$  con  $p = 25$ ,  $r = 30$  de día

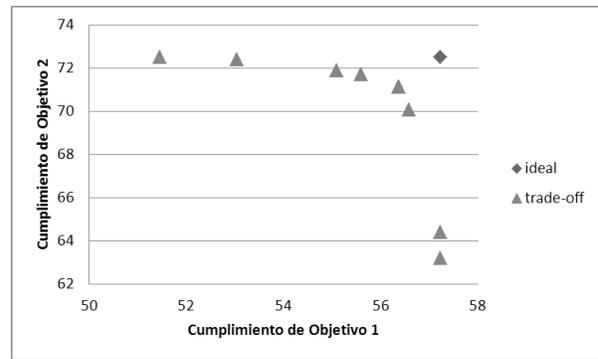


Figura 4. Punto ideal y trade-off entre  $w_1$  y  $w_2$

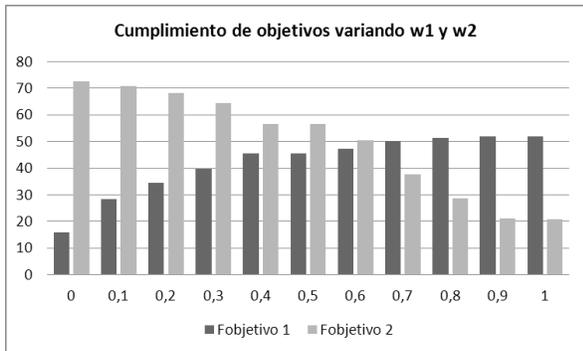


Figura 5. Trade-off entre w1 y w2 con p = 25, r = 30 de noche

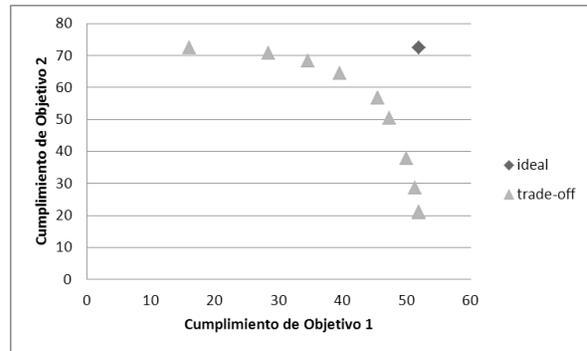


Figura 6. Punto ideal y trade-off entre w1 y w2

### MCLP bi-objetivo con un radio de 30 metros, 25 postas de noche (parámetro Noche en 1)

La solución ideal es alcanzar un 51,98 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 72,49 % del objetivo 2. En la figura 5 se observa el trade-off entre w1 y w2 y en la figura 6 la relación con el punto ideal. Y la solución óptima, al considerar  $w_i = 0.5$ , alcanzan un 45,52 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 56,58 % del objetivo 2.

### MCLP bi-objetivo con un radio de 90 metros, 25 postas de día (parámetro Noche en 0)

Siguiendo la misma metodología ahora con  $r = 90$  m. La solución ideal es alcanzar un 93,45 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 93,32 % del objetivo 2. En la figura 7 se observa el trade-off entre w1 y w2 y la relación de las soluciones con el punto ideal. Para este caso las localizaciones óptimas (figura 9), al considerar la misma importancia para cada objetivo alcanzan un 93,45 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 91,54 % del objetivo 2.

