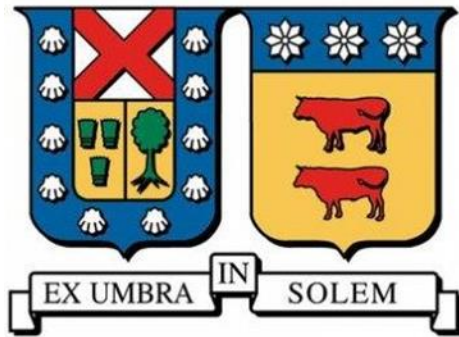




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**ESTUDIO DE LOCALIZACION PARA UN TERMINAL DE BUSES EN LA
COMUNA DE SANTO DOMINGO REGION DE VALPARAISO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR: CRISTIAN ANTONIO LAGOS CORDERO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. PABLO ESCALONA R.

PROFESOR CORREFERENTE: MS.C. ING. ISMAEL KAUAK V.

SANTIAGO, 18 DE MAYO DE 2023

A mi hija Beatriz, nunca es tarde para lograr nuestras metas.

Agradecimientos

A mi esposa, Carla, por su amor, paciencia y apoyo en esta etapa.

A mi familia, por su constante aliento y cariño.

A los profesores Pablo Escalona e Ismael Kauak, por ayudarme a desarrollar el presente trabajo.

Resumen ejecutivo

En el presente trabajo se realiza un estudio para encontrar la mejor alternativa de localización de un terminal de buses en la comuna de Santo Domingo, región de Valparaíso. Comuna que en la actualidad no cuenta con un terminal de buses, instalación indispensable para facilitar el transporte de los habitantes de la comuna, y con ello el acceso a distintos servicios fundamentales para el desarrollo de las personas.

El estudio se realiza considerando la normativa vigente para dimensionar y categorizar el terminal de buses, y así determinar las localizaciones factibles en que se puede instalar un terminal. Se recopilan los antecedentes necesarios, como lo son la demanda y costos sociales del tiempo, para definir los parámetros de decisión.

Para la resolución del problema se utiliza el modelo de optimización llamado Bus Terminal Location Problem, (BTLP), el cual permite encontrar la localización que maximiza la cobertura y el nivel de servicio entregado.

Finalmente se determina la localización que maximiza la cobertura y el nivel de servicio, realizando además un análisis de sensibilidad, concluyendo que si bien este estudio entrega una solución factible.

Índice de Contenidos

1.	Problema de investigación	10
2.	Objetivos	12
2.1.	Objetivo general	12
2.2.	Objetivos específicos	12
3.	Marco Teórico	13
3.1.	Problema de cobertura máxima	13
3.1.1.	Conjuntos MCLP	13
3.1.2.	Parámetros MCLP	13
3.1.3.	Variables MCLP	14
3.1.4.	Modelo compacto MCLP	14
3.2.	Problema de cobertura generalizada	15
3.2.1.	Conjuntos WBMC	18
3.2.2.	Parámetros WBMC	19
3.2.3.	Variables WBMC	19
3.2.4.	Modelo compacto WBMC	20
3.3.	Problema de cobertura gradual	21
3.4.	Bus Terminal Location Problem (BTLT).....	23
3.5.	Métodos de resolución para el problema de optimización lineal entero.....	24
3.5.1.	Branch and Bound	25
3.5.2.	Cortes de Gomory	26
3.5.3.	Heurística Greedy	27
3.5.4.	Enumeración total	28

3.6.	Dimensionamiento, categorización y localización de terminales de buses.....	29
3.6.1.	Dimensionamiento	29
3.6.2.	Categorización	30
3.6.3.	Localización	30
3.7.	Valor del tiempo para las personas	31
3.8.	Velocidad de Operación según modo de Transporte	32
4.	Descripción y formulación del problema	34
4.1.	Conjuntos	34
4.2.	Parámetros	35
4.3.	Variables	35
4.4.	Modelo compacto	36
5.	Estudio computacional	38
5.1.	Recopilación de antecedentes	38
5.1.1.	Conjuntos	38
5.1.1.1.	Nodos de demanda i	38
5.1.1.2.	Nodos candidato j	40
5.1.2.	Parámetros	47
5.1.2.1.	Distancia d_{ij}	47
5.1.2.2.	Distancias s , t y r para niveles de servicio w_s , w_t y w_r	47
5.1.2.3.	Demanda h_i	48
5.1.2.4.	Pesos relativos para cada nivel de servicio w_s , w_t y w_r	48
5.1.2.5.	Restricción presupuestaria p	51
5.2.	Resolución del problema	51

5.2.1.	Solver y Equipo utilizado.....	52
5.2.2.	Resultados	52
6.	Análisis de sensibilidad.....	55
7.	Conclusiones.....	57
8.	Referencias	62
9.	Anexos	64
9.1.	Coordenadas Nodos Demanda i	64
9.2.	Coordenadas Nodos Candidatos j	66
9.3.	Distancia entre Nodos Demanda i y Nodos Candidatos j	67
9.4.	Demanda Nodos Demanda i.....	70
9.5.	Población Santo Domingo según CENSO 2017 (INE, 2017).....	72
9.6.	Código AMPL Problema.....	73
9.7.	Código AMPL Sensibilización.....	87

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Nivel de servicio MCLP	15
Gráfico 2: WBMC para nivel de servicio $w_t > w_r > w_s$	16
Gráfico 3: WBMC para nivel de servicio $w_t > w_s > w_r$	17
Gráfico 4: WBMC para nivel de servicio $w_s > w_t > w_r$	17
Gráfico 5: WBMC para nivel de servicio $w_r > w_t > w_s$	18
Gráfico 6: Nivel de servicio cobertura gradual	22
Gráfico 7: Localización elegida y nivel de servicio respecto a la distancia media	58
Gráfico 8: Correlación entre el nivel de servicio global y la distancia media.....	59

Índice de Tablas

Tabla 1: Factor de estacionamiento	29
Tabla 2: Categoría de terminal de buses según superficie	30
Tabla 3: Uso de suelos y vía de acceso según categoría	31
Tabla 4: Valor social del tiempo para zonas urbanas. Año 2022	32
Tabla 5: Velocidad de operación según modo de transporte.....	33
Tabla 6: Definición de periodos según hora media del viaje	33
Tabla 7: Uso de suelos y vía de acceso para categoría B1	43
Tabla 8: Costo social de recorrer la distancia.....	49
Tabla 9: Beneficio social de recorrer una menor distancia	50
Tabla 10: Pesos relativos según nivel de servicio	50
Tabla 11: Nodo candidato escogido y sus coordenadas espaciales	52
Tabla 12: Función objetivo y coberturas.....	54
Tabla 13: Valores de distancia para cada sensibilización	55
Tabla 14: Resultados para cada sensibilización	56
Tabla 15: Coberturas para cada sensibilización	56

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Algoritmo Branch and Bound	25
Ilustración 2: Algoritmo de Gomory.....	26
Ilustración 3: Algoritmo Greedy.....	27
Ilustración 4: Algoritmo de Enumeración Total.....	28
Ilustración 5: Nodos demanda i	39
Ilustración 6: Zonas uso de suelos según PRC Santo Domingo.....	44
Ilustración 7: Terrenos disponibles.....	45
Ilustración 8: Nodos candidato j	46
Ilustración 9: Plano de cobertura para cada nivel de servicio	53
Ilustración 10: Mapa de densidad poblacional	60

1. Problema de investigación

La comuna de Santo Domingo fue fundada el 16 de enero de 1946, inicialmente con el nombre de Rocas de Santo Domingo. Se ubica en la provincia de San Antonio, Región de Valparaíso. Tiene un territorio de 536 [km²], y su población para el año 2017, de 10.900 personas (INE, 2017).

El Estudio de actualización del Plan Regulador comunal de Santo Domingo (Urbe, 2020) señala que, si bien la comuna tiene un territorio extenso, su topografía es bastante irregular, por lo que esto dificulta el desarrollo de actividades económicas que requieren superficies planas, tales como: la agricultura y la silvicultura, las cuales se realizan en menor escala. Por el contrario, actividades económicas como la avicultura y el turismo se realizan en mayor medida, ya que se ven beneficiadas por el clima y sus 20 [km] de costa, siendo la más extensa del litoral central.

La mayoría de las actividades económicas que realiza la población de la comuna de Santo Domingo, dependen de la comuna vecina de San Antonio, en que la distancia entre sus centros cívicos es aproximadamente de 10 [km]. Es en la comuna de San Antonio donde se encuentran las principales fuentes laborales y la mayoría de los servicios, de los habitantes de la comuna de Santo Domingo. Por otra parte, para acceder a servicios tan fundamentales para el desarrollo y bienestar de las personas, como lo son la educación y la salud, los habitantes de la comuna deben viajar a las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar (dentro de la misma región), y a la Región Metropolitana, lo que implica recorrer distancias de magnitudes mayores a mencionada anteriormente.

Para transportarse a la comuna de San Antonio y hacia otros destinos, los habitantes de la comuna utilizan principalmente sus automóviles privados. Secundariamente utilizan taxis colectivos y un precario sistema de transporte de buses que cuenta con 2 recorridos locales, no existiendo un servicio interregional de transporte colectivo, menos un terminal de buses.

Esta precariedad de transporte colectivo influye directamente sobre las desigualdades territoriales, la calidad de vida, la salud pública, las oportunidades económicas, y lo más esencial, sobre la dignidad de las personas en su día a día.

Dado lo anterior, nace la necesidad de potenciar el transporte colectivo, y para ello, se hace indispensable la construcción de un terminal de buses que propicie y facilite el transporte de los habitantes de la comuna de Santo Domingo, desde y hacia la comuna vecina de San Antonio, así como a otras comunas y regiones del país.

Con lo expuesto anteriormente, y la necesidad de implementar un terminal de buses, nace la siguiente interrogante: ¿Cuál es la localización para un terminal de buses, que maximice la cobertura y el nivel de servicio de los usuarios?

En el presente trabajo se realiza un estudio de localización para un terminal de buses en la comuna de Santo Domingo, en donde se busca maximizar la cobertura de usuarios, para ello se utiliza un modelo de optimización BTLP, Bus Terminal Localization Problem.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Determinar la localización óptima para un terminal de buses en la comuna de Santo Domingo ubicado en la región de Valparaíso, a través de un modelo de optimización que maximice la cantidad de usuarios que utilizarán el terminal y el nivel de satisfacción que perciben estos al recorrer una menor distancia para llegar a dicho terminal (nivel de servicio).

2.2. Objetivos específicos

- Identificar la demanda potencial de viajes para cada manzana, y referenciarlas coordenadamente, de la zona urbana de la comuna de Santo Domingo.
- Determinar alternativas de localización factibles para la implementación de un terminal de buses y referenciarlas coordenadamente.
- Cuantificar justificadamente el costo que tiene para una persona recorrer una distancia de 1[km].
- Determinar la mejor alternativa de localización, que maximice la cantidad de usuarios que utilizarán el terminal y el nivel de servicio percibido por ellos.

3. Marco Teórico

3.1. Problema de cobertura máxima

El problema de cobertura máxima, o en inglés Maximal Covering Location Problem (Church & ReVelle, 1974), también llamado MCLP, permite encontrar la localización óptima para la instalación de servidores, de tal manera que maximice la cantidad de personas cubiertas por los servidores elegidos.

Este problema tiene dos restricciones relevantes: una que corresponde a la distancia máxima que los usuarios están dispuestos a recorrer, también llamada nivel de servicio; y una restricción presupuestaria, que consiste en una cantidad determinada de servidores que se pueden instalar.

A continuación, se muestra la formulación matemática del MCLP:

3.1.1. Conjuntos MCLP

- I : nodos de demanda
- J : nodos candidatos para instalar el o los servidores de la demanda
- N_i : conjunto de nodos vecindad en que la distancia entre el nodo demanda i y el nodo candidato j es menor a s .

$$N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq s\} \forall i \in I$$

3.1.2. Parámetros MCLP

- s : distancia máxima a la que puede estar ubicado un servidor de un nodo demanda, para que este se considere cubierto
- d_{ij} : distancia mínima entre el nodo de demanda i y el nodo candidato j

- h_i : demanda del nodo i
- p : número máximo de servidores que se pueden instalar

3.1.3. Variables MCLP

- $x_j = \begin{cases} 1, & \text{si se instala un servidor en el nodo } j \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$
- $y_i = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto por al menos un servidor } j \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$

3.1.4. Modelo compacto MCLP

$$\max_{x,y} \sum_{i \in I} h_i y_i \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (3)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

donde:

(1) La función objetivo busca maximizar la demanda cubierta, en donde se priorizan los nodos con mayor demanda h_i .

(2) Indica que el nodo i sólo puede estar cubierto en un radio s , si existe algún servidor instalado en su vecindad N_i

(3) Cantidad máxima de servidores a instalar: no se pueden instalar más de p servidores en el conjunto de nodos candidatos.

(4) (5) Integrabilidad de las variables: corresponde al conjunto de números al que pertenecen las variables, que en este caso son binarias.

3.2. Problema de cobertura generalizada

En la modelación del problema MCLP, se asume que un nodo demanda está cubierto en un nivel de servicio del 100% ($c_{ij}=1$) si la distancia d_{ij} entre el nodo demanda i y el nodo servidor j es menor a s (distancia de cobertura); o no lo está (nivel de servicio del 0%) distancia entre el nodo demanda y el nodo servidor es mayor a s . Un todo o nada.

Gráfico 1: Nivel de servicio MCLP



En donde el nivel de servicio

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & | d_{ij} \leq s \\ 0 & | d_{ij} > s \end{cases}$$

(Fuente: Elaboración propia)

En la realidad esta situación ocurre muy pocas veces, o prácticamente nunca, ya que la percepción de las personas es relativa y el nivel de satisfacción de servicio es variable en distintos rangos de distancia.

Por lo anterior, es que el problema gradual, incluye un parámetro que modela distintos niveles de servicio en función de la distancia.

Church y Roberts, modelaron este problema discretamente, con funciones de cobertura escalonadas. A este modelo lo llamaron de cobertura máxima de beneficio

ponderado, o en inglés Weighted Benefit Maximal Coverage Model (Church & Roberts, 1983). En donde para distintas distancias se tienen distintos niveles de servicio.

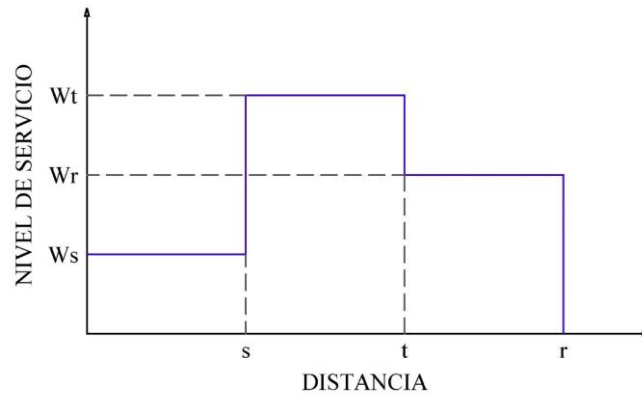
A continuación, se muestra un ejemplo de modelado con una función escalonada para 3 niveles de servicio, distintas combinaciones.

El nivel de servicio, para cada tramo de distancia, se define como:

$$c_{ij} = \begin{cases} w_s & | d_{ij} \leq s \\ w_r & | s < d_{ij} \leq t \\ w_t & | t < d_{ij} \leq r \\ 0 & | d_{ij} > r \end{cases}$$

Y distintas combinaciones, para situaciones distintas, se podrían ponderar cualitativamente como se muestra a continuación:

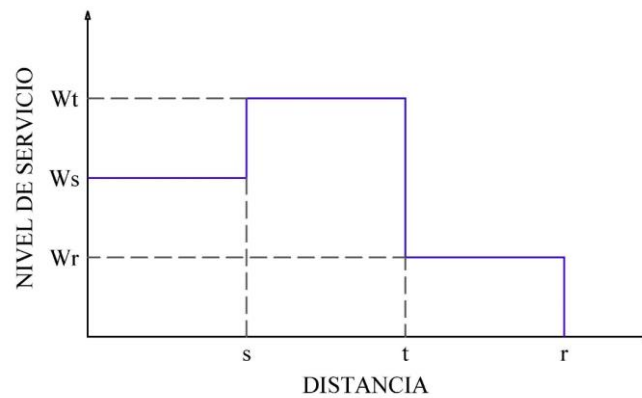
Gráfico 2: WBMC para nivel de servicio $w_t > w_r > w_s$



(Fuente: Elaboración propia)

En Gráfico 2 se observa que para distancias entre s y t , el nivel de servicio w_t es el mayor de esta combinación. Seguido del nivel de servicio w_r , el cual se obtiene de las distancias entre t y r . En tercer lugar se encuentra el nivel de servicio w_s , para distancias menores a s . Finalmente, para distancias mayores a r , el nivel de servicio es 0.

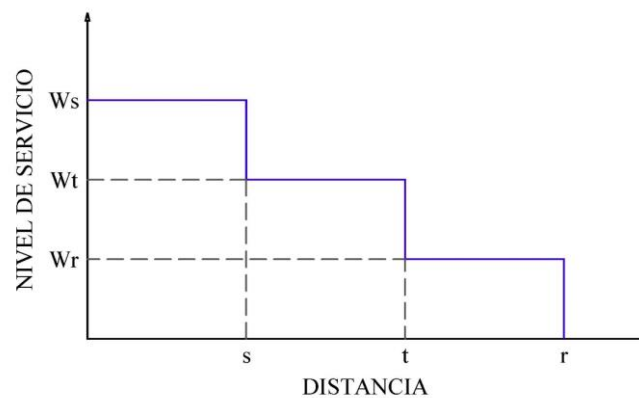
Gráfico 3: WBMC para nivel de servicio $w_t > w_s > w_r$



(Fuente: Elaboración propia)

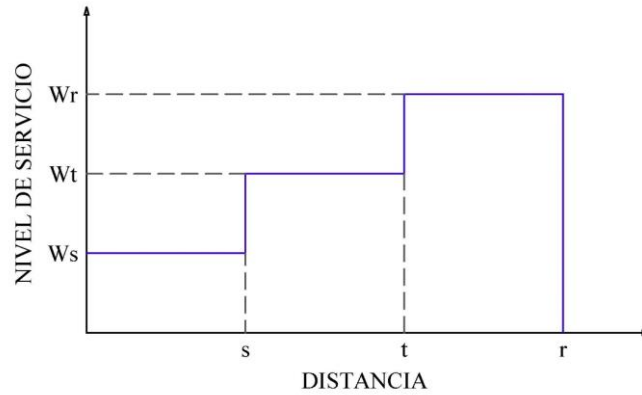
En Gráfico 3 se observa que para distancias entre s y t , el nivel de servicio w_t es mayor que el mayor obtenido en esta combinación. Seguido del nivel de servicio w_s , el cual se obtiene en distancias menores a s . En tercer lugar se encuentra el nivel de servicio w_r , para distancias entre t y r . Finalmente, para distancias mayores a r , el nivel de servicio es 0.