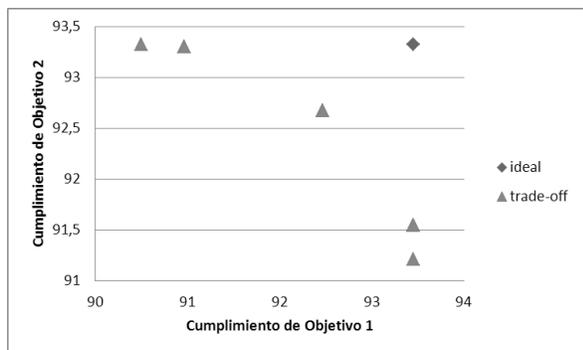


Figura 7. Ideal y trade-off entre  $w_i$  con p =25, r =90 de día

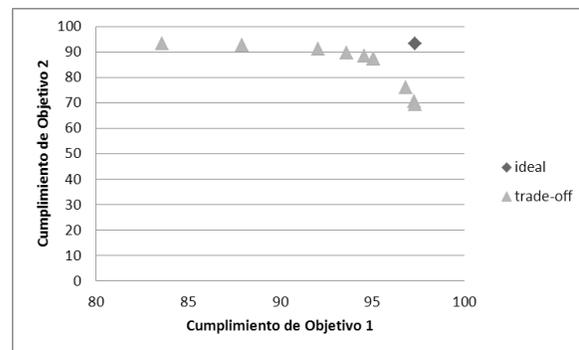


Figura 8. Ideal y trade-off entre  $w_i$  con p =25, r =90 de noche

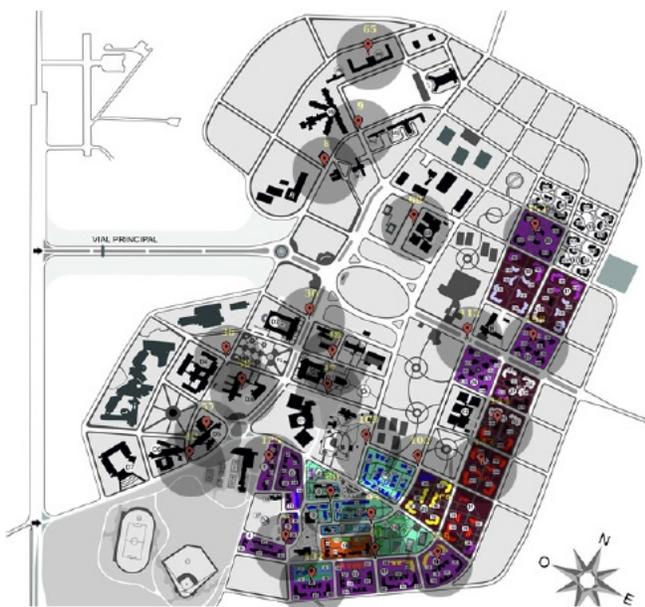


Figura 9. Solución MCLP 90m 25p día con  $w_1=0,5$

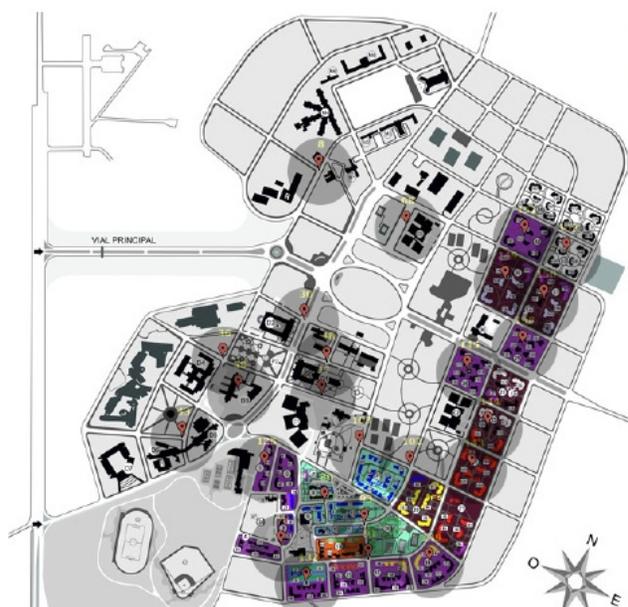


Figura 10. Solución MCLP 90m 25p noche con  $w_1=0,5$

### MCLP bi-objetivo con un radio de 90 metros, 25 postes de noche (parámetro Noche en 1)

La solución ideal es alcanzar un 97,30 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 93,32 % del objetivo 2. En la figura 8 se observa el trade-off entre  $w_1$  y  $w_2$  y la relación de las soluciones con el punto ideal. Las localizaciones óptimas para al considerar la misma importancia para cada objetivo se observan en la figura 10, y alcanzan un 95,06 % de cumplimiento del objetivo 1 y un 87,32 % del objetivo 2. Al comparar las soluciones del modelo propuesto con las ubicaciones actuales se puede observar en la tabla 1 que el modelo propuesto para  $r = 30$  logra cumplir, en promedio, un 43,25 % más de los objetivos (maximizar la población a proteger y maximizar el patrimonio a proteger) que la ubicación actual de las postas que utiliza el sistema de seguridad y protección.

Tabla 1. Comparación con la solución del MCLP con  $r = 30$

Modelo de día	% de cumplimiento de:	
	Objetivo 1	Objetivo 2
Variante actual.	18,717	12,353
Solución del modelo propuesto	56,379	71,107
Modelo de noche	Objetivo 1	Objetivo 2

Tabla 2. Comparación con la solución del MCLP con  $r = 90$

Modelo de día	% de cumplimiento de:	
	Objetivo 1	Objetivo 2
Variante actual.	37,355	26,474
Solución del modelo propuesto	93,451	91,546
Modelo de noche	Objetivo 1	Objetivo 2

De forma análoga se puede verificar en la tabla 2 que el modelo propuesto para  $r = 90$  logra cumplir, en promedio, un 62,25 % más que la ubicación actual (para igual radio) y si se analizan cada una de las combinaciones por separado, se puede ver que todas las soluciones de los modelos MCLP bi-objetivos

superan a la ubicación actual, la solución de menor diferencia (supera a la actual en un 32 %) es la que corresponde a  $r = 30$  de noche en el objetivo 1.

Se observa que la distribución actual localiza los agentes en forma de anillo y tiende más a proteger el perímetro, pero así no tiene en cuenta si el delito se genera dentro de la universidad o si penetran el anillo sin ser detectado. En estos casos es poco probable que puedan actuar frente a esta amenaza; además, la distribución con este enfoque tampoco ha sido efectiva en impedir que se penetre este anillo. La función de un agente de seguridad no es solo contra el delito, pues debe conocer la ubicación y el uso de los medios de extinción de incendios (MININT, 2001), dada su ubicación actual, es poco probable que detecten o puedan actuar oportunamente frente a una amenaza de esta índole.

Al analizar las coincidencias entre la variante actual y, por ejemplo, la solución del modelo MCLP bi-objetivo con 90 metros, 25 postas disponibles de día, es muy bajo el nivel de coincidencia, solo 3 ubicaciones coinciden. Ello constituye una alerta, pues, aunque se utiliza la experiencia de los implicados para organizar la solución actual, por definición, el objetivo de un sistema de seguridad y protección física es también el de proteger el personal y el patrimonio, que son los objetivos utilizados en los modelos propuestos, por lo que se esperaba un mayor grado de coincidencia. Al comparar las soluciones de los modelos para los casos día y noche, con  $r = 90$ , se puede observar en las figuras 9 y 10 que los modelos responden al cambio del parámetro Noche, sin embargo, debe valorarse lo que ocurre a esas horas en la zona Oeste-Noroeste (parte productiva) ya que se localizan pocas postas en ella. No todas las estructuras presentes en esta zona son propias de la universidad (son de terceros), entonces se tendría que valorar si la universidad asume la protección de estos locales, por lo que el decisor tendría que localizar más postas en ella o usar la variante de día que otorga más peso a esta zona. Para  $r=30$  se comporta análogamente.