Gráfico 4: WBMC para nivel de servicio $w_s > w_t > w_r$



(Fuente: Elaboración propia)

En Gráfico 4 se observa que el nivel de servicio decrece a medida que las distancias son mayores. Para distancias mayores a r , el nivel de servicio es 0.

Gráfico 5: WBMC para nivel de servicio $w_r > w_t > w_s$ 

(Fuente: Elaboración propia)

En Gráfico 5 se observa que el nivel de servicio decrece a medida que la distancia es menor. Sin embargo para distancias mayores a r , el nivel de servicio es 0.

Del ejemplo expuesto anteriormente, la formulación matemática queda:

3.2.1. Conjuntos WBMC

- I : nodos de demanda
- J : nodos candidatos para instalar el o los servidores de la demanda
- N_i : conjunto de nodos vecindad en que la distancia entre el nodo demanda i y el nodo candidato j se encuentra entre 0 y s .

$$N_i = \{j \in J | d_{ij} \leq s\} \forall i \in I$$

- M_i : conjunto de nodos vecindad en que la distancia entre el nodo demanda i y el nodo candidato j se encuentra entre s y t .

$$M_i = \{j \in J | s \leq d_{ij} \leq t\} \forall i \in I$$

- U_i : conjunto de nodos vecindad en que la distancia entre el nodo demanda i y el nodo candidato j se encuentra entre t y r .

$$U_i = \{j \in J | t \leq d_{ij} \leq r\} \forall i \in I$$

3.2.2. Parámetros WBMC

- s : distancia máxima a la que puede estar ubicado un servidor de un nodo demanda, para que este se considere cubierto con un nivel de servicio w_s
- t : distancia máxima a la que puede estar ubicado un servidor de un nodo demanda, para que este se considere cubierto con un nivel de servicio w_t
- r : distancia máxima a la que puede estar ubicado un servidor de un nodo demanda, para que este se considere cubierto con un nivel de servicio w_r
- d_{ij} : distancia mínima entre el nodo de demanda i y el nodo candidato j
- h_i : demanda del nodo i
- w_s : nivel de servicio entregado para cobertura entre distancias d_{ij} , entre 0 y s
- w_t : nivel de servicio entregado para cobertura entre distancias d_{ij} , entre s y t
- w_r : nivel de servicio entregado para cobertura entre distancias d_{ij} , entre t y r
- p : número máximo de servidores que se pueden instalar

3.2.3. Variables WBMC

- $x_j = \begin{cases} 1, & \text{si se instala el servidor en el nodo } j \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$
- $y_i = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto con un nodo } j, \text{ con nivel de servicio } w_s \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$
- $z_i = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto con un nodo } j, \text{ con nivel de servicio } w_t \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$

- $q_i = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto con un nodo } j, \text{ con nivel de servicio } w_r \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$

3.2.4. Modelo compacto WBMC

$$\max_{x,y,z,q} \sum_{j \in J} w_s h_i y_i + w_t h_i z_i + w_r h_i q_i \quad (6)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{j \in M_i} x_j \geq z_i, \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$\sum_{j \in U_i} x_j \geq q_i, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$y_i + z_i + q_i \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (11)$$

$$y_j, z_i, q_i \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (12)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (13)$$

donde:

(6) La función objetivo busca maximizar la cobertura de la demanda, priorizando los nodos con mayor demanda h_i , y que se encuentren a menor distancia (y por lo tanto mayor nivel de servicio w). Es por esto que la función objetivo es una multiplicación, en que los parámetros que la maximizan son los que tengan mayor demanda h_i y nivel de servicio w .

(7) Indica que el nodo i sólo puede estar cubierto en un radio s , si existe algún servidor instalado en la vecindad N_i

(8) Indica que el nodo i sólo puede estar cubierto en un radio entre s y t , si existe algún servidor instalado en la vecindad M_i

(9) Indica que el nodo i sólo puede estar cubierto en un radio entre t y r , si existe algún servidor instalado en la vecindad U_i

(10) Esta restricción indica que los nodos demanda pueden ser cubiertos por sólo una distancia (entre $0-s$, entre $s-t$, o entre $t-r$).

(11) Cantidad máxima de servidores a instalar: no se pueden instalar más de p servidores en el conjunto de nodos candidatos.

(12) (13) Integrabilidad de las variables: corresponde al conjunto de números al que pertenecen las variables, que en este caso son binarias.

3.3. Problema de cobertura gradual

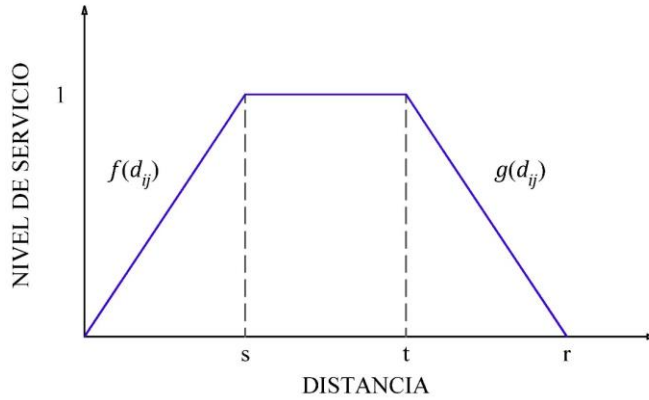
Si bien, la modelación del nivel de servicio con funciones escalonadas es una mejor aproximación a la realidad de determinados problemas, una forma alternativa es modelar el nivel de servicio de manera continua.

Es así como Drezner, Wesolowsky y Drezner, proponen una modelación del nivel de servicio con una función lineal en tramos, pero con uno o varios tramos con funciones crecientes y/o decrecientes (Drezner et al., 2004).

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo quedaría la modelación para niveles de servicio dependientes de la distancia.

$$c_{ij} = \begin{cases} w_s = f(d_{ij}) = \left(\frac{1}{s}\right) d_{ij} & | d_{ij} \leq s \\ w_t = 1 & | s < d_{ij} \leq t \\ w_r = g(d_{ij}) = 1 - \left(\frac{1}{r-t}\right) d_{ij} & | t < d_{ij} \leq r \\ 0 & | d_{ij} > r \end{cases}$$

Gráfico 6: Nivel de servicio cobertura gradual



En donde el nivel de servicio

$$c_{ij} = \begin{cases} f(d_{ij}) & | d_{ij} \leq s \\ 1 & | s < d_{ij} \leq t \\ g(d_{ij}) & | t < d_{ij} \leq r \\ 0 & | d_{ij} > r \end{cases}$$

(Fuente: Elaboración propia)

En Gráfico 6 se observa que el nivel de servicio w_s para distancias entre 0 y s es una función lineal creciente que comienza en 0 hasta llegar a 1 (100%). Entre las distancias s y t , el nivel de servicio w_t es de 1 (100%). Entre las distancias t y r , el nivel de servicio w_r es una función lineal decreciente que comienza en 1 (100%) hasta llegar a 0. Finalmente, para distancias mayores a r , el nivel de servicio es 0.

La formulación del problema de cobertura gradual es exactamente la misma que el modelo de cobertura generalizada WBMC. En su desarrollo se debe utilizar la misma estructura de conjuntos, parámetros, variables y función objetivo, modificando solo el parámetro nivel de servicio.

3.4. Bus Terminal Location Problem (BTLP)

El problema de la localización de terminales de buses, o en inglés Bus Terminal Location Problem (BTLP), es una aplicación específica de los problemas vistos anteriormente. En donde se busca encontrar la localización óptima para la instalación de los terminales de buses, de manera que maximice la cobertura y el nivel de servicio entregado a las personas. Todo esto sujeto a una restricción presupuestaria y que cumplan con el nivel de servicio requerido.

La literatura encontrada referente a este problema no define un autor, sino que lo menciona como una aplicación específica de los problemas de cobertura. Su formulación y planteamiento matemático, no se diferencia entre las publicaciones que lo abordan, sino que la diferencia se expresa en la resolución del problema, en donde los autores proponen principalmente métodos de solución heurísticos: Solving Bus Terminal Location Problem Using Genetic Algorithm (Babaie-Kafaki et al., 2006), Solving bus terminal location problems using evolutionary algorithms (Ghanbari & Mahdavi-Amiri, 2011), A genetic algorithm for solving bus terminal location problem using data envelopment analysis with multi-objective programming (Taghavi et al., 2021). En todos ellos se proponen algoritmos genéticos o de evolución, los cuales simulan procesos de selección natural para dar solución a problemas de optimización matemática, en donde básicamente se simula el ciclo de vida de un grupo de individuos, y como estos evolucionan para sobrevivir a las condiciones que representan las restricciones y la función objetivo.

Dado que el BTLP es una aplicación específica de los problemas mostrados anteriormente, es que el modelo de programación matemática que se utiliza es el mismo que

del problema de cobertura generalizada, si es que es que el nivel de servicio se considera discreto; o del problema gradual, si el modelo se considera continuo.

3.5. Métodos de resolución para el problema de optimización lineal entero

El problema de optimización lineal entero, también llamado IP (integer programming), es un caso particular de los problemas de optimización, en el que la solución requiere que sus variables sean enteras.

Si bien el método Simplex permite resolver el problema relajado de este tipo de problemas, entregando soluciones decimales o fraccionales, existen métodos para encontrar soluciones enteras. Algunos de estos métodos se muestran a continuación:

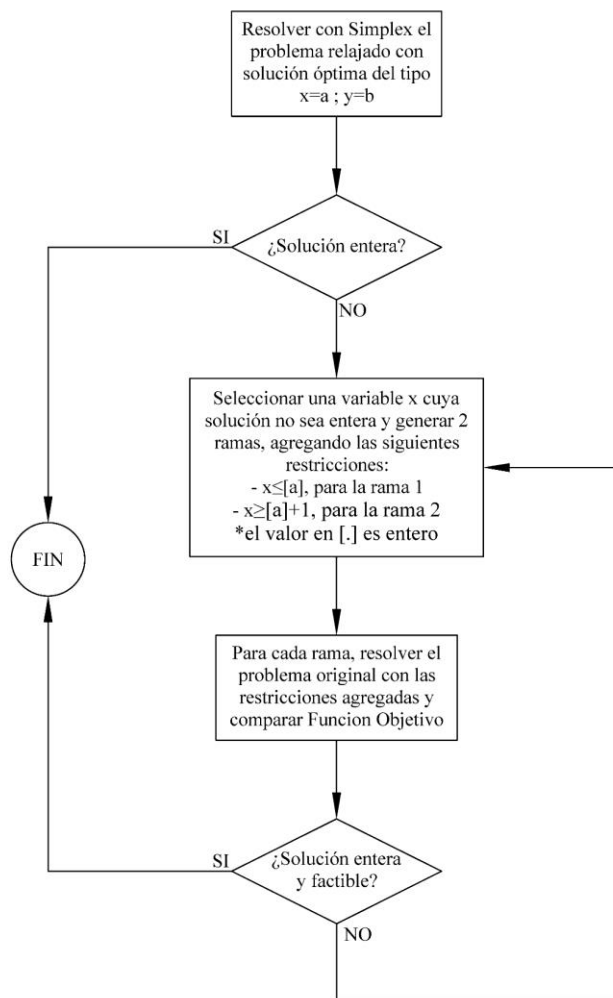
3.5.1. Branch and Bound

Método iterativo, que como lo dice su nombre, consistente en “ramificar y acotar” el problema. Se comienza con resolver el problema relajado, para luego ir generando ramas con un valor entero inferior y superior de una variable encontrada en el problema relajado, hasta cumplir con las restricciones planteadas y encontrar un valor optimo.

Este método fue propuesto por Land y Doing en 1960 (Jünger et al., 2010).

La Ilustración 1 muestra los pasos del Algoritmo Branch and Bound.

Ilustración 1: Algoritmo Branch and Bound



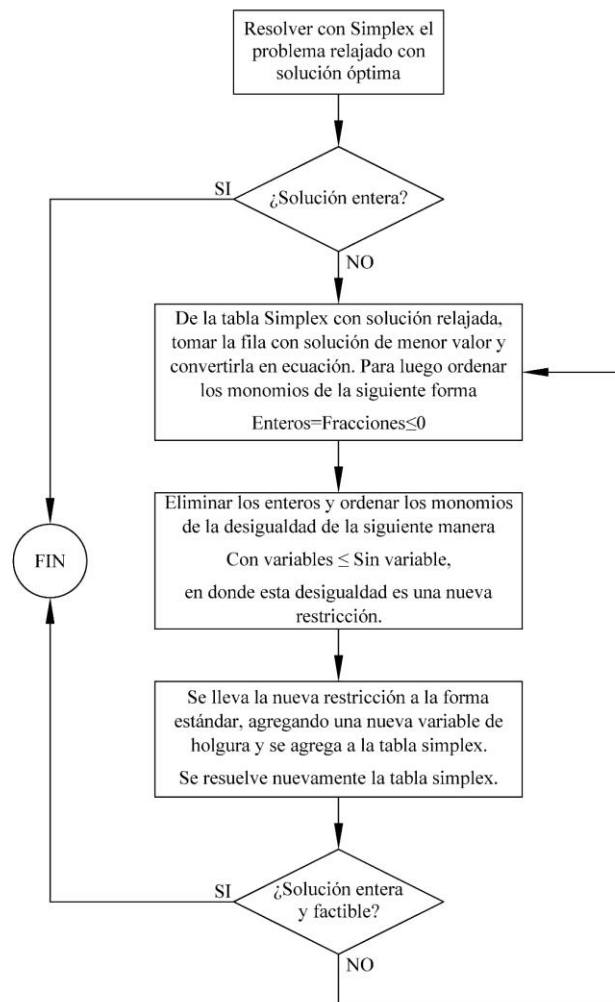
(Fuente: Elaboración propia)

3.5.2. Cortes de Gomory

Método de resolución de problemas de programación lineal entera, creado por Ralph Gomory en 1958 (Jünger et al., 2010). Este procedimiento es de los más antiguos para encontrar soluciones enteras cuando los resultados obtenidos son decimales o fracciones.

La Ilustración 2 muestra los pasos del algoritmo de Gomory.

Ilustración 2: Algoritmo de Gomory



(Fuente: Elaboración propia)

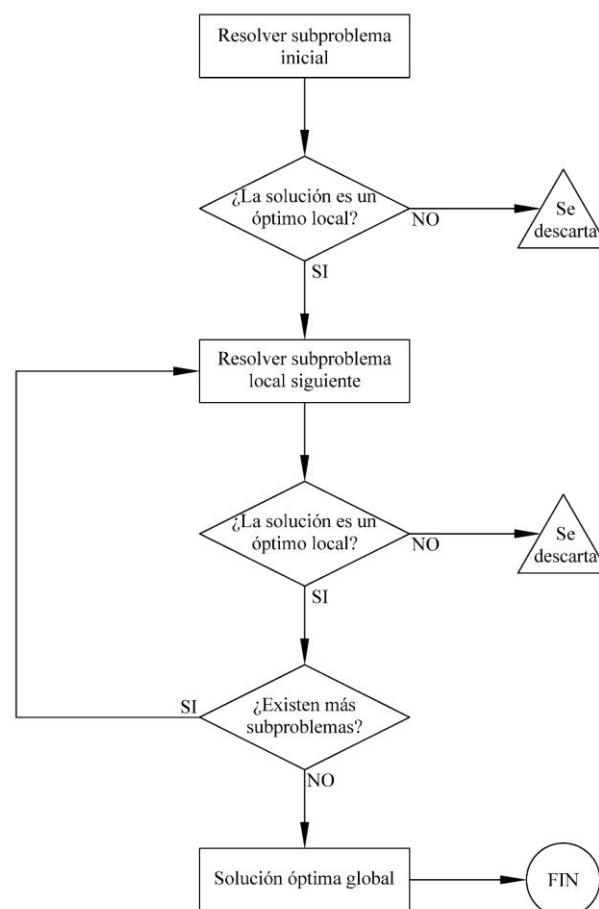
3.5.3. Heurística Greedy

También llamado algoritmo voraz, es un método iterativo, que busca soluciones optimas locales, para luego iterar desde ese optimo local encontrar una solución óptima global.

La desventaja de este método es que no siempre garantiza la solución óptima global. Sin embargo, es muy utilizado cuando el problema requiere una solución factible rápida y sin usar muchos recursos.

La Ilustración 3 muestra el algoritmo Greedy

Ilustración 3: Algoritmo Greedy



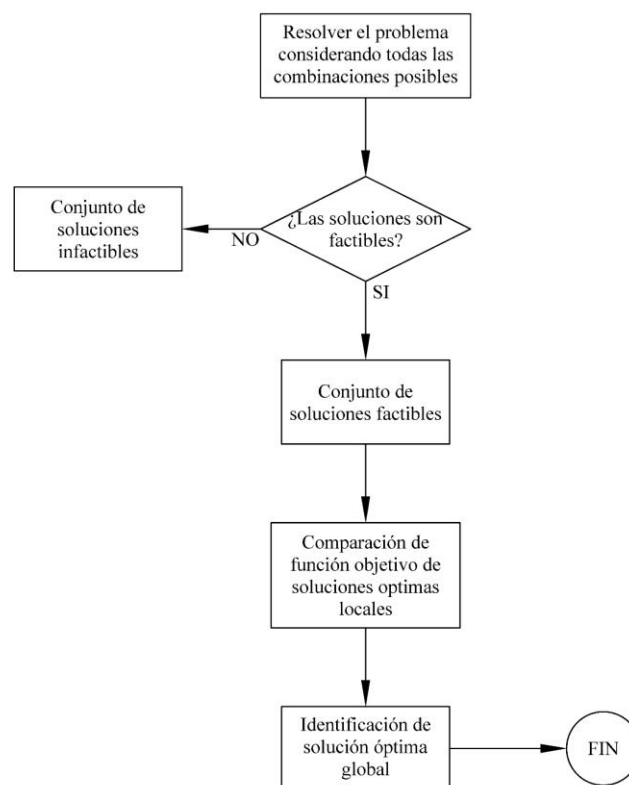
(Fuente: Elaboración propia)

3.5.4. Enumeración total

La enumeración total es un método de resolución para problemas de programación lineal entera, que considera calcular todas combinaciones posibles, para luego identificar las soluciones factibles, compararlas y ver cuál de ellas optimiza la función objetivo del problema. La desventaja de este método es que al requerir resolver todas las combinaciones posibles, se utilizan muchos recursos de tiempo y energía para encontrar la solución. Sin embargo, garantiza una solución óptima global.