Aunque en ocasiones al variar  $w_i$  se obtienen iguales soluciones, se comprueba que con solo variar el paso de  $w_i$  el modelo es sensible obteniéndose soluciones distintas. Al considerar el significado de los objetivos se propone usar solo los valores (0, 1) para etapas vacacionales o recesos (cuando la cantidad de personas disminuye drásticamente) ya que se comprobó que el modelo cambia la distribución dándole la máxima importancia al objetivo correspondiente y usar el valor 0.5 para etapas normales. Al analizar los trade-off entre ambos objetivos (figuras 4, 6, 7 y 8), no siempre coincide el peso  $w_1 = 0.5$  con la solución más pareja. Sin embargo, en los puntos ideales ambos objetivos también difieren, a su vez, las soluciones de cada problema con  $w_1 = 0.5$  están entre las más cercanas a sus puntos ideales, por lo que el desempeño del modelo bi-objetivo respecto a la función objetivo unificada puede considerarse adecuado.

Dado que se tiene el número mínimo necesario para cubrir la demanda según el LSCP. Se puede completar la diferencia entre este mínimo y la cantidad de agentes si se utiliza la guardia obrera con la solución del MCLP bi-objetivo como referencia o si con la guardia obrera no se puede llegar al mínimo necesario, se puede adicionar a la cantidad de agentes la cantidad de la guardia obrera y obtener una nueva solución con el MCLP bi-objetivo para este valor de  $p$ .



## Conclusiones

Las soluciones obtenidas a partir de los modelos aplicados superan en al menos un 32 % a las ubicaciones actuales en cuanto al porcentaje de cumplimiento de los objetivos. Los modelos LSCP y MCLP bi-objetivo pueden ser usados para apoyar la representación de las decisiones en la planificación de un sistema de seguridad y protección. El MCLP bi-objetivo propuesto determina la ubicación óptima de un número predeterminado de agentes que maximiza la cobertura o protección a las personas y al patrimonio. La herramienta desarrollada permite la interacción del usuario con varios parámetros, permitiendo que puedan ser usados en conjunto los criterios del decisor y el modelo matemático. Es posible agregar a la herramienta un 3er objetivo, para maximizar además la cobertura a los nodos considerando la cantidad de incidencias obteniéndose un MCLP multiobjetivo más efectivo para abordar el problema tratado.

## Referencias

- Aeschbacher, B. (2012). Solving a Large Scale Integer Program with Open-Source-Software (Maestría). University of Zurich, Zurich.
- Başar, A., & Çatay, B. (2011). A multi-period double coverage approach for locating the emergency medical service stations in Istanbul. *JORS*, 62, 627–637. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.5>
- Başar, A., Çatay, B., & Ünlüyurt, T. (2012). A taxonomy for emergency service station location problem. *Optimization Letters*, 6(6), 1147–1160. <https://doi.org/10.1007/s11590-011-0376-1>
- Chanta, S., Mayorga, M. E., & McLay, L. A. (2014). Improving emergency service in rural areas: a bi-objective covering location model for EMS systems. *Annals of Operations Research*, 221(1), 133–159. <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0972-6>
- Church, R., & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32(1), 101–118. <https://doi.org/10.1007/BF01942293>
- Consejo de Estado, C. (1999). Decreto Ley No. 186. *Gaceta Oficial*, (35), 597.
- Curtin, K. M., Hayslett-McCall, K., & Qiu, F. (2010). Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models. *Networks and Spatial Economics*, 10(1), 125–145. <https://doi.org/10.1007/s11067-007-9035-6>
- Daskin, M. S., & Murray, A. T. (2012). Modeling Public Sector Facility Location Problems. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(2), 111. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2012.03.002>
- Dirección de Informatización. (2016). Directorio UCI [Directorio de personas]. UCI: Dirección de Informatización. Recuperado a partir de <http://directorio.uci.cu/>
- Director de Seguridad y Protección. (2012). Informe de Seguridad, Protección y Defensa para la entrega del cargo del Rector. UCI: Universidad de las Ciencias Informáticas.
- Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M., & Goh, M. (2012). Covering Problems in Facility Location: A Review. *Comput. Ind. Eng.*, 62(1), 368–407. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020>
- Ferrand, Y., Magazine, M., Rao, U. S., & Glass, T. F. (2011). Building Cyclic Schedules for Emergency Department Physicians. *Interfaces*, 41(6), 521–533. <https://doi.org/10.1287/inte.1110.0563>



- GEYSED. (2013). SIG UCI. UCI: GEYSED. Recuperado a partir de <http://siguci.uci.cu/>
- Grupo de Activos Fijos. (2014). Activos Fijos por Centros de Costo-Clasificación (Listado Resumen). Departamento de contabilidad: UCI.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*, 12(3), 450–459. <https://doi.org/10.1287/opre.12.3.450>
- Hale, T. S., & Moberg, C. R. (2003). Location Science Research: A Review. *Annals of Operations Research*, 123(1-4), 21–35. <https://doi.org/10.1023/A:1026110926707>
- Li, X., Zhao, Z., Zhu, X., & Wyatt, T. (2011). Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review. *Mathematical Methods of Operations Research*, 74(3), 281–310. <https://doi.org/10.1007/s00186-011-0363-4>
- Lin, S., Xiang-lin, W., Yue, L., Yong-Zhe, S., & Hui, Q. (2013). Study on Multi-objective Location of Distribution Center Based on Covering. *KOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.11591/telkonnika.v11i1.1915>
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369–395. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6), 853–862. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7>
- Mason, A., & Dunning, I. (2012). OpenSolver for Excel. University of Auckland. Recuperado a partir de <http://opensolver.org/>
- MININT, C. (2001). Reglamento sobre el sistema de seguridad y protección física.
- Murray, A. T. (2013). Optimising the spatial location of urban fire stations. *Fire Safety Journal*, 62, Part A, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.002>
- Murray, A. T., Kim, K., Davis, J. W., Machiraju, R., & Parent, R. (2007). Coverage optimization to support security monitoring. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(2), 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2006.06.002>
- Ordóñez, F., Tambe, M., Jara, J. F., Jain, M., Kiekintveld, C., & Tsai, J. (2013). Deployed Security Games for Patrol Planning. En J. W. Herrmann (Ed.), *Handbook of Operations Research for Homeland Security* (pp. 45–72). Springer New York. Recuperado a partir de [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-5278-2\\_3](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-5278-2_3)
- Pupo, C. T., & Olivera, D. A. (2015). Calculadora de distancias y visualización de soluciones de problemas de localización (Versión 1.1). La Habana.
- ReVelle, C. S., & Eiselt, H. A. (2005). Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.032>
- Rocher, F. B. (2012, octubre). Nuevos Modelos Probabilísticos de Localización de Servicios de Emergencias (Doctor). Universidad Miguel Hernández, España. Recuperado a partir de <http://dspace.umh.es/handle/11000/677>
- Secretaría de Estado de seguridad. (2012). Programas de formación del personal de seguridad privada. Boletín Oficial del estado España, 296(1), 84621–84645.



- Snyder, L. V. (2011). Covering Problems. En H. A. Eiselt & V. Marianov (Eds.), *Foundations of Location Analysis* (Vol. 155, pp. 109–135). Springer US. Recuperado a partir de <http://www.springerlink.com/content/171068021485806t/>
- Solano-Pinzón, N., Pinzón-Marroquín, D., & Guerrero, W. J. (2017). Modelos de localización de cámaras de vigilancia en una red de transporte público masivo. *Ingeniería y Ciencia*, 13(25), 71-93. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.25.3>
- Stanimirovic, I. P., Zlatanovic, M. L., & Petkovic, M. D. (2011). On the linear weighted sum method for multi-objective optimization. *Facta Acta Universitatis*, 26, 49–63.
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research*, 19(6), 1363–1373. <https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>
- Tricoire, F., Graf, A., & Gutjahr, W. J. (2012). The bi-objective stochastic covering tour problem. *Computers & Operations Research*, 39(7), 1582–1592. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.009>
- UCI. Instrucción para la organización y realización de la GOE (2014).