La Ilustración 4 muestra el algoritmo de enumeración total.

Ilustración 4: Algoritmo de Enumeración Total



(Fuente: Elaboración propia)

3.6. Dimensionamiento, categorización y localización de terminales de buses

Antes de definir alternativas de emplazamiento de un terminal de buses, es necesario que el o los terrenos seleccionados, cumplan con los criterios y requerimientos que exige la normativa vigente, y se explican en el “Manual Explicativo Procedimientos en Materia de Terminales de Servicios de Locomoción Colectiva Urbana”, publicado por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (Subsecretaría de Transportes, 2005).

3.6.1. Dimensionamiento

El manual indica que los terminales de vehículos (TV) deben contar con un área mínima de estacionamiento, maniobra y circulación (AEMC), la que se determina con la siguiente formula:

$$AEMC = 0.1Bf_l^g l_v a_e^v$$

En donde B es la flota total de diseño, l_v es el largo de los vehículos y a_e^v es el ancho del estacionamiento. Para buses se considera:

$$a_e^v = 4,5[m]$$

Además, f_l^g es el factor de estacionamiento, que depende de la longitud de los vehículos y el ángulo de estacionamiento respecto de la paralela al eje longitudinal de la calle de circulación, según la Tabla 1:

Tabla 1: Factor de estacionamiento

Ángulo [°]	Largo de Buses [mts]			
	$l_v < 9$	$9 < l_v < 13,5$	$13,5 < l_v < 16$	$16 > l_v$
45	1,45	1,53	1,47	1,42
90	2,12	2,03	1,86	1,76

(Fuente: Manual Explicativo Procedimientos en Materia de Terminales de Servicios de Locomoción Colectiva Urbana del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones)

3.6.2. Categorización

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) establece que los terminales de buses de locomoción colectiva urbana se clasificarán en categorías, de acuerdo a la superficie del terreno neto. En la Tabla 2, se muestra la categoría del terminal de buses según su superficie:

Tabla 2: Categoría de terminal de buses según superficie

Categoría	Superficie Terreno Neto [m2]
B1	Hasta 600
B2	más de 600 hasta 1.000
B3	más de 1.000 hasta 2.500
B4	más de 2.500 hasta 5.000
B5	más de 5.000 hasta 10.000
B6	más de 10.000 hasta 20.000
B7	más de 20.000

(Fuente: Manual Explicativo Procedimientos en Materia de Terminales de Servicios de Locomoción Colectiva Urbana del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones)

3.6.3. Localización

La localización de terminales de buses depende en gran medida del uso de suelo permitido, la relación con las vías de acceso y la demanda.

Si bien los instrumentos de planificación territorial (Plan Regulador), indican expresamente los usos de suelo que permiten implementar terminales de buses, la normativa vigente amplía los usos de suelo que permiten la implementación de un terminal de buses. Esto dependerá de la categoría del terminal que se pretende construir.

A continuación, se muestra la Tabla 3, que indica el tipo de uso de suelo y la clasificación que deben tener las vías de acceso, que debe tener el terminal según su categoría.

Tabla 3: Uso de suelos y vía de acceso según categoría

Categoría	Tipo uso de suelo	Categoría de la vía de acceso
B1	Infraestructura, Actividades productivas	Local o mayor
	Equipamiento de clase comercio o servicios	Servicio o mayor
B2 y B3	Infraestructura, Actividades productivas	Servicio o mayor
	Equipamiento de clase comercio o servicios	Colectora o mayor
B4, B5, B6 y B7	Infraestructura, Actividades productivas	Colectora o mayor

(Fuente: Manual Explicativo Procedimientos en Materia de Terminales de Servicios de Locomoción Colectiva Urbana del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones)

Cabe destacar que el Tipo de uso de suelo lo define el Plan Regulador de la Comuna (P.R.C.), y corresponde al tipo de actividades que se pueden realizar en él.

La vía de acceso se refiere a la calle por la cual se ingresa y egresa al terminal de buses. La categorización es estas vías, las estipula la Secretaria Regional del Ministerio de Transporte (SEREMITT) en conjunto con el P.R.C., y se define básicamente por el rol que cumple en el transporte y la conectividad que brinda entre las distintas zonas urbanas. Aspectos como la velocidad, capacidad, anchos de calzadas y veredas, etc., son los que distinguen su categoría.

3.7. Valor del tiempo para las personas

Para tomar decisiones de inversión pública, la evaluación social de proyectos es una herramienta muy utilizada, ya que permite determinar los beneficios y costos para la población, al implementar determinado proyecto (Subsecretaría de Evaluación Social, 2022).

Si bien el valor del tiempo es relativo para cada persona, la división de Evaluación social de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social y Familia, publica el “Informe de Precios Sociales”, en donde se puede encontrar distintos valores del tiempo para actividades

no productivas actualizadas anualmente. En la Tabla 4 se muestran los valores sociales del tiempo en zonas urbanas, publicados para el año 2022:

Tabla 4: Valor social del tiempo para zonas urbanas. Año 2022

Tipo	Unidad	Valor
Viaje	[\$CLP/ Hora-pasajero]	2.604
Viaje para Actividades Deportivas y recreativas	[\$CLP/ Hora-pasajero]	2.176
Espera	[\$CLP/ Hora-pasajero]	5.208
Caminata	[\$CLP/ Hora-pasajero]	5.208

(Fuente: Informe de Precios Sociales 2022)

3.8. Velocidad de Operación según modo de Transporte

La velocidad de operación según modo de transporte se define como el tiempo que se utiliza para recorrer una determinada distancia para distintos medios de transporte. El estudio de “Actualización y recolección de información del sistema de transporte urbano, IX Etapa: Encuesta Origen Destino Santiago 2012” (Observatorio Social Universidad Alberto Hurtado, 2014), recopila dicha información. A continuación, se muestra en la Tabla 5, con la información mencionada:

Tabla 5: Velocidad de operación según modo de transporte

Modo Agregado	Velocidad Media [km/hr] de viaje por modo y periodo				
	PM1	PM2	FP	PT	TODOS
Auto	18,4	15,3	17,2	15,3	16,2
Bus TS	9,8	8,7	8,9	8,4	8,7
Bus no TS	16,1	16,9	14,8	16,7	16,6
Metro	12,6	12,6	12,4	11,2	11,8
Taxi Colectivo	11,7	7,9	8,8	8	9
Taxi	14,3	10,9	9,6	9,6	10,7
Bus TS - Bus no TS	15,3	16,4	12,1	14,7	14,7
Auto - Metro	16,5	15,8	15,3	13,3	15,8
Bus TS - Metro	13,5	12,7	13,2	11,6	12,4
Bus no TS - Metro	22,6	25,3	31,7	22,9	24,1
Taxi Colectivo - Metro	14,2	15	13,8	12	12,9
Taxi - Metro	11,8	13,1	9,9	10,2	11,7
Otros - Metro	18,3	17,8	12,6	20	18,3
Otros - Bus TS	14,2	12	11,9	12,7	12,5
Otros - Bus TS - Metro	16,1	21,8	16,6	13,3	16,7
Otros	13,8	9,4	14,2	13,5	10,5
Caminata	3,3	3,7	3,3	3,5	3,7
Bicicleta	9,8	8,7	8	8,9	8,2
Todos	13,9	11,8	11,7	11,6	11,9

(Fuente: Actualización y recolección de información del sistema de transporte urbano, IX
Etapa: Encuesta Origen Destino Santiago 2012)

Donde los periodos corresponden a los horarios mencionados en la Tabla 6.

Tabla 6: Definición de periodos según hora media del viaje

Periodos	Horas	Per	Horario		
Punta Mañana 1	1,5	AM1	6:00 - 7:29		
Punta Mañana 2	1,5	AM2	7:30-8:59		
Fuera de Punta	2,0	FP	10:00- 11:59		
Punta Tarde	3,0	PT	17:30 - 20:29		
Fuera de Punta Resto	9,0	FPR	9:00 - 9:59	12:00 - 17:29	20:30-22:59
Nocturno	7,0	NOC	23:00-05:59		

(Fuente: Actualización y recolección de información del sistema de transporte urbano, IX
Etapa: Encuesta Origen Destino Santiago 2012)

4. Descripción y formulación del problema

Dado que se pretende determinar la localización óptima de un terminal de buses para la comuna de Santo Domingo, de manera que se maximice la cobertura y el nivel de servicio, que en proyectos públicos se habla de beneficio social, es que se determina resolver la problemática con un modelo de optimización matemática BTLP.

A continuación, se expone de manera detallada el modelo utilizado:

4.1. Conjuntos

- I : nodos de demanda, que en este caso corresponden a los centroides de las manzanas de la zona urbana de Santo Domingo.
- J : nodos candidatos, que corresponden al centroide de los terrenos disponibles dentro de la zona urbana de Santo Domingo en que se puede construir el terminal de buses
- N_i : subconjunto nodos vecindad, que corresponde a la menor distancia entre el nodo de demanda i y el nodo candidato a terminal j , que se encuentra entre 0 y s .

$$N_i = \{j \in J | d_{ij} \leq s\} \forall i \in I$$

- M_i : subconjunto nodos vecindad, que corresponde a la menor distancia entre el nodo de demanda i y el nodo candidato a terminal j , que se encuentra entre s y t .

$$M_i = \{j \in J | s < d_{ij} \leq t\} \forall i \in I$$

- U_i : subconjunto nodos vecindad, que corresponde a la menor distancia entre el nodo de demanda i y el nodo candidato a terminal j , que se encuentra entre t y r .

$$U_i = \{j \in J | t < d_{ij} \leq r\} \forall i \in I$$

4.2. Parámetros

- d_{ij} : la menor distancia entre el nodo de demanda i y el nodo candidato j
- s : distancia que puede ser cubierta por el terminal de buses j con un nivel de servicio w_s .
- t : distancia que puede ser cubierta por el terminal de buses j con un nivel de servicio w_t .
- r : distancia que puede ser cubierta por el terminal de buses j con un nivel de servicio w_r .
- h_i : demanda del nodo i , que para este problema corresponde a la cantidad de personas por manzana
- w_s : peso relativo o nivel de servicio para cobertura entre distancia d_{ij} entre 0 y s .
- w_t : peso relativo o nivel de servicio para cobertura entre distancia d_{ij} entre s y t .
- w_r : peso relativo o nivel de servicio para cobertura entre distancia d_{ij} entre t y r .
- p : número máximo de terminales que se pueden instalar.

4.3. Variables

- $x_j = \begin{cases} 1, & \text{si se instala el servidor en el nodo } j \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$
- $y_i = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto con un nodo } j, \text{ con nivel de servicio } w_s \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$
- $z_i = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto con un nodo } j, \text{ con nivel de servicio } w_t \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$
- $q_i = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ está cubierto con un nodo } j, \text{ con nivel de servicio } w_r \\ 0, & \text{sino} \end{cases}$

4.4. Modelo compacto

$$\max_{x,y,z,q} \sum_{i \in I} (w_s h_i y_i + w_t h_i z_i + w_r h_i q_i) \quad (14)$$

$$s.t. \quad \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, \quad \forall i \in I \quad (15)$$

$$\sum_{j \in M_i} x_j \geq z_i, \quad \forall i \in I \quad (16)$$

$$\sum_{j \in U_i} x_j \geq q_i, \quad \forall i \in I \quad (17)$$

$$y_i + z_i + q_i \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (19)$$

$$y_i, z_i, q_i \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (20)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (21)$$

donde:

(14) La función objetivo busca maximizar la cobertura de la demanda, en donde se priorizan los nodos con mayor demanda h_i y mayor nivel de servicio w .

(15) Indica que el nodo i sólo puede estar cubierto en un radio s , si existe algún servidor instalado en la vecindad N_i

(16) Indica que el nodo i sólo puede estar cubierto en un radio entre s y t , si existe algún servidor instalado en la vecindad M_i

(17) Indica que el nodo i sólo puede estar cubierto en un radio entre t y r , si existe algún servidor instalado en la vecindad U_i

(18) Esta restricción indica que los nodos demanda pueden ser cubiertos por sólo una distancia (entre $0-s$, entre $s-t$, o entre $t-r$).

(19) Cantidad máxima de servidores a instalar: no se pueden instalar más de p servidores en el conjunto de nodos candidatos.

(20) (21) Integrabilidad de las variables: corresponde al conjunto de números al que pertenecen las variables, que en este caso son binarias.

5. Estudio computacional

Con el planteamiento matemático del problema definido, se hace necesario obtener los datos que definen los parámetros que delimitan el problema. Para ello se recurre a distintas fuentes, las cuales se detallan a continuación separadamente para cada parámetro.

5.1. Recopilación de antecedentes

5.1.1. Conjuntos

5.1.1.1. Nodos de demanda i

El conjunto de los nodos de demanda i , se define como los centroides de las manzanas de la zona urbana de la comuna de Santo Domingo, los cuales se obtienen desde un plano coordenado “ x,y ”, elaborado a partir del software Google Earth®, y exportando dicha información a software AutoCAD®. Con esto se genera un sistema de coordenadas locales, para simplificar la visualización y resolución del problema.

A continuación, se muestra la Ilustración 5, que grafica lo mencionado:

Ilustración 5: Nodos demanda i



(Fuente: Elaboración propia)

5.1.1.2. Nodos candidato j

El conjunto de los nodos candidatos j propuestos para el emplazamiento del terminal de buses, se obtiene desde el plano coordenado mencionado en el punto anterior, y se emplazan siguiendo los criterios de mencionados en 3.5: dimensionamiento, categorización y localización de terminales de buses.

Dimensionamiento

Para el dimensionamiento del terminal de buses requerido, se utiliza la formula AEMC.

A continuación, se determinan y muestran los valores asumidos para los parámetros requeridos para el cálculo de dicha formula:

- Para determinar el valor de B , que corresponde a la flota de buses que operará en el terminal de buses, se considera la población potencial que requiere viajar a sus destinos habituales (centros educacionales, fuentes laborales, servicios, etc.), y que utilizaría el terminal principalmente en horario punta: entre 6:00 - 8:59, para mañana y 17:30 - 20:29, para tarde (Observatorio Social Universidad Alberto Hurtado, 2014). Con esto se observa que se tienen 3 horas para movilizar a toda la población potencial, ya sea en el horario de punta mañana o punta tarde.

Se considera como población potencial, a los habitantes entre 15 y 65 años de la zona urbana de la comuna. Esto corresponde a 4.091 personas (INE, 2017).

Además, un bus de 12[m] de largo puede transportar 40 personas.

Con lo anterior, se puede determinar una frecuencia de buses FB :

$$FB \left[\frac{buses}{hr} \right] = \frac{PP[personas]}{T[hr] \cdot CB \left[\frac{personas}{bus} \right]}$$

Donde PP es la población potencial que se requiere trasladar, T es el tiempo disponible para trasladarlos y CB la capacidad del bus al 75% (no siempre los buses cubren su capacidad para cumplir con la frecuencia). Reemplazando:

$$FB \left[\frac{buses}{hr} \right] = \frac{4.091[personas]}{3[hr] \cdot 30 \left[\frac{personas}{bus} \right]} = 45,46 \left[\frac{buses}{hr} \right]$$

Asumiendo que las salidas de los viajes que requiere la población potencial se distribuirán durante las 3 horas, y que mientras un bus hace el recorrido de ida, otro lo hace de regreso. Se considera FB más un factor de seguridad del 10%, por temas de regulación en la frecuencia debido a eventualidades (saturación de las vías, accidentes, etc.), como la flota de buses que debiera operar en el terminal. Se tiene,

$$B[buses] = 1,1 \cdot FB[buses]$$

Reemplazando,

$$B[buses] = 1,1 \cdot 45,46[buses] = 50[buses]$$

Con esto, se considera una flota de preliminar estimada de 50 buses. Entonces el valor de $B=50$.

- El factor de estacionamiento considerado es el más desfavorable, es decir de 90° , para buses de 12 [m]. Entonces el valor de $f_t^g = 2,03$
- El largo de los buses a considerar es de 12 [m]. Entonces el valor de $l_v=12$
- El ancho de estacionamiento es de 4,5[m]. Entonces el valor de $a_e^v=4,5$

Con lo anterior se tiene que:

$$AEMC = 0.1Bf_t^g l_v a_e^v = 0,1 \cdot 50 \cdot 2,03 \cdot 12[m] \cdot 4,5[m] = 548,1[m^2]$$

El terminal de buses debe tener una superficie mínima de 548,1[m²].

Categorización

Con lo obtenido anteriormente se determina la categoría del terminal de buses, la cual corresponde a un terminal tipo B1 (superficie menor o igual a 600 [m²]).

Localización

De acuerdo con la normativa vigente, la localización de terminales de buses depende de 3 factores: la demanda, la categoría de las vías de acceso y el uso de suelo.

Respecto a la demanda, este es un parámetro que se requiere para determinar la localización definitiva, y que es el motivo del presente estudio. Se define más adelante, en el punto 0, no siendo necesario considerarla para determinar las alternativas preliminares de localización.

Las vías existentes en la comuna de Santo Domingo no son un factor de decisión respecto a la normativa vigente, ya que el Plan Regulador Comunal (P.R.C.) no tiene definida la categorización de las vías comunales.

Lo que sí es relevante en la determinación de las alternativas de localización, es el uso de suelos. Esto, debido a que el uso de suelo para las distintas zonas de la comuna está definido en el P.R.C., y determina si es factible, o no, instalar un terminal de buses.

Específicamente el plan regulador comunal de Santo Domingo no define zonas destinadas a terminales de buses, sin embargo, y debido que el terminal propuesto es de categoría B1, la normativa vigente permite la implementación de un terminal en los usos de suelo y categorías de vías de acceso, que se muestran en la Tabla 7.

:

Tabla 7: Uso de suelos y vía de acceso para categoría B1

Categoría	Tipo uso de suelo	Vía de acceso
B1	Infraestructura, Actividades productivas	Local o mayor
	Equipamiento de clase comercio o servicios	Servicio o mayor

(Fuente: Manual Explicativo Procedimientos en Materia de Terminales de Servicios de Locomoción Colectiva Urbana del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones)

Las zonas definidas por el P.R.C., que poseen los tipos de suelo permitidos para la implementación de un terminal de buses son ZQ-2, ZQ-3 y ZI-1, las cuales se describen a continuación:

ZQ-2: Vivienda, equipamiento de educación escala vecinal, organizaciones comunitarias, comercio minorista y servicios públicos de escala comunal y aras verdes a escala comunal y vecinal.

ZQ-3: Vivienda, equipamiento de educación escala vecinal, organizaciones comunitarias, comercio minorista, servicios artesanales, servicios públicos y aras verdes a escala comunal y vecinal

ZI-1: Vivienda, industria, bodega, comercio minorista escala comunal, servicios artesanales escala comunal. Usos de impacto similar a la industria no contaminante o insalubre ni peligroso.

A continuación, en la Ilustración 6, se muestra el plano regulador de la comuna de Santo Domingo con las distintas zonas de uso de suelo:

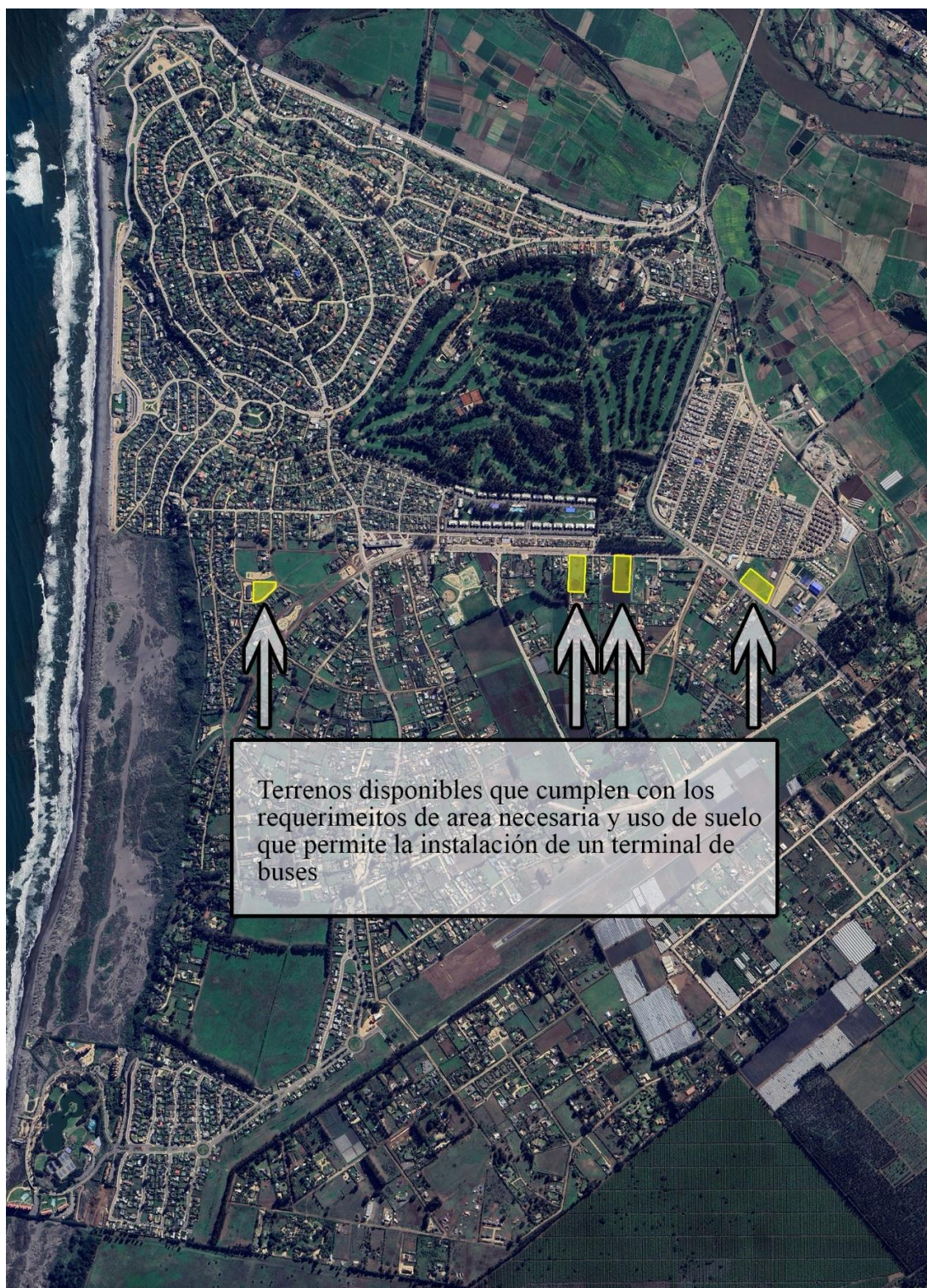
Ilustración 6: Zonas uso de suelos según PRC Santo Domingo



(Fuente: Plan Regulador comunal de Santo Domingo)

Además, se necesita saber si el terreno está equipado o no. Para ello se utiliza una imagen desde Google Earth que muestra la ocupación de terrenos (Ilustración 7).

Ilustración 7: Terrenos disponibles



(Fuente: Google Earth)

Con lo anterior, las alternativas de localización de los nodos candidatos se muestran en la Ilustración 8:

Ilustración 8: Nodos candidato j



(Fuente: Elaboración propia)

5.1.2. Parámetros

5.1.2.1. Distancia d_{ij}

La distancia d_{ij} , corresponde a la menor distancia entre el nodo i (x_i, y_i) y el nodo j (x_j, y_j), en donde la ubicación de ambos nodos se define en el plano coordenado mostrado anteriormente.

Para el cálculo de esta distancia, se utiliza una distancia rectilínea o “manhattan”, ya que modela de mejor manera la distancia que se recorre en las calles, en comparación con la distancia euclidiana.

Para determinar la distancia rectilínea, se utiliza la siguiente expresión:

$$d_{ij} = |x_j - x_i| + |y_j - y_i|$$

5.1.2.2. Distancias s , t y r para niveles de servicio w_s , w_t y w_r

Para la determinación de los valores de s , t y r se consideran distancias que en promedio una persona estaría dispuesta a recorrer para llegar a un terminal de buses local.

Los valores propuestos son los siguientes:

- La distancia s para un nivel de servicio w_s , que puede ser cubierta por el terminal de buses j , será de 1[km], es decir $s=1$.
- La distancia t para un nivel de servicio w_t , que puede ser cubierta por el terminal de buses j , será de 1,5[km], es decir $t=1,5$.
- La distancia r para un nivel de servicio w_r , que puede ser cubierta por el terminal de buses j , será de 2[km], es decir $r=2$.

Para reforzar la validez de los valores propuestos en esta sección, en el numeral 6 se realizará un análisis de sensibilidad variando estos valores.

5.1.2.3. Demanda h_i

La demanda h_i para cada nodo i , que corresponde a las personas que habitan en el nodo i , se obtiene desde un archivo .kmz descargado desde la página web del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) de la Universidad Católica. Este archivo contiene la información georreferenciada de habitantes, en base al Censo del año 2017 (INE, 2017), para cada manzana de la zona urbana de Santo Domingo.

5.1.2.4. Pesos relativos para cada nivel de servicio w_s , w_t y w_r

El peso relativo para cada nivel de servicio es el valor que modela el beneficio que le dan las personas para recorrer cada distancia s , r y t , en donde mientras menor sea la distancia mayor será el beneficio o nivel del servicio entregado. Se determina relacionando la velocidad media de caminata indicada en el punto 3.8 (Velocidad de Operación según modo de Transporte), el valor del tiempo para las personas indicada en el punto 3.7 (Valor del tiempo para las personas) y la distancia recorrida, la cual está definida por las distancias existentes para recorrer las alternativas dadas.

Con esto se define TR como el tiempo medio que demora una persona en recorrer 1[km], en horas.

$$TR \left[\frac{h}{km} \right] = \frac{1}{VMC \left[\frac{km}{h} \right]}$$

En donde VMC es la velocidad media de caminata, resolviendo:

$$TR \left[\frac{h}{km} \right] = \frac{1}{3,7 \left[\frac{km}{h} \right]} = 0,27 \left[\frac{h}{km} \right]$$

Entonces, el tiempo medio que demora una persona en recorrer 1[km] es 0,27[h].

Luego, VRC es el valor en dinero [CLP] de recorrer caminando 1[km] de distancia

$$VRC \left[\frac{CLP}{km} \right] = TR \left[\frac{h}{km} \right] \cdot VTC \left[\frac{CLP}{h} \right]$$

En donde VTC es el valor social para una persona de caminar 1[km], resolviendo:

$$VRC \left[\frac{CLP}{km} \right] = 0,27 \left[\frac{h}{km} \right] \cdot 5.208 \left[\frac{CLP}{h} \right] = 1406,16 \left[\frac{CLP}{km} \right]$$

Con lo anterior, se tiene que el costo social CS de recorrer cada una de las distancias propuestas, es:

$$CS[CLP] = VRC \left[\frac{CLP}{km} \right] \cdot DR[km]$$

En donde DR es la distancia a recorrer para llegar al terminal desde el nodo demanda al nodo candidato, en kilómetros.

Resolviendo se obtiene la Tabla 8:

Tabla 8: Costo social de recorrer la distancia

Indicador	Distancia a recorrer [km]		
	1,0 (s)	1,5 (t)	2,0 (r)
$CS [CLP]$	1407,57	2111,35	2815,14

(Fuente: Elaboración propia)

Debido a que la función objetivo del modelo propuesto corresponde a una maximización, y que mientras mayor sea el costo social menor será el nivel de servicio percibido por los usuarios, es que se requiere transformar el costo social en beneficio social.

Para ello se utiliza el valor inverso del costo, ya que así se tendrá un valor mayor cuando se recorra una menor distancia.

Se utiliza la siguiente expresión:

$$BS = \frac{1}{CS}$$

En donde BS es el beneficio social de recorrer una menor distancia desde el nodo demanda al nodo candidato.

Resolviendo se obtiene la Tabla 9:

Tabla 9: Beneficio social de recorrer una menor distancia

Indicador	Distancia a recorrer [km]		
	1,0 (s)	1,5 (t)	2,0 (r)
BS	0,00071	0,00047	0,00015

(Fuente: Elaboración propia)

Se habla de beneficio social al recorrer una menor distancia, ya que, mientras menor sea la distancia recorrida, menor será el tiempo que utilizará la persona en recorrer dicha distancia. Este “ahorro” de tiempo se traduce en un beneficio, ya que se dispone un mayor tiempo para realizar otras actividades.

Para visualizar mejor el beneficio, se normalizan los valores obtenidos, llevándolos a una relación con 1. Con esto se construye la Tabla 10, que muestra el peso relativo para cada nivel de servicio:

Tabla 10: Pesos relativos según nivel de servicio

w_s	w_t	w_r
0,46	0,31	0,23

(Fuente: Elaboración propia)

En resumen, se tiene:

- El peso relativo o nivel de servicio w_s para una cobertura entre distancia d_{ij} entre 0 y s , es de un 46%, es decir $w_s = 0,46$.
- El peso relativo o nivel de servicio w_t para una cobertura entre distancia d_{ij} entre s y t , es de un 31%, es decir $w_t = 0,31$.

- El peso relativo o nivel de servicio w_r para una cobertura entre distancia d_{ij} entre t y r , es de un 23%, es decir $w_r=0,23$. Sin embargo, para este tramo se considera un nivel de servicio con decrecimiento continuo desde el valor de t , que es 0,31, por lo que se utiliza la siguiente función:

$$0,31 - \frac{1}{r - t} d_{ij} \cdot 0,31$$

5.1.2.5. Restricción presupuestaria p

Finalmente, la restricción presupuestaria, que corresponde al número máximo de terminales que se pueden instalar será de 1 terminal, es decir $p=1$

5.2. Resolución del problema

La resolución del problema se realiza utilizando el modelo matemático del punto 4, descripción y formulación del problema, y los datos obtenidos en el punto 5.1, recopilación de antecedentes.

Con lo anterior, se construye un código en lenguaje AMPL®, para resolver el problema con el mismo software. Al ser un problema de optimización lineal entero, se utiliza el solver HiGHS 1.4.0.

5.2.1. Solver y Equipo utilizado

Para resolver el modelo propuesto en el presente trabajo, se utiliza el solver HiGHS 1.4.0, el cual es un software de código abierto gratuito, desarrollado por estudiantes de post grado de la Universidad de Edinburgo. Se publica bajo licencia de MIT, el cual resuelve modelos lineales (LP, linear programming), enteros mixtos (MIP, mixed-integer programming) y cuadráticos (QP, quadratic programming).

El equipo utilizado para resolver el modelo posee un procesador de 2,5 [GHz] Intel Core i5 con 16 [GB] 800 [MHz] DDR3 de memoria RAM.

5.2.2. Resultados

De la resolución en el solver HiGHS, se obtiene la siguiente información:

El nodo candidato escogido, y su ubicación en el espacio, se muestra en la Tabla 11:

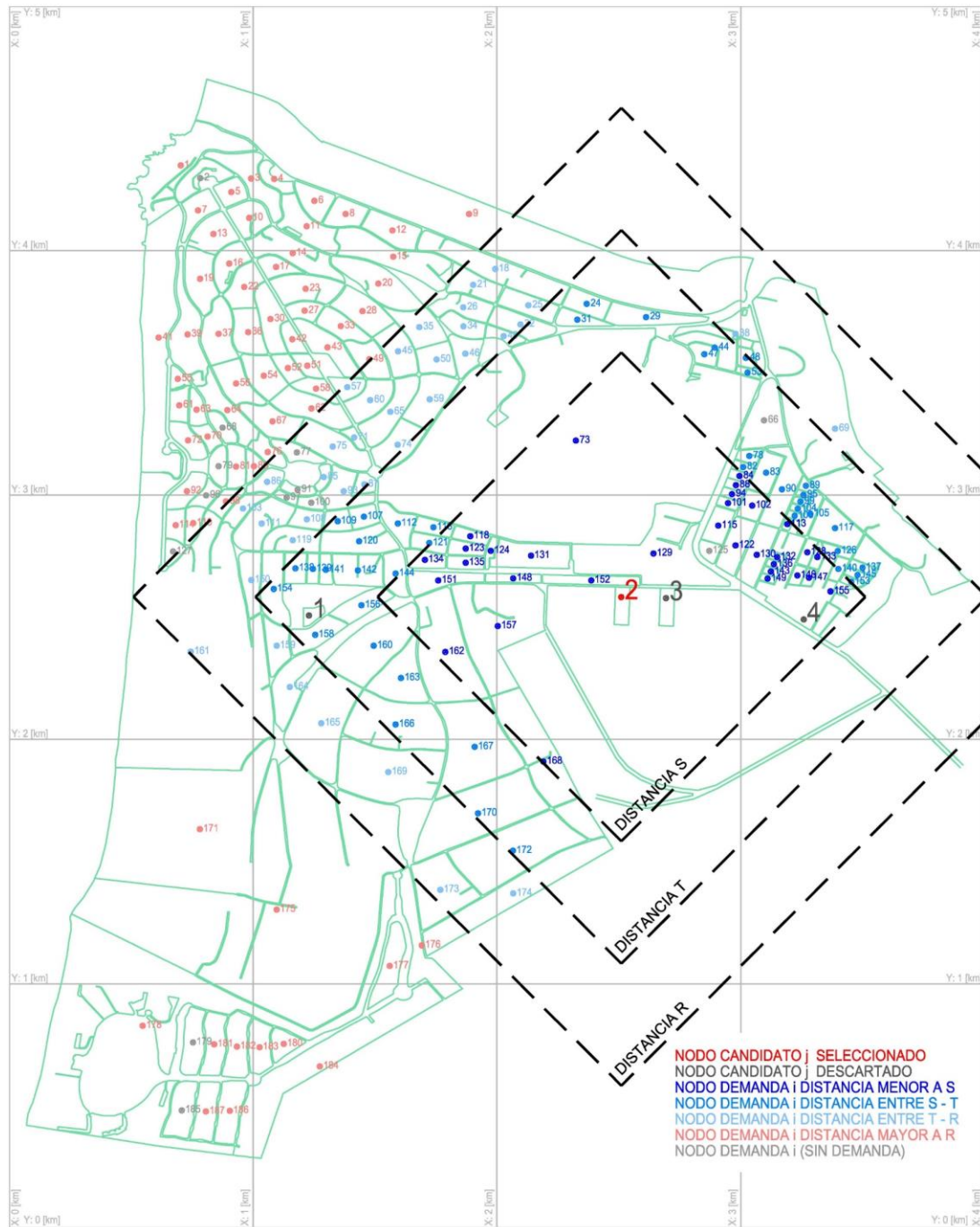
Tabla 11: Nodo candidato escogido y sus coordenadas espaciales

Nodo candidato escogido	Coordenadas	
	x	y
2	2,51	2,584

(Fuente: Elaboración propia)

Para graficar la solución, se elabora la Ilustración 5, que muestra al nodo candidato escogido y su cobertura para cada nivel de servicio, en el plano de la comuna.

Ilustración 9: Plano de cobertura para cada nivel de servicio



(Fuente: Elaboración propia)

Además, se elabora la Tabla 12, la cual muestra el nivel de servicio global obtenido, los nodos y la demanda cubiertos, para cada distancia propuesta:

Tabla 12: Función objetivo y coberturas

Función objetivo / Nivel de servicio global	Nodos (manzanas) cubiertos			Demanda (personas) cubiertas		
	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>r</i>
1887,86	32	43	36	2331	2001	1101

(Fuente: Elaboración propia)

6. Análisis de sensibilidad

Para robustecer el resultado del presente estudio, se realiza un análisis de sensibilidad de los radios de cobertura propuestos, ya que este factor es el único parámetro con un alto grado de subjetividad, debido a que depende de la apreciación y valorización que le dan las personas al tiempo y al costo que implica recorrer dicha distancia. Con esto se pretende ver cómo el cambio de este parámetro influye en la determinación de la localización óptima del problema.

Para lo anterior, se realizan variaciones del valor central t (valor medio) del parámetro distancia, manteniendo la distancia de 0,5[km] a sus extremos s y r .

A continuación, se muestra la Tabla 13, con los valores adoptados para el análisis.

Tabla 13: Valores de distancia para cada sensibilización

Sensibilización	Distancia [km]		
	s	t	r
1	0,00	0,50	1,00
2	0,25	0,75	1,25
3	0,50	1,00	1,50
4	0,75	1,25	1,75
5	1,00	1,50	2,00
6	1,25	1,75	2,25
7	1,50	2,00	2,50
8	1,75	2,25	2,75
9	2,00	2,50	3,00
10	2,25	2,75	3,25
11	2,50	3,00	3,50
12	2,75	3,25	3,75

(Fuente: Elaboración propia)

Resolviendo el problema, para cada valor de distancia media adoptado en el análisis de sensibilidad, se construye la Tabla 14, que contiene los nodos candidatos escogidos, función objetivo o nivel de servicio entregado, nodos y demanda cubiertas:

Tabla 14: Resultados para cada sensibilización

Sensibilización	Nodo candidato elegido	Función objetivo / Nivel de servicio global	Totales cubiertos	
			Nodos	Demanda
1	4	619,02	36	2583
2	3	871,12	54	3686
3	3	1176,63	65	4058
4	2	1488,17	97	5032
5	2	1887,86	111	5433
6	2	2244,08	127	5803
7	2	2435,20	140	6091
8	2	2632,09	150	6311
9	2	2771,52	158	6509
10	2	2895,38	165	6732
11	1	3158,17	174	6997
12	1	3187,42	174	6997
13	1	3218,62	174	6997

(Fuente: Elaboración propia)

En la Tabla 15 se detallan las coberturas, tanto de nodos y demanda cubiertas para cada sensibilización:

Tabla 15: Coberturas para cada sensibilización

Sensibilización	Nodos (manzanas) cubiertos por			Demanda (personas) cubiertas por		
	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>r</i>
1	0	20	16	0	1360	1223
2	1	17	36	31	1337	2318
3	4	36	25	314	2693	1051
4	11	47	39	948	2864	1220
5	32	43	36	2331	2001	1101
6	58	39	30	3812	1220	771
7	75	36	29	4332	1101	658
8	97	30	23	5032	771	508
9	111	29	18	5433	658	418
10	127	23	15	5803	508	421
11	164	10	0	6594	403	0
12	169	5	0	6789	208	0
13	174	0	0	6997	0	0

(Fuente: Elaboración propia)

7. Conclusiones

La problemática del presente estudio es encontrar la localización de un terminal de buses en la comuna de Santo Domingo, que optimice tanto la cantidad de personas cubiertas, así como el nivel de servicio global, para los habitantes de la comuna. Para ello se buscan alternativas de localización factibles, que cumplan la normativa vigente referente a terminales de buses. Se recopilan los antecedentes de demanda, distancia a recorrer y los necesarios para definir los parámetros nivel de servicio, requeridos para construir el modelo de optimización BTLP, que se utiliza para resolver el problema.

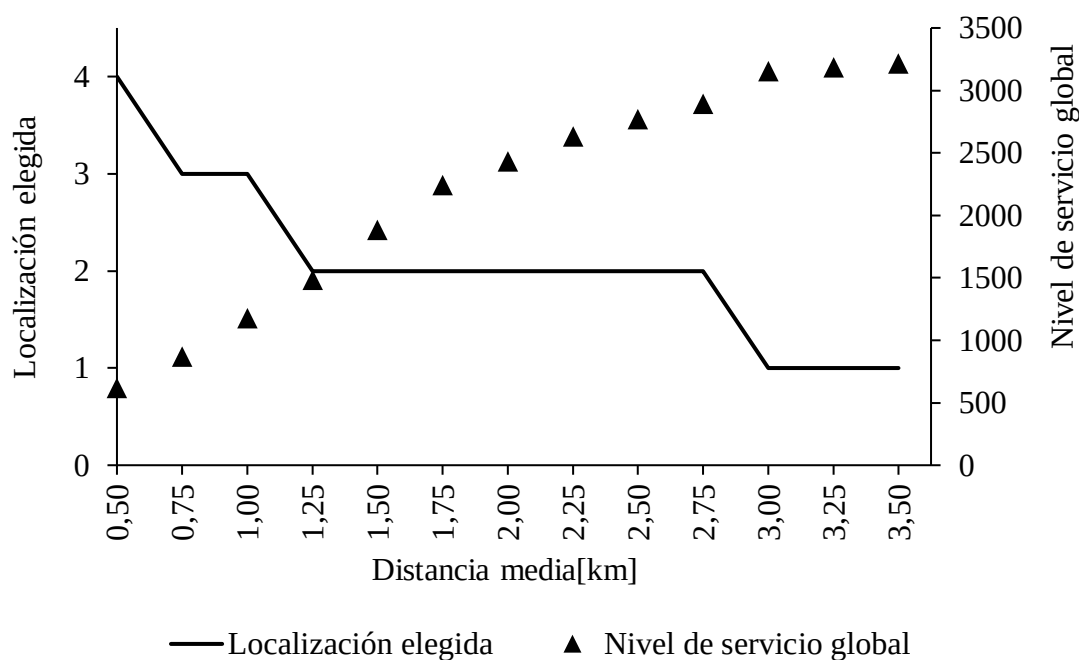
El problema se resuelve con el modelo de optimización matemática planteado, y resuelto en HiGHS 1.4.0.

Los resultados obtenidos entregan que la localización maximiza la cobertura y el nivel de servicio global entregado a las personas de la comuna, es el nodo 2. El cual entrega una cobertura de 111 manzanas (nodos) y 5433 personas (demanda), con un nivel de servicio global de 1887,86.

Resulta lógico que, debido a la configuración comunal respecto a la demografía, la localización obtenida esté ubicada en el centroide de la zona urbana de la comuna, ya que de esta forma se logra una cobertura mayor, al minimizar el costo de traslado de los habitantes.

Para observar de mejor manera el análisis de sensibilidad, es que se elabora el Gráfico 7, que se muestra a continuación:

Gráfico 7: Localización elegida y nivel de servicio respecto a la distancia media

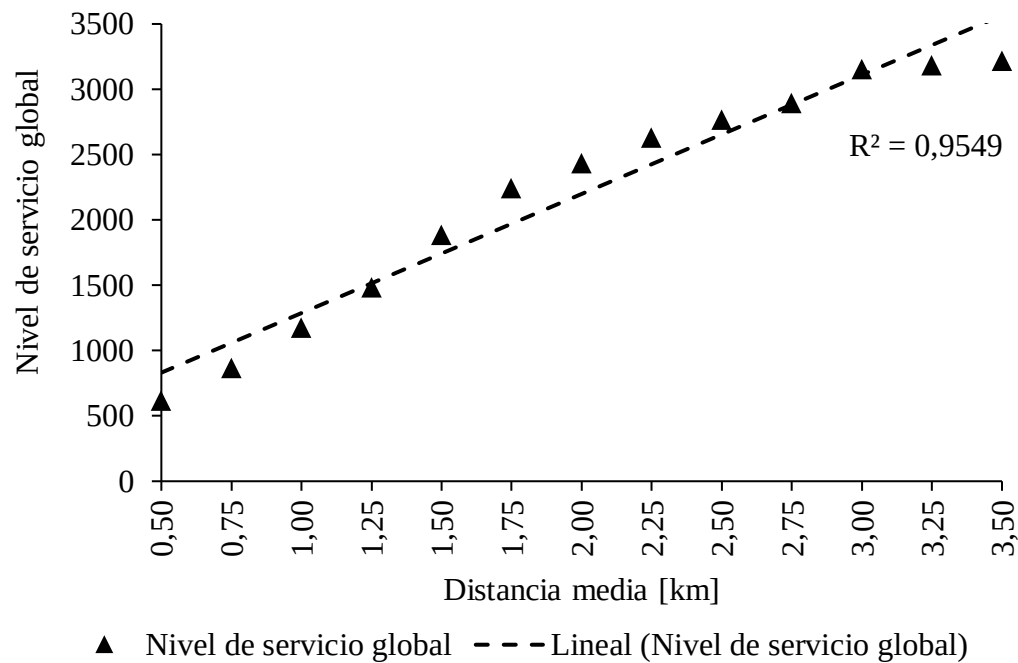


(Fuente: Elaboración propia)

Donde se observa que la alternativa de solución que más se repite en distancias medias de cobertura es el nodo candidato 2. Se aprecia, que esta solución garantiza una cobertura óptima en distancias entre 0,750[km] y 3,25[km]. Cabe señalar que las distancias del grafico son medias, y las diferencias a la media son 0,5[km].

Resulta lógico además pensar que, para radios de cobertura mayores, también se tendrá un mayor nivel de servicio global, debido a que, al cubrir mayor demanda con un peso relativo de nivel de servicio mayor, implica un valor en la función objetivo más alto. Gráficamente, esto se observa en Gráfico 8, que representa la correlación entre el nivel de servicio y el radio de cobertura, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9549:

Gráfico 8: Correlación entre el nivel de servicio global y la distancia media



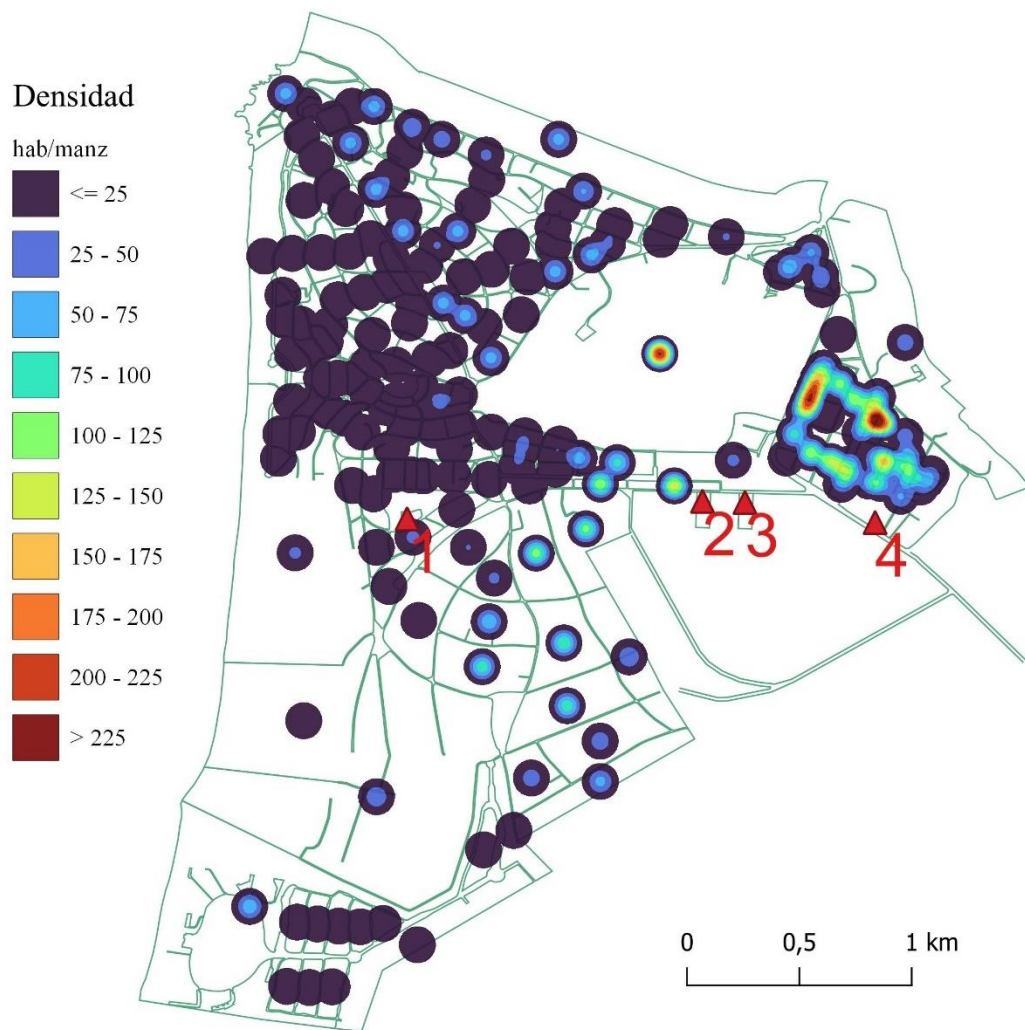
(Fuente: Elaboración propia)

De los resultados obtenidos se puede inferir que los parámetros más importantes son la distancia de nivel de servicio y la distancia d_{ij} . Si bien el peso relativo es importante, este factor depende directamente de la distancia de servicio.

Al estar ligados la distancia de nivel de servicio con el peso relativo que cada una de estas distancias otros, es que son los que maximizan la función objetivo, y por consecuencia la cobertura.

Para visualizar de mejor manera el análisis de sensibilidad y las apreciaciones mencionadas anteriormente, se elabora Ilustración 10, que muestra la densidad de habitantes por manzana de la comuna en el plano, y las alternativas de localización preliminares y elegida en el problema planteado.

Ilustración 10: Mapa de densidad poblacional



(Fuente: Elaboración propia)

Se observa gráficamente que distancias de cobertura menores la localización óptima es el nodo 4, ya que se ubica en la zona con mayor densidad demográfica en menores distancias. Por el contrario, para radios mayores, la mejor alternativa es el nodo 1, ya que se encuentra más cercano a donde existe mayor cantidad de habitantes, pero a distancias mayores. Los nodos 2 y 3 son, ubicados en el centro de la comuna, son los que equilibran la

cercanía de la distancia a recorrer con la densidad demográfica existente en la comuna, y que dentro de ellas se encuentra la localización elegida (nodo 2).

Como apreciación, es importante mencionar que, gracias a la flexibilidad de la normativa vigente para la instalación de terminales de buses, y que permite su emplazamiento en localizaciones que no están destinados en el Plan Regulador Comunal (P.R.C) para ello, los lugares disponibles pueden ser más rentables socialmente, y en muchos casos, de menor costo para su implementación.

Finalmente, es importante mencionar que, si bien el presente estudio pretende resolver el problema de localización para un terminal de buses, este trabajo es preliminar y con fines académicos, ya que se requieren otros estudios para definir el emplazamiento definitivo. Estudios como una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), según corresponda; y un Informe de Mitigación Vial (IMIV), son indispensables para continuar con la implementación del terminal de buses, ya que son exigidos por la normativa vigente, para la obtención del permiso de edificación y posterior construcción del terminal de buses.

8. Referencias

- Babaie-Kafaki, ., Ghanbari, R., Nasser, H., & Ardil, E. (2006). Solving Bus Terminal Location Problem Using Genetic Algorithm. *International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*.
- Centro de Desarrollo Urbano Sustentable UC. (17 de diciembre de 2021). *Datos CEDEUS*.
http://datos.cedeus.cl/layers/geonode:pop_cuen
- Church, R., & ReVelle, C. (Diciembre de 1974). The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science Association*, 32, 101-118.
- Church, R., & Roberts, K. (Diciembre de 1983). Generalized coverage models and public facility location. *Papers in Regional Science Association*, 53, 117-135.
- Drezner, Z., Wesolowsky, G., & Drezner, T. (Septiembre de 2004). The gradual covering problem. *Naval Research Logistics*, 51, 841-855. <https://doi.org/10.1002/nav.20030>
- Ghanbari, R., & Mahdavi-Amiri, N. (Enero de 2011). Solving bus terminal location problems using evolutionary algorithms. *Applied Soft Computing*, 11(1), 991-999.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.01.019>
- INE. (2017). *CENSO 2017*.
- Jünger, M., Liebling, T., Naddef, D., Nemhauser, G., Pulleyblank, W., Reinelt, G., . . . Wolsey, L. (2010). *50 Years of Integer Programming 1958-2008*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0>
- Observatorio Social Universidad Alberto Hurtado. (2014). *Actualización y recolección de información del sistema de transporte urbano, Etapa IX*. Universidad Alberto Hurtado.

- Subsecretaría de Evaluación Social. (2022). *Informe Precios Sociales 2022*. Ministerio de Desarrollo Social y Familia.
- Subsecretaría de Transportes. (2005). *Manual Explicativo Procedimientos en Materia de Terminales de Servicios de Locomoción Colectiva Urbana*. Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.
- Taghavi, A., Ghanbari, R., Ghorbani-Moghadam, K., Davoodi, A., & Emrouznejad, A. (Agosto de 2021). A genetic algorithm for solving bus terminal location problem using data envelopment analysis with multi-objective programming. *Annals of Operations Research*, 309(1), 259-276. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04244-4>
- Urbe. (2020). *Estudio de actualización Plan Regulador comunal de Santo Domingo*. Municipalidad de Santo Domingo.

9. Anexos

9.1. Coordenadas Nodos Demanda i

Nodo i	x	y
1	0,704	4,349
2	0,784	4,297
3	0,992	4,295
4	1,087	4,294
5	0,911	4,24
6	1,252	4,204
7	0,775	4,165
8	1,38	4,15
9	1,886	4,15
10	0,985	4,134
11	1,22	4,1
12	1,572	4,083
13	0,838	4,068
14	1,163	3,991
15	1,575	3,976
16	0,903	3,948
17	1,095	3,934
18	1,994	3,926
19	0,783	3,886
20	1,514	3,866
21	1,903	3,861
22	0,964	3,852
23	1,216	3,845
24	2,368	3,783
25	2,129	3,777
26	1,862	3,769
27	1,212	3,755
28	1,449	3,753
29	2,612	3,729
30	1,072	3,721
31	2,33	3,718
32	2,097	3,699

Nodo i	x	y
33	1,36	3,692
34	1,863	3,691
35	1,682	3,688
36	0,98	3,667
37	0,859	3,66
38	2,979	3,66
39	0,732	3,658
40	2,028	3,651
41	0,613	3,645
42	1,161	3,638
43	1,306	3,605
44	2,893	3,604
45	1,595	3,589
46	1,871	3,579
47	2,851	3,577
48	3,021	3,562
49	1,477	3,556
50	1,753	3,555
51	1,223	3,53
52	1,143	3,52
53	3,028	3,502
54	1,044	3,489
55	0,692	3,476
56	0,931	3,457
57	1,387	3,442
58	1,259	3,436
59	1,725	3,392
60	1,481	3,389
61	0,698	3,368
62	1,24	3,355
63	0,769	3,35
64	0,895	3,348

Nodo i	x	y
65	1,563	3,341
66	3,096	3,306
67	1,08	3,302
68	0,875	3,276
69	3,387	3,272
70	0,814	3,24
71	1,415	3,236
72	0,734	3,224
73	2,324	3,223
74	1,593	3,206
75	1,327	3,199
76	1,061	3,176
77	1,18	3,175
78	3,035	3,16
79	0,859	3,118
80	1,004	3,118
81	0,931	3,117
82	3,01	3,115
83	3,104	3,092
84	2,995	3,078
85	1,29	3,074
86	1,058	3,054
87	1,457	3,044
88	2,98	3,041
89	3,267	3,038
90	3,169	3,024
91	1,183	3,022
92	0,729	3,016
93	1,372	3,016
94	2,964	3,004
95	3,257	3,001
96	0,808	2,999

Nodo i	x	y
97	1,138	2,99
98	0,889	2,974
99	3,245	2,973
100	1,239	2,969
101	2,948	2,967
102	3,047	2,957
103	0,959	2,945
104	3,234	2,944
105	3,286	2,923
106	3,221	2,915
107	1,455	2,912
108	1,221	2,901
109	1,347	2,893
110	0,755	2,885
111	1,036	2,884
112	1,594	2,884
113	3,191	2,881
114	0,683	2,877
115	2,908	2,875
116	1,74	2,868
117	3,387	2,865
118	1,891	2,832
119	1,163	2,815
120	1,435	2,811
121	1,723	2,804
122	2,979	2,794
123	1,872	2,781
124	1,975	2,772
125	2,871	2,772
126	3,398	2,771
127	0,672	2,769
128	3,273	2,766

Nodo i	x	y
129	2,642	2,761
130	3,066	2,756
131	2,14	2,752
132	3,149	2,746
133	3,314	2,746
134	1,705	2,735
135	1,872	2,723
136	3,136	2,717
137	3,499	2,703
138	1,174	2,7
139	1,246	2,698
140	3,4	2,698
141	1,299	2,694
142	1,43	2,692
143	3,124	2,687
144	1,585	2,679
145	3,479	2,673
146	3,232	2,671
147	3,28	2,662
148	2,067	2,659
149	3,11	2,658
150	0,993	2,652
151	1,76	2,651
152	2,387	2,651
153	3,453	2,645
154	1,085	2,616
155	3,368	2,606
156	1,445	2,55
157	2,004	2,465
158	1,255	2,429
159	1,097	2,384
160	1,495	2,384

Nodo i	x	y
161	0,745	2,36
162	1,789	2,359
163	1,607	2,252
164	1,151	2,215
165	1,28	2,067
166	1,585	2,062
167	1,909	1,97
168	2,191	1,91
169	1,555	1,867
170	1,923	1,698
171	0,782	1,633
172	2,066	1,545
173	1,768	1,385
174	2,067	1,37
175	1,097	1,304
176	1,692	1,158
177	1,561	1,074
178	0,548	0,829
179	0,754	0,761
180	1,126	0,755
181	0,841	0,753
182	0,934	0,744
183	1,027	0,741
184	1,274	0,663
185	0,708	0,483
186	0,905	0,481
187	0,807	0,478

9.2. Coordenadas Nodos Candidatos j

Nodo j	x	y
1	1,230	2,508
2	2,510	2,584
3	2,694	2,579
4	3,258	2,492

9.3. Distancia entre Nodos Demanda i y Nodos Candidatos j

Distancia i\j	1	2	3	4
1	2,367	3,571	3,760	4,411
2	2,235	3,439	3,628	4,279
3	2,025	3,229	3,418	4,069
4	1,929	3,133	3,322	3,973
5	2,051	3,255	3,444	4,095
6	1,718	2,878	3,067	3,718
7	2,112	3,316	3,505	4,156
8	1,792	2,696	2,885	3,536
9	2,298	2,190	2,379	3,030
10	1,871	3,075	3,264	3,915
11	1,602	2,806	2,995	3,646
12	1,917	2,437	2,626	3,277
13	1,952	3,156	3,345	3,996
14	1,550	2,754	2,943	3,594
15	1,813	2,327	2,516	3,167
16	1,767	2,971	3,160	3,811
17	1,561	2,765	2,954	3,605
18	2,182	1,858	2,047	2,698
19	1,825	3,029	3,218	3,869
20	1,642	2,278	2,467	3,118
21	2,026	1,884	2,073	2,724
22	1,610	2,814	3,003	3,654
23	1,351	2,555	2,744	3,395
24	2,413	1,341	1,530	2,181
25	2,168	1,574	1,763	2,414
26	1,893	1,833	2,022	2,673
27	1,265	2,469	2,658	3,309
28	1,464	2,230	2,419	3,070
29	2,603	1,247	1,232	1,883
30	1,371	2,575	2,764	3,415
31	2,310	1,314	1,503	2,154
32	2,058	1,528	1,717	2,368

Distancia i\j	1	2	3	4
33	1,314	2,258	2,447	3,098
34	1,816	1,754	1,943	2,594
35	1,632	1,932	2,121	2,772
36	1,409	2,613	2,802	3,453
37	1,523	2,727	2,916	3,567
38	2,901	1,545	1,366	1,447
39	1,648	2,852	3,041	3,692
40	1,941	1,549	1,738	2,389
41	1,754	2,958	3,147	3,798
42	1,199	2,403	2,592	3,243
43	1,173	2,225	2,414	3,065
44	2,759	1,403	1,224	1,477
45	1,446	1,920	2,109	2,760
46	1,712	1,634	1,823	2,474
47	2,690	1,334	1,155	1,492
48	2,845	1,489	1,310	1,307
49	1,295	2,005	2,194	2,845
50	1,570	1,728	1,917	2,568
51	1,029	2,233	2,422	3,073
52	1,099	2,303	2,492	3,143
53	2,792	1,436	1,257	1,240
54	1,167	2,371	2,560	3,211
55	1,506	2,710	2,899	3,550
56	1,248	2,452	2,641	3,292
57	1,091	1,981	2,170	2,821
58	0,957	2,103	2,292	2,943
59	1,379	1,593	1,782	2,433
60	1,132	1,834	2,023	2,674
61	1,392	2,596	2,785	3,436
62	0,857	2,041	2,230	2,881
63	1,303	2,507	2,696	3,347
64	1,175	2,379	2,568	3,219

Distancia $i \setminus j$	1	2	3	4
65	1,166	1,704	1,893	2,544
66	2,664	1,308	1,129	0,976
67	0,944	2,148	2,337	2,988
68	1,123	2,327	2,516	3,167
69	2,921	1,565	1,386	0,909
70	1,148	2,352	2,541	3,192
71	0,913	1,747	1,936	2,587
72	1,212	2,416	2,605	3,256
73	1,809	0,825	1,014	1,665
74	1,061	1,539	1,728	2,379
75	0,788	1,798	1,987	2,638
76	0,837	2,041	2,230	2,881
77	0,717	1,921	2,110	2,761
78	2,457	1,101	0,922	0,891
79	0,981	2,185	2,374	3,025
80	0,836	2,040	2,229	2,880
81	0,908	2,112	2,301	2,952
82	2,387	1,031	0,852	0,871
83	2,458	1,102	0,923	0,754
84	2,335	0,979	0,800	0,849
85	0,626	1,710	1,899	2,550
86	0,718	1,922	2,111	2,762
87	0,763	1,513	1,702	2,353
88	2,283	0,927	0,748	0,827
89	2,567	1,211	1,032	0,555
90	2,455	1,099	0,920	0,621
91	0,561	1,765	1,954	2,605
92	1,009	2,213	2,402	3,053
93	0,650	1,570	1,759	2,410
94	2,230	0,874	0,695	0,806
95	2,520	1,164	0,985	0,510
96	0,913	2,117	2,306	2,957

Distancia $i \setminus j$	1	2	3	4
97	0,574	1,778	1,967	2,618
98	0,807	2,011	2,200	2,851
99	2,480	1,124	0,945	0,494
100	0,470	1,656	1,845	2,496
101	2,177	0,821	0,642	0,785
102	2,266	0,910	0,731	0,676
103	0,708	1,912	2,101	2,752
104	2,440	1,084	0,905	0,476
105	2,471	1,115	0,936	0,459
106	2,398	1,042	0,863	0,460
107	0,629	1,383	1,572	2,223
108	0,402	1,606	1,795	2,446
109	0,502	1,472	1,661	2,312
110	0,852	2,056	2,245	2,896
111	0,570	1,774	1,963	2,614
112	0,740	1,216	1,405	2,056
113	2,334	0,978	0,799	0,456
114	0,916	2,120	2,309	2,960
115	2,045	0,689	0,510	0,733
116	0,870	1,054	1,243	1,894
117	2,514	1,158	0,979	0,502
118	0,985	0,867	1,056	1,707
119	0,374	1,578	1,767	2,418
120	0,508	1,302	1,491	2,142
121	0,789	1,007	1,196	1,847
122	2,035	0,679	0,500	0,581
123	0,915	0,835	1,024	1,675
124	1,009	0,723	0,912	1,563
125	1,905	0,549	0,370	0,667
126	2,431	1,075	0,896	0,419
127	0,819	2,023	2,212	2,863
128	2,301	0,945	0,766	0,289

Distancia $i \setminus j$	1	2	3	4
129	1,665	0,309	0,234	0,885
130	2,084	0,728	0,549	0,456
131	1,154	0,538	0,727	1,378
132	2,157	0,801	0,622	0,363
133	2,322	0,966	0,787	0,310
134	0,702	0,956	1,145	1,796
135	0,857	0,777	0,966	1,617
136	2,115	0,759	0,580	0,347
137	2,464	1,108	0,929	0,452
138	0,248	1,452	1,641	2,292
139	0,206	1,378	1,567	2,218
140	2,360	1,004	0,825	0,348
141	0,255	1,321	1,510	2,161
142	0,384	1,188	1,377	2,028
143	2,073	0,717	0,538	0,329
144	0,526	1,020	1,209	1,860
145	2,414	1,058	0,879	0,402
146	2,165	0,809	0,630	0,205
147	2,204	0,848	0,669	0,192
148	0,988	0,518	0,707	1,358
149	2,030	0,674	0,495	0,314
150	0,381	1,585	1,774	2,425
151	0,673	0,817	1,006	1,657
152	1,300	0,190	0,379	1,030
153	2,360	1,004	0,825	0,348
154	0,253	1,457	1,646	2,297
155	2,236	0,880	0,701	0,224
156	0,257	1,099	1,278	1,871
157	0,817	0,625	0,804	1,281
158	0,104	1,410	1,589	2,066
159	0,257	1,613	1,792	2,269
160	0,389	1,215	1,394	1,871

Distancia $i \setminus j$	1	2	3	4
161	0,633	1,989	2,168	2,645
162	0,708	0,946	1,125	1,602
163	0,633	1,235	1,414	1,891
164	0,372	1,728	1,907	2,384
165	0,491	1,747	1,926	2,403
166	0,801	1,447	1,626	2,103
167	1,217	1,215	1,394	1,871
168	1,559	0,993	1,172	1,649
169	0,966	1,672	1,851	2,328
170	1,503	1,473	1,652	2,129
171	1,323	2,679	2,858	3,335
172	1,799	1,483	1,662	2,139
173	1,661	1,941	2,120	2,597
174	1,975	1,657	1,836	2,313
175	1,337	2,693	2,872	3,349
176	1,812	2,244	2,423	2,900
177	1,765	2,459	2,638	3,115
178	2,361	3,717	3,896	4,373
179	2,223	3,579	3,758	4,235
180	1,857	3,213	3,392	3,869
181	2,144	3,500	3,679	4,156
182	2,060	3,416	3,595	4,072
183	1,970	3,326	3,505	3,982
184	1,889	3,157	3,336	3,813
185	2,547	3,903	4,082	4,559
186	2,352	3,708	3,887	4,364
187	2,453	3,809	3,988	4,465

9.4. Demanda Nodos Demanda i

Nodo i	Hab/Manz
1	60
2	0
3	19
4	60
5	11
6	45
7	19
8	40
9	60
10	60
11	22
12	30
13	19
14	25
15	19
16	11
17	60
18	52
19	22
20	20
21	16
22	8
23	11
24	16
25	18
26	23
27	60
28	60
29	27
30	10
31	17
32	29

Nodo i	Hab/Manz
33	27
34	11
35	18
36	19
37	15
38	54
39	8
40	60
41	19
42	12
43	20
44	61
45	14
46	60
47	16
48	41
49	14
50	22
51	19
52	19
53	13
54	19
55	19
56	19
57	60
58	19
59	10
60	60
61	19
62	9
63	19
64	19

Nodo i	Hab/Manz
65	14
66	0
67	19
68	0
69	39
70	19
71	19
72	12
73	229
74	60
75	19
76	19
77	0
78	71
79	0
80	19
81	19
82	95
83	111
84	97
85	19
86	19
87	19
88	109
89	54
90	119
91	0
92	19
93	36
94	116
95	61
96	0

Nodo i	Hab/Manz
97	0
98	19
99	54
100	0
101	69
102	14
103	19
104	54
105	210
106	61
107	19
108	19
109	19
110	19
111	19
112	20
113	38
114	19
115	83
116	22
117	37
118	16
119	8
120	22
121	27
122	117
123	16
124	61
125	0
126	77
127	0
128	90

Nodo i	Hab/Manz
129	31
130	131
131	82
132	45
133	101
134	21
135	10
136	55
137	27
138	14
139	19
140	99
141	11
142	11
143	53
144	13
145	37
146	56
147	71
148	117
149	26
150	19
151	19
152	140
153	22
154	19
155	53
156	19
157	107
158	32
159	19
160	26

Nodo i	Hab/Manz
161	31
162	111
163	30
164	18
165	10
166	70
167	97
168	47
169	90
170	90
171	20
172	41
173	40
174	58
175	48
176	17
177	13
178	68
179	0
180	24
181	24
182	24
183	24
184	19
185	0
186	24
187	11

9.5. Población Santo Domingo según CENSO 2017 (INE, 2017)

Edad	Área Urbana			Área Rural			Total Comunal
	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total	
0 a 4	215	228	443	142	112	254	697
5 a 9	234	224	458	167	157	324	782
10 a 14	200	221	421	161	166	327	748
15 a 19	199	192	391	145	114	259	650
20 a 24	154	170	324	109	113	222	546
25 a 29	199	215	414	168	139	307	721
30 a 34	205	249	454	166	140	306	760
35 a 39	190	239	429	167	156	323	752
40 a 44	239	248	487	181	165	346	833
45 a 49	213	223	436	195	176	371	807
50 a 54	216	219	435	215	170	385	820
55 a 59	178	204	382	175	153	328	710
60 a 64	158	181	339	147	131	278	617
65 a 69	118	136	254	119	91	210	464
70 a 74	95	120	215	88	93	181	396
75 a 79	64	72	136	66	53	119	255
80 a 84	46	49	95	27	38	65	160
85 a 89	26	42	68	25	31	56	124
90 a 94	8	19	27	6	11	17	44
95 a 99	0	6	6	2	3	5	11
100 o más	0	2	2	0	1	1	3
Totales	2.957	3.259	6.216	2.471	2.213	4.684	10.900

9.6. Código AMPL Problema

Archivo .mod

```
##### CONJUNTOS #####

set I :={1..187};          #Nodos Demanda
set J :={1..4};           #Nodos Candidatos

##### PARAMETROS #####

param d{i in I,j in J};   #Distancia entre nodo i y nodo j [km]
param s :=1;              #Distancia s=1[km]
param t :=1.5;            #Distancia t=2[km]
param r :=2;              #Distancia r=3.5[km]
param h{i in I};          #Demanda nodo i [habitantes]
param ws :=0.46;          #Nivel de servicio al 0.46 para una distancia entre 0 y s
param wt :=0.31;          #Nivel de servicio al 0.31 para una distancia entre s y t
param wr{i in I, j in J} :=
wt-(1/(r-t))*((d[i,j]-t)*wt); #Nivel de servicio funcion decreciente para una distancia entre t y
r
param p :=1;              #Restricción presupuestaria. Número de terminales que se pueden
instalar, en este caso es 1

##### VARIABLES #####

var x{j in J} binary;     #Se instala el terminal de buses en el nodo candidato j
var y{i in I} binary;     #El nodo i está cubierto por un terminal j, con un nivel de servicio
ws
var z{i in I} binary;     #El nodo i está cubierto por un terminal j, con un nivel de servicio
wt
var q{i in I, j in J} binary; #El nodo i está cubierto por un terminal j, con un nivel de servicio
wr

##### RESTRICCIONES #####

s.t. cobertura_demanda_y{i in I}:          # Indica que el nodo i no puede estar cubierto en un
radio s, si no existe algún servicio instalado en la vecindad Ni
sum {j in J: d[i,j] <= s} x[j] >= y[i]
;

s.t. cobertura_demanda_z{i in I}:          # Indica que el nodo i no puede estar cubierto en un
radio entre s y t, si no existe algún servicio instalado en la vecindad Mi
sum {j in J: s < d[i,j] <= t} x[j] >= z[i]
;

s.t. cobertura_demanda_q{i in I, j in J}:   # Indica que el nodo i no puede estar cubierto en un
radio entre t y r, si no existe algún servicio instalado en la vecindad Ui
sum {u in J: t < d[i,j] <= r} x[j] >= q[i,j]
;

s.t. solo_una_cobertura_x{i in I, j in J}:  #Esta restricción indica que los nodos demandan
pueden ser cubiertos por sólo una distancia (0-s, s-t, t-r)
y[i] + z[i] + q[i,j] <= 1
;

s.t. restriccion_presupuestaria{i in I}:    #Restricción presupuestaria: No se pueden instalar
más de P servidores en el conjunto de nodos candidatos
sum {j in J} x[j] <= p
;

##### FUNCION OBJETIVO #####

maximize cobertura:
sum {i in I} (ws*h[i]*y[i] + wt*h[i]*z[i]) + sum {i in I, j in J} (wr[i,j]*h[i]*q[i,j])
;
```

Archivo .dat

```

##### PARAMETROS #####
#Distancia entre nodo candidato j y odo demanda i
param d:

```

	1	2	3	4:=
1	2.367	3.571	3.760	4.411
2	2.235	3.439	3.628	4.279
3	2.025	3.229	3.418	4.069
4	1.929	3.133	3.322	3.973
5	2.051	3.255	3.444	4.095
6	1.718	2.878	3.067	3.718
7	2.112	3.316	3.505	4.156
8	1.792	2.696	2.885	3.536
9	2.298	2.190	2.379	3.030
10	1.871	3.075	3.264	3.915
11	1.602	2.806	2.995	3.646
12	1.917	2.437	2.626	3.277
13	1.952	3.156	3.345	3.996
14	1.550	2.754	2.943	3.594
15	1.813	2.327	2.516	3.167
16	1.767	2.971	3.160	3.811
17	1.561	2.765	2.954	3.605
18	2.182	1.858	2.047	2.698
19	1.825	3.029	3.218	3.869
20	1.642	2.278	2.467	3.118
21	2.026	1.884	2.073	2.724
22	1.610	2.814	3.003	3.654
23	1.351	2.555	2.744	3.395
24	2.413	1.341	1.530	2.181
25	2.168	1.574	1.763	2.414
26	1.893	1.833	2.022	2.673
27	1.265	2.469	2.658	3.309
28	1.464	2.230	2.419	3.070
29	2.603	1.247	1.232	1.883
30	1.371	2.575	2.764	3.415
31	2.310	1.314	1.503	2.154
32	2.058	1.528	1.717	2.368
33	1.314	2.258	2.447	3.098
34	1.816	1.754	1.943	2.594
35	1.632	1.932	2.121	2.772
36	1.409	2.613	2.802	3.453
37	1.523	2.727	2.916	3.567
38	2.901	1.545	1.366	1.447
39	1.648	2.852	3.041	3.692
40	1.941	1.549	1.738	2.389
41	1.754	2.958	3.147	3.798
42	1.199	2.403	2.592	3.243
43	1.173	2.225	2.414	3.065
44	2.759	1.403	1.224	1.477
45	1.446	1.920	2.109	2.760
46	1.712	1.634	1.823	2.474
47	2.690	1.334	1.155	1.492
48	2.845	1.489	1.310	1.307
49	1.295	2.005	2.194	2.845
50	1.570	1.728	1.917	2.568
51	1.029	2.233	2.422	3.073
52	1.099	2.303	2.492	3.143
53	2.792	1.436	1.257	1.240
54	1.167	2.371	2.560	3.211
55	1.506	2.710	2.899	3.550
56	1.248	2.452	2.641	3.292
57	1.091	1.981	2.170	2.821
58	0.957	2.103	2.292	2.943
59	1.379	1.593	1.782	2.433
60	1.132	1.834	2.023	2.674
61	1.392	2.596	2.785	3.436
62	0.857	2.041	2.230	2.881

63	1.303	2.507	2.696	3.347
64	1.175	2.379	2.568	3.219
65	1.166	1.704	1.893	2.544
66	2.664	1.308	1.129	0.976
67	0.944	2.148	2.337	2.988
68	1.123	2.327	2.516	3.167
69	2.921	1.565	1.386	0.909
70	1.148	2.352	2.541	3.192
71	0.913	1.747	1.936	2.587
72	1.212	2.416	2.605	3.256
73	1.809	0.825	1.014	1.665
74	1.061	1.539	1.728	2.379
75	0.788	1.798	1.987	2.638
76	0.837	2.041	2.230	2.881
77	0.717	1.921	2.110	2.761
78	2.457	1.101	0.922	0.891
79	0.981	2.185	2.374	3.025
80	0.836	2.040	2.229	2.880
81	0.908	2.112	2.301	2.952
82	2.387	1.031	0.852	0.871
83	2.458	1.102	0.923	0.754
84	2.335	0.979	0.800	0.849
85	0.626	1.710	1.899	2.550
86	0.718	1.922	2.111	2.762
87	0.763	1.513	1.702	2.353
88	2.283	0.927	0.748	0.827
89	2.567	1.211	1.032	0.555
90	2.455	1.099	0.920	0.621
91	0.561	1.765	1.954	2.605
92	1.009	2.213	2.402	3.053
93	0.650	1.570	1.759	2.410
94	2.230	0.874	0.695	0.806
95	2.520	1.164	0.985	0.510
96	0.913	2.117	2.306	2.957
97	0.574	1.778	1.967	2.618
98	0.807	2.011	2.200	2.851
99	2.480	1.124	0.945	0.494
100	0.470	1.656	1.845	2.496
101	2.177	0.821	0.642	0.785
102	2.266	0.910	0.731	0.676
103	0.708	1.912	2.101	2.752
104	2.440	1.084	0.905	0.476
105	2.471	1.115	0.936	0.459
106	2.398	1.042	0.863	0.460
107	0.629	1.383	1.572	2.223
108	0.402	1.606	1.795	2.446
109	0.502	1.472	1.661	2.312
110	0.852	2.056	2.245	2.896
111	0.570	1.774	1.963	2.614
112	0.740	1.216	1.405	2.056
113	2.334	0.978	0.799	0.456
114	0.916	2.120	2.309	2.960
115	2.045	0.689	0.510	0.733
116	0.870	1.054	1.243	1.894
117	2.514	1.158	0.979	0.502
118	0.985	0.867	1.056	1.707
119	0.374	1.578	1.767	2.418
120	0.508	1.302	1.491	2.142
121	0.789	1.007	1.196	1.847
122	2.035	0.679	0.500	0.581
123	0.915	0.835	1.024	1.675
124	1.009	0.723	0.912	1.563
125	1.905	0.549	0.370	0.667
126	2.431	1.075	0.896	0.419
127	0.819	2.023	2.212	2.863
128	2.301	0.945	0.766	0.289
129	1.665	0.309	0.234	0.885
130	2.084	0.728	0.549	0.456
131	1.154	0.538	0.727	1.378

132	2.157	0.801	0.622	0.363
133	2.322	0.966	0.787	0.310
134	0.702	0.956	1.145	1.796
135	0.857	0.777	0.966	1.617
136	2.115	0.759	0.580	0.347
137	2.464	1.108	0.929	0.452
138	0.248	1.452	1.641	2.292
139	0.206	1.378	1.567	2.218
140	2.360	1.004	0.825	0.348
141	0.255	1.321	1.510	2.161
142	0.384	1.188	1.377	2.028
143	2.073	0.717	0.538	0.329
144	0.526	1.020	1.209	1.860
145	2.414	1.058	0.879	0.402
146	2.165	0.809	0.630	0.205
147	2.204	0.848	0.669	0.192
148	0.988	0.518	0.707	1.358
149	2.030	0.674	0.495	0.314
150	0.381	1.585	1.774	2.425
151	0.673	0.817	1.006	1.657
152	1.300	0.190	0.379	1.030
153	2.360	1.004	0.825	0.348
154	0.253	1.457	1.646	2.297
155	2.236	0.880	0.701	0.224
156	0.257	1.099	1.278	1.871
157	0.817	0.625	0.804	1.281
158	0.104	1.410	1.589	2.066
159	0.257	1.613	1.792	2.269
160	0.389	1.215	1.394	1.871
161	0.633	1.989	2.168	2.645
162	0.708	0.946	1.125	1.602
163	0.633	1.235	1.414	1.891
164	0.372	1.728	1.907	2.384
165	0.491	1.747	1.926	2.403
166	0.801	1.447	1.626	2.103
167	1.217	1.215	1.394	1.871
168	1.559	0.993	1.172	1.649
169	0.966	1.672	1.851	2.328
170	1.503	1.473	1.652	2.129
171	1.323	2.679	2.858	3.335
172	1.799	1.483	1.662	2.139
173	1.661	1.941	2.120	2.597
174	1.975	1.657	1.836	2.313
175	1.337	2.693	2.872	3.349
176	1.812	2.244	2.423	2.900
177	1.765	2.459	2.638	3.115
178	2.361	3.717	3.896	4.373
179	2.223	3.579	3.758	4.235
180	1.857	3.213	3.392	3.869
181	2.144	3.500	3.679	4.156
182	2.060	3.416	3.595	4.072
183	1.970	3.326	3.505	3.982
184	1.889	3.157	3.336	3.813
185	2.547	3.903	4.082	4.559
186	2.352	3.708	3.887	4.364
187	2.453	3.809	3.988	4.465

;

#Demanda de habitantes por manzana i
param h:=
1 60
2 0
3 19
4 60
5 11
6 45
7 19
8 40

9	60
10	60
11	22
12	30
13	19
14	25
15	19
16	11
17	60
18	52
19	22
20	20
21	16
22	8
23	11
24	16
25	18
26	23
27	60
28	60
29	27
30	10
31	17
32	29
33	27
34	11
35	18
36	19
37	15
38	54
39	8
40	60
41	19
42	12
43	20
44	61
45	14
46	60
47	16
48	41
49	14
50	22
51	19
52	19
53	13
54	19
55	19
56	19
57	60
58	19
59	10
60	60
61	19
62	9
63	19
64	19
65	14
66	0
67	19
68	0
69	39
70	19
71	19
72	12
73	229
74	60
75	19
76	19
77	0

78	71
79	0
80	19
81	19
82	95
83	111
84	97
85	19
86	19
87	19
88	109
89	54
90	119
91	0
92	19
93	36
94	116
95	61
96	0
97	0
98	19
99	54
100	0
101	69
102	14
103	19
104	54
105	210
106	61
107	19
108	19
109	19
110	19
111	19
112	20
113	38
114	19
115	83
116	22
117	37
118	16
119	8
120	22
121	27
122	117
123	16
124	61
125	0
126	77
127	0
128	90
129	31
130	131
131	82
132	45
133	101
134	21
135	10
136	55
137	27
138	14
139	19
140	99
141	11
142	11
143	53
144	13
145	37
146	56

147	71
148	117
149	26
150	19
151	19
152	140
153	22
154	19
155	53
156	19
157	107
158	32
159	19
160	26
161	31
162	111
163	30
164	18
165	10
166	70
167	97
168	47
169	90
170	90
171	20
172	41
173	40
174	58
175	48
176	17
177	13
178	68
179	0
180	24
181	24
182	24
183	24
184	19
185	0
186	24
187	11
;	

Archivo .run

```
reset;
model memoria_cl.mod;
data memoria_cl.dat;
option solver Highs;
solve cobertura;
print "";
print "##### RESOLUCION #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
display y, z, q;
print "#####";
reset;
```

Resultado

```

ampl: reset;
ampl: include 'C:\AMPL\memoria_cl.run';
HiGHS 1.4.0:          HiGHS 1.4.0: optimal solution; objective 1887.85574
0 simplex iterations
1 branching nodes

```

```
##### RESOLUCION #####
```

Cobertura por nivel de servicio: 1887.86

Localización

x [*] :=

```

1  0
2  1
3  0
4  0
;

```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
32 , 43 , 36

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
2331 , 2001 , 1101

```

:      y      z      :=
1      0      0
2      0      0
3      0      0
4      0      0
5      0      0
6      0      0
7      0      0
8      0      0
9      0      0
10     0      0
11     0      0
12     0      0
13     0      0
14     0      0
15     0      0
16     0      0
17     0      0
18     0      0
19     0      0
20     0      0
21     0      0
22     0      0
23     0      0
24     0      1
25     0      0
26     0      0
27     0      0
28     0      0
29     0      1
30     0      0
31     0      1
32     0      0
33     0      0
34     0      0
35     0      0
36     0      0
37     0      0
38     0      0
39     0      0
40     0      0
41     0      0

```

42	0	0
43	0	0
44	0	1
45	0	0
46	0	0
47	0	1
48	0	1
49	0	0
50	0	0
51	0	0
52	0	0
53	0	1
54	0	0
55	0	0
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	0	0
60	0	0
61	0	0
62	0	0
63	0	0
64	0	0
65	0	0
66	0	0
67	0	0
68	0	0
69	0	0
70	0	0
71	0	0
72	0	0
73	1	0
74	0	0
75	0	0
76	0	0
77	0	0
78	0	1
79	0	0
80	0	0
81	0	0
82	0	1
83	0	1
84	1	0
85	0	0
86	0	0
87	0	0
88	1	0
89	0	1
90	0	1
91	0	0
92	0	0
93	0	0
94	1	0
95	0	1
96	0	0
97	0	0
98	0	0
99	0	1
100	0	0
101	1	0
102	1	0
103	0	0
104	0	1
105	0	1
106	0	1
107	0	1
108	0	0
109	0	1
110	0	0

111	0	0
112	0	1
113	1	0
114	0	0
115	1	0
116	0	1
117	0	1
118	1	0
119	0	0
120	0	1
121	0	1
122	1	0
123	1	0
124	1	0
125	0	0
126	0	1
127	0	0
128	1	0
129	1	0
130	1	0
131	1	0
132	1	0
133	1	0
134	1	0
135	1	0
136	1	0
137	0	1
138	0	1
139	0	1
140	0	1
141	0	1
142	0	1
143	1	0
144	0	1
145	0	1
146	1	0
147	1	0
148	1	0
149	1	0
150	0	0
151	1	0
152	1	0
153	0	1
154	0	1
155	1	0
156	0	1
157	1	0
158	0	1
159	0	0
160	0	1
161	0	0
162	1	0
163	0	1
164	0	0
165	0	0
166	0	1
167	0	1
168	1	0
169	0	0
170	0	1
171	0	0
172	0	1
173	0	0
174	0	0
175	0	0
176	0	0
177	0	0
178	0	0
179	0	0

```

180  0  0
181  0  0
182  0  0
183  0  0
184  0  0
185  0  0
186  0  0
187  0  0
;

```

```

q [*,*]
:      1  2  3  4      :=
1      0  0  0  0
2      0  0  0  0
3      0  0  0  0
4      0  0  0  0
5      0  0  0  0
6      0  0  0  0
7      0  0  0  0
8      0  0  0  0
9      0  0  0  0
10     0  0  0  0
11     0  0  0  0
12     0  0  0  0
13     0  0  0  0
14     0  0  0  0
15     0  0  0  0
16     0  0  0  0
17     0  0  0  0
18     0  1  0  0
19     0  0  0  0
20     0  0  0  0
21     0  1  0  0
22     0  0  0  0
23     0  0  0  0
24     0  0  0  0
25     0  1  0  0
26     0  1  0  0
27     0  0  0  0
28     0  0  0  0
29     0  0  0  0
30     0  0  0  0
31     0  0  0  0
32     0  1  0  0
33     0  0  0  0
34     0  1  0  0
35     0  1  0  0
36     0  0  0  0
37     0  0  0  0
38     0  1  0  0
39     0  0  0  0
40     0  1  0  0
41     0  0  0  0
42     0  0  0  0
43     0  0  0  0
44     0  0  0  0
45     0  1  0  0
46     0  1  0  0
47     0  0  0  0
48     0  0  0  0
49     0  0  0  0
50     0  1  0  0
51     0  0  0  0
52     0  0  0  0
53     0  0  0  0
54     0  0  0  0
55     0  0  0  0
56     0  0  0  0
57     0  1  0  0

```

58	0	0	0	0
59	0	1	0	0
60	0	1	0	0
61	0	0	0	0
62	0	0	0	0
63	0	0	0	0
64	0	0	0	0
65	0	1	0	0
66	0	0	0	0
67	0	0	0	0
68	0	0	0	0
69	0	1	0	0
70	0	0	0	0
71	0	1	0	0
72	0	0	0	0
73	0	0	0	0
74	0	1	0	0
75	0	1	0	0
76	0	0	0	0
77	0	0	0	0
78	0	0	0	0
79	0	0	0	0
80	0	0	0	0
81	0	0	0	0
82	0	0	0	0
83	0	0	0	0
84	0	0	0	0
85	0	1	0	0
86	0	1	0	0
87	0	1	0	0
88	0	0	0	0
89	0	0	0	0
90	0	0	0	0
91	0	0	0	0
92	0	0	0	0
93	0	1	0	0
94	0	0	0	0
95	0	0	0	0
96	0	0	0	0
97	0	0	0	0
98	0	0	0	0
99	0	0	0	0
100	0	0	0	0
101	0	0	0	0
102	0	0	0	0
103	0	1	0	0
104	0	0	0	0
105	0	0	0	0
106	0	0	0	0
107	0	0	0	0
108	0	1	0	0
109	0	0	0	0
110	0	0	0	0
111	0	1	0	0
112	0	0	0	0
113	0	0	0	0
114	0	0	0	0
115	0	0	0	0
116	0	0	0	0
117	0	0	0	0
118	0	0	0	0
119	0	1	0	0
120	0	0	0	0
121	0	0	0	0
122	0	0	0	0
123	0	0	0	0
124	0	0	0	0
125	0	0	0	0
126	0	0	0	0

```
127 0 0 0 0
128 0 0 0 0
129 0 0 0 0
130 0 0 0 0
131 0 0 0 0
132 0 0 0 0
133 0 0 0 0
134 0 0 0 0
135 0 0 0 0
136 0 0 0 0
137 0 0 0 0
138 0 0 0 0
139 0 0 0 0
140 0 0 0 0
141 0 0 0 0
142 0 0 0 0
143 0 0 0 0
144 0 0 0 0
145 0 0 0 0
146 0 0 0 0
147 0 0 0 0
148 0 0 0 0
149 0 0 0 0
150 0 1 0 0
151 0 0 0 0
152 0 0 0 0
153 0 0 0 0
154 0 0 0 0
155 0 0 0 0
156 0 0 0 0
157 0 0 0 0
158 0 0 0 0
159 0 1 0 0
160 0 0 0 0
161 0 1 0 0
162 0 0 0 0
163 0 0 0 0
164 0 1 0 0
165 0 1 0 0
166 0 0 0 0
167 0 0 0 0
168 0 0 0 0
169 0 1 0 0
170 0 0 0 0
171 0 0 0 0
172 0 0 0 0
173 0 1 0 0
174 0 1 0 0
175 0 0 0 0
176 0 0 0 0
177 0 0 0 0
178 0 0 0 0
179 0 0 0 0
180 0 0 0 0
181 0 0 0 0
182 0 0 0 0
183 0 0 0 0
184 0 0 0 0
185 0 0 0 0
186 0 0 0 0
187 0 0 0 0
;
```

```
#####
ampl:
```

9.7. Código AMPL Sensibilización

Archivo .mod

```
##### CONJUNTOS #####

set I :={1..187};      #Nodos Demanda
set J :={1..4};        #Nodos Candidatos

##### PARAMETROS #####

param d{i in I,j in J};      #Distancia entre nodo i y nodo j [km]
#param s :=1;                #Distancia s=1[km]
#param t :=1.5;              #Distancia t=2[km]
#param r :=2;                #Distancia r=3.5[km]
param h{i in I};            #Demanda nodo i [habitantes]
param ws :=0.46;            #Nivel de servicio al 0.46 para una distancia entre 0 y s
param wt :=0.31;            #Nivel de servicio al 0.31 para una distancia entre s y t
param wr{i in I, j in J} :=
wt-(1/(r-t))*((d[i,j]-t)*wt); #Nivel de servicio funcion decreciente para una distancia entre t y
r
param p :=1;                #Restricción presupuestaria. Número de terminales que
se pueden instalar, en este caso es 1

##### VARIABLES #####

var x{j in J} binary;      #Se instala el terminal de buses en el nodo candidato j
var y{i in I} binary;      #El nodo i está cubierto por un terminal j, con un nivel de servicio
ws
var z{i in I} binary;      #El nodo i está cubierto por un terminal j, con un nivel de servicio
wt
var q{i in I, j in J} binary; #El nodo i está cubierto por un terminal j, con un nivel de servicio
wr

##### RESTRICCIONES #####

s.t. cobertura_demanda_y{i in I}:      # Indica que el nodo i no puede estar cubierto en un
radio s, si no existe algún servicio instalado en la vecindad Ni
sum {j in J: d[i,j] <= s} x[j] >= y[i]
;

s.t. cobertura_demanda_z{i in I}:      # Indica que el nodo i no puede estar cubierto en un
radio entre s y t, si no existe algún servicio instalado en la vecindad Mi
sum {j in J: s < d[i,j] <= t} x[j] >= z[i]
;

s.t. cobertura_demanda_q{i in I, j in J}: # Indica que el nodo i no puede estar cubierto en un
radio entre t y r, si no existe algún servicio instalado en la vecindad Ui
sum {u in J: t < d[i,j] <= r} x[j] >= q[i,j]
;

s.t. solo_una_cobertura_x{i in I, j in J}: #Esta restricción indica que los nodos demandan pueden
ser cubiertos por sólo una distancia (0-s, s-t, t-r)
y[i] + z[i] + q[i,j] <= 1
;

s.t. restriccion_presupuestaria{i in I}: #Restricción presupuestaria: No se pueden instalar
más de P servidores en el conjunto de nodos candidatos
sum {j in J} x[j] <= p
;

##### FUNCION OBJETIVO #####

maximize cobertura:
sum {i in I} (ws*h[i]*y[i] + wt*h[i]*z[i]) + sum {i in I, j in J} (wr[i,j]*h[i]*q[i,j])
;
```

Archivo .dat

```
##### PARAMETROS #####
#Distancia entre nodo candidato j y odo demanda i
param d:
    1      2      3      4:=
1      2.367  3.571  3.760  4.411
2      2.235  3.439  3.628  4.279
3      2.025  3.229  3.418  4.069
4      1.929  3.133  3.322  3.973
5      2.051  3.255  3.444  4.095
6      1.718  2.878  3.067  3.718
7      2.112  3.316  3.505  4.156
8      1.792  2.696  2.885  3.536
9      2.298  2.190  2.379  3.030
10     1.871  3.075  3.264  3.915
11     1.602  2.806  2.995  3.646
12     1.917  2.437  2.626  3.277
13     1.952  3.156  3.345  3.996
14     1.550  2.754  2.943  3.594
15     1.813  2.327  2.516  3.167
16     1.767  2.971  3.160  3.811
17     1.561  2.765  2.954  3.605
18     2.182  1.858  2.047  2.698
19     1.825  3.029  3.218  3.869
20     1.642  2.278  2.467  3.118
21     2.026  1.884  2.073  2.724
22     1.610  2.814  3.003  3.654
23     1.351  2.555  2.744  3.395
24     2.413  1.341  1.530  2.181
25     2.168  1.574  1.763  2.414
26     1.893  1.833  2.022  2.673
27     1.265  2.469  2.658  3.309
28     1.464  2.230  2.419  3.070
29     2.603  1.247  1.232  1.883
30     1.371  2.575  2.764  3.415
31     2.310  1.314  1.503  2.154
32     2.058  1.528  1.717  2.368
33     1.314  2.258  2.447  3.098
34     1.816  1.754  1.943  2.594
35     1.632  1.932  2.121  2.772
36     1.409  2.613  2.802  3.453
37     1.523  2.727  2.916  3.567
38     2.901  1.545  1.366  1.447
39     1.648  2.852  3.041  3.692
40     1.941  1.549  1.738  2.389
41     1.754  2.958  3.147  3.798
42     1.199  2.403  2.592  3.243
43     1.173  2.225  2.414  3.065
44     2.759  1.403  1.224  1.477
45     1.446  1.920  2.109  2.760
46     1.712  1.634  1.823  2.474
47     2.690  1.334  1.155  1.492
48     2.845  1.489  1.310  1.307
49     1.295  2.005  2.194  2.845
50     1.570  1.728  1.917  2.568
51     1.029  2.233  2.422  3.073
52     1.099  2.303  2.492  3.143
53     2.792  1.436  1.257  1.240
54     1.167  2.371  2.560  3.211
55     1.506  2.710  2.899  3.550
56     1.248  2.452  2.641  3.292
57     1.091  1.981  2.170  2.821
58     0.957  2.103  2.292  2.943
59     1.379  1.593  1.782  2.433
60     1.132  1.834  2.023  2.674
61     1.392  2.596  2.785  3.436
62     0.857  2.041  2.230  2.881
```

63	1.303	2.507	2.696	3.347
64	1.175	2.379	2.568	3.219
65	1.166	1.704	1.893	2.544
66	2.664	1.308	1.129	0.976
67	0.944	2.148	2.337	2.988
68	1.123	2.327	2.516	3.167
69	2.921	1.565	1.386	0.909
70	1.148	2.352	2.541	3.192
71	0.913	1.747	1.936	2.587
72	1.212	2.416	2.605	3.256
73	1.809	0.825	1.014	1.665
74	1.061	1.539	1.728	2.379
75	0.788	1.798	1.987	2.638
76	0.837	2.041	2.230	2.881
77	0.717	1.921	2.110	2.761
78	2.457	1.101	0.922	0.891
79	0.981	2.185	2.374	3.025
80	0.836	2.040	2.229	2.880
81	0.908	2.112	2.301	2.952
82	2.387	1.031	0.852	0.871
83	2.458	1.102	0.923	0.754
84	2.335	0.979	0.800	0.849
85	0.626	1.710	1.899	2.550
86	0.718	1.922	2.111	2.762
87	0.763	1.513	1.702	2.353
88	2.283	0.927	0.748	0.827
89	2.567	1.211	1.032	0.555
90	2.455	1.099	0.920	0.621
91	0.561	1.765	1.954	2.605
92	1.009	2.213	2.402	3.053
93	0.650	1.570	1.759	2.410
94	2.230	0.874	0.695	0.806
95	2.520	1.164	0.985	0.510
96	0.913	2.117	2.306	2.957
97	0.574	1.778	1.967	2.618
98	0.807	2.011	2.200	2.851
99	2.480	1.124	0.945	0.494
100	0.470	1.656	1.845	2.496
101	2.177	0.821	0.642	0.785
102	2.266	0.910	0.731	0.676
103	0.708	1.912	2.101	2.752
104	2.440	1.084	0.905	0.476
105	2.471	1.115	0.936	0.459
106	2.398	1.042	0.863	0.460
107	0.629	1.383	1.572	2.223
108	0.402	1.606	1.795	2.446
109	0.502	1.472	1.661	2.312
110	0.852	2.056	2.245	2.896
111	0.570	1.774	1.963	2.614
112	0.740	1.216	1.405	2.056
113	2.334	0.978	0.799	0.456
114	0.916	2.120	2.309	2.960
115	2.045	0.689	0.510	0.733
116	0.870	1.054	1.243	1.894
117	2.514	1.158	0.979	0.502
118	0.985	0.867	1.056	1.707
119	0.374	1.578	1.767	2.418
120	0.508	1.302	1.491	2.142
121	0.789	1.007	1.196	1.847
122	2.035	0.679	0.500	0.581
123	0.915	0.835	1.024	1.675
124	1.009	0.723	0.912	1.563
125	1.905	0.549	0.370	0.667
126	2.431	1.075	0.896	0.419
127	0.819	2.023	2.212	2.863
128	2.301	0.945	0.766	0.289
129	1.665	0.309	0.234	0.885
130	2.084	0.728	0.549	0.456
131	1.154	0.538	0.727	1.378

132	2.157	0.801	0.622	0.363
133	2.322	0.966	0.787	0.310
134	0.702	0.956	1.145	1.796
135	0.857	0.777	0.966	1.617
136	2.115	0.759	0.580	0.347
137	2.464	1.108	0.929	0.452
138	0.248	1.452	1.641	2.292
139	0.206	1.378	1.567	2.218
140	2.360	1.004	0.825	0.348
141	0.255	1.321	1.510	2.161
142	0.384	1.188	1.377	2.028
143	2.073	0.717	0.538	0.329
144	0.526	1.020	1.209	1.860
145	2.414	1.058	0.879	0.402
146	2.165	0.809	0.630	0.205
147	2.204	0.848	0.669	0.192
148	0.988	0.518	0.707	1.358
149	2.030	0.674	0.495	0.314
150	0.381	1.585	1.774	2.425
151	0.673	0.817	1.006	1.657
152	1.300	0.190	0.379	1.030
153	2.360	1.004	0.825	0.348
154	0.253	1.457	1.646	2.297
155	2.236	0.880	0.701	0.224
156	0.257	1.099	1.278	1.871
157	0.817	0.625	0.804	1.281
158	0.104	1.410	1.589	2.066
159	0.257	1.613	1.792	2.269
160	0.389	1.215	1.394	1.871
161	0.633	1.989	2.168	2.645
162	0.708	0.946	1.125	1.602
163	0.633	1.235	1.414	1.891
164	0.372	1.728	1.907	2.384
165	0.491	1.747	1.926	2.403
166	0.801	1.447	1.626	2.103
167	1.217	1.215	1.394	1.871
168	1.559	0.993	1.172	1.649
169	0.966	1.672	1.851	2.328
170	1.503	1.473	1.652	2.129
171	1.323	2.679	2.858	3.335
172	1.799	1.483	1.662	2.139
173	1.661	1.941	2.120	2.597
174	1.975	1.657	1.836	2.313
175	1.337	2.693	2.872	3.349
176	1.812	2.244	2.423	2.900
177	1.765	2.459	2.638	3.115
178	2.361	3.717	3.896	4.373
179	2.223	3.579	3.758	4.235
180	1.857	3.213	3.392	3.869
181	2.144	3.500	3.679	4.156
182	2.060	3.416	3.595	4.072
183	1.970	3.326	3.505	3.982
184	1.889	3.157	3.336	3.813
185	2.547	3.903	4.082	4.559
186	2.352	3.708	3.887	4.364
187	2.453	3.809	3.988	4.465

;

#Demanda de habitantes por manzana i
param h:=
1 60
2 0
3 19
4 60
5 11
6 45
7 19
8 40

9	60
10	60
11	22
12	30
13	19
14	25
15	19
16	11
17	60
18	52
19	22
20	20
21	16
22	8
23	11
24	16
25	18
26	23
27	60
28	60
29	27
30	10
31	17
32	29
33	27
34	11
35	18
36	19
37	15
38	54
39	8
40	60
41	19
42	12
43	20
44	61
45	14
46	60
47	16
48	41
49	14
50	22
51	19
52	19
53	13
54	19
55	19
56	19
57	60
58	19
59	10
60	60
61	19
62	9
63	19
64	19
65	14
66	0
67	19
68	0
69	39
70	19
71	19
72	12
73	229
74	60
75	19
76	19
77	0

78	71
79	0
80	19
81	19
82	95
83	111
84	97
85	19
86	19
87	19
88	109
89	54
90	119
91	0
92	19
93	36
94	116
95	61
96	0
97	0
98	19
99	54
100	0
101	69
102	14
103	19
104	54
105	210
106	61
107	19
108	19
109	19
110	19
111	19
112	20
113	38
114	19
115	83
116	22
117	37
118	16
119	8
120	22
121	27
122	117
123	16
124	61
125	0
126	77
127	0
128	90
129	31
130	131
131	82
132	45
133	101
134	21
135	10
136	55
137	27
138	14
139	19
140	99
141	11
142	11
143	53
144	13
145	37
146	56

147	71
148	117
149	26
150	19
151	19
152	140
153	22
154	19
155	53
156	19
157	107
158	32
159	19
160	26
161	31
162	111
163	30
164	18
165	10
166	70
167	97
168	47
169	90
170	90
171	20
172	41
173	40
174	58
175	48
176	17
177	13
178	68
179	0
180	24
181	24
182	24
183	24
184	19
185	0
186	24
187	11
;	

Archivo .run

```

reset;
option solver Highs;
option solver_msg 0;
#####SENSIBILIDAD 1#####
param s :=0;
param t :=0.5;
param r :=1;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 1 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 2#####
param s :=0.25;
param t :=0.75;
param r :=1.25;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 2 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 3#####
param s :=0.5;
param t :=1;
param r :=1.5;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 3 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];

```

```

print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 4#####
param s :=0.75;
param t :=1.25;
param r :=1.75;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 4 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 5#####
param s :=1;
param t :=1.5;
param r :=2;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 5 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 6#####
param s :=1.25;
param t :=1.75;
param r :=2.25;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 6 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];

```

```

print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 7#####
param s :=1.5;
param t :=2;
param r :=2.5;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 7 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 8#####
param s :=1.75;
param t :=2.25;
param r :=2.75;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 8 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 9#####
param s :=2;
param t :=2.5;
param r :=3;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 9 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];

```

```

print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 10#####
param s :=2.25;
param t :=2.75;
param r :=3.25;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 10 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 11#####
param s :=2.5;
param t :=3;
param r :=3.5;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 11 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 12#####
param s :=2.75;
param t :=3.25;
param r :=3.75;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 12 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];

```

```

print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;
#####SENSIBILIDAD 13#####
param s :=3;
param t :=3.5;
param r :=4;
model memoria_cl_sens.mod;
data memoria_cl_sens.dat;
solve;
print "";
print "##### SENSIBILIDAD 13 #####";
print "";
printf "Cobertura por nivel de servicio: %.2f \n", cobertura;
print "";
print "Localización";
display x;
print "Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i],",", sum {i in I} z[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j];
print "";
print "Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r";
print sum {i in I} y[i]*h[i],",", sum {i in I} z[i]*h[i],",", sum {i in I,j in J} q[i,j]*h[i];
print "";
print "#####";
print "";
reset;

```

Resultado

```
ampl: reset;
ampl: include 'C:\AMPL\memoria_cl_sens.run';
HiGHS 1.4.0:
##### SENSIBILIDAD 1 #####
```

Cobertura por nivel de servicio: 619.02

Localización

```
x [*] :=
1 0
2 0
3 0
4 1
;
```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
0 , 20 , 16

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
0 , 1360 , 1223

#####

```
HiGHS 1.4.0:
##### SENSIBILIDAD 2 #####
```

Cobertura por nivel de servicio: 871.12

Localización

```
x [*] :=
1 0
2 0
3 1
4 0
;
```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
1 , 17 , 36

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
31 , 1337 , 2318

#####

```
HiGHS 1.4.0:
##### SENSIBILIDAD 3 #####
```

Cobertura por nivel de servicio: 1176.63

Localización

```
x [*] :=
1 0
2 0
3 1
4 0
;
```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
4 , 36 , 25

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
314 , 2693 , 1051

#####

```
HiGHS 1.4.0:
```

SENSIBILIDAD 4

Cobertura por nivel de servicio: 1488.17

Localización

x [*] :=

1 0

2 1

3 0

4 0

;

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r

11 , 47 , 39

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r

948 , 2864 , 1220

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 5

Cobertura por nivel de servicio: 1887.86

Localización

x [*] :=

1 0

2 1

3 0

4 0

;

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r

32 , 43 , 36

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r

2331 , 2001 , 1101

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 6

Cobertura por nivel de servicio: 2244.08

Localización

x [*] :=

1 0

2 1

3 0

4 0

;

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r

58 , 39 , 30

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r

3812 , 1220 , 771

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 7

Cobertura por nivel de servicio: 2435.20

Localización

x [*] :=

```

1 0
2 1
3 0
4 0
;

```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
75 , 36 , 29

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
4332 , 1101 , 658

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 8

Cobertura por nivel de servicio: 2632.09

Localización

x [*] :=

```

1 0
2 1
3 0
4 0
;

```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
97 , 30 , 23

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
5032 , 771 , 508

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 9

Cobertura por nivel de servicio: 2771.52

Localización

x [*] :=

```

1 0
2 1
3 0
4 0
;

```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
111 , 29 , 18

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
5433 , 658 , 418

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 10

Cobertura por nivel de servicio: 2895.38

Localización

x [*] :=

```

1 0
2 1
3 0
4 0
;

```

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
127 , 23 , 15

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
5803 , 508 , 421

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 11

Cobertura por nivel de servicio: 3158.17

Localización

x [*] :=

1 1

2 0

3 0

4 0

;

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
164 , 10 , 0

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
6594 , 403 , 0

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 12

Cobertura por nivel de servicio: 3187.42

Localización

x [*] :=

1 1

2 0

3 0

4 0

;

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
169 , 5 , 0

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
6789 , 208 , 0

#####

HiGHS 1.4.0:

SENSIBILIDAD 13

Cobertura por nivel de servicio: 3218.62

Localización

x [*] :=

1 1

2 0

3 0

4 0

;

Cantidad de nodos cubiertos según radio de cobertura: s,t,r
174 , 0 , 0

Cantidad de personas cubiertas según radio de cobertura: s,t,r
6997 , 0 , 0

#####