



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

“ Ubicación de áreas verdes en la Ciudad de México, mediante
la solución de un modelo multiobjetivo de localización discreta
y el uso de un sistema de información geográfica”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA
(INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES)

PRESENTA:

L. MAC. ADELA JIMÉNEZ MONTERO

TUTORES:

Dra. Mayra Elizondo Cortés
M. en I. Héctor Daniel Reséndiz López



Ciudad Universitaria, 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente: Dra. Sánchez Larios Hérica

Secretario: M.I. Reséndiz López Héctor Daniel

Vocal: Dra. Elizondo Cortés Mayra

1^{er} Suplente: Dr. Sánchez Lara Benito

2^o Suplente: Dr. Ordorica Mellado Manuel

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Investigación de Operaciones del departamento de Ingeniería de Sistemas, UNAM.

Tutor de tesis:

Dra. Mayra Elizondo Cortés

Firma

Agradecimientos

A la Dra. Mayra Elizondo Cortés por su tiempo, dedicación y apoyo incondicional en el desarrollo de esta tesis. Agradezco sus observaciones, asesorías, paciencia y la confianza depositada en mí.

Al M.I. Héctor Daniel Reséndiz López por su colaboración, enseñanzas, disponibilidad y por ser una guía para que este trabajo se concluyera.

A Lao por el apoyo, entusiasmo, cariño y su amistad sincera.

Al Dr. Benito Sánchez Lara, a la Dra. Hérica Sánchez Larios y al Dr. Manuel Ordorica Mellado por sus comentarios críticos y atinados, por sus aportaciones y el tiempo dedicado.

A la UNAM por contribuir en mi desarrollo personal y profesional. Pertenecer a esta institución ha sido un privilegio.

Al CONACyT porque gracias a su apoyo pude concluir mis estudios de maestría.

Dedicatorias

A mis papás,

*Por su cariño, comprensión y apoyo incondicional en todas las etapas de
mi vida.*

A mis hermanos,

Por confiar en mi y estar conmigo en todo momento.

A mi abuelita,

Por ser un ejemplo de vida y fortaleza.

A mis padrinos,

*Por quererme como a una hija, apoyarme, alentarme y disfrutar de mis
logros.*

A mis amigos,

*Por estar a mi lado en las buenas y sobre todo en las malas, brindarme su
cariño y apoyo.*

Índice general

Resumen	3
Abstract	4
Introducción	5
1. La necesidad de áreas verdes en la Ciudad de México	9
1.1. Clasificación de las áreas verdes	9
1.2. Situación actual	10
1.3. Importancia de las áreas verdes urbanas	13
1.4. Problema y propuesta de solución	16
2. Localización de servicios multiobjetivo	22
2.1. Problemas de localización de servicios y su clasificación . . .	22
2.1.1. Teoría de localización	23
2.2. Formulación matemática de los problemas de localización de servicios (<i>FLP</i>)	26
2.2.1. Localización de servicios simple (<i>UFLP</i>)	26
2.2.2. Localización de servicios capacitado (<i>CFLP</i>)	27
2.2.3. Localización de servicios en caso continuo	28
2.3. Métodos de solución	30
2.3.1. Programación multicriterio	31

2.3.2.	Programación entera	32
2.4.	Programación multiobjetivo	33
2.4.1.	Variables de desviación en la programación por metas	35
2.4.2.	Programación por metas lexicográficas	37
2.4.3.	Programación por metas ponderadas	44
3.	Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los problemas de localización multiobjetivo	46
3.1.	Definición y conceptos básicos de SIG	46
3.1.1.	Estado del arte	49
3.1.2.	Cálculo de accesibilidad a los parques	50
4.	Modelo de localización multiobjetivo para la selección de parques	58
4.1.	Formulación del modelo	58
4.2.	Esquema de solución	62
4.3.	Caso de estudio	66
4.3.1.	Elección de la zona de estudio	66
4.3.2.	Áreas candidatas para nuevos parques	68
4.3.3.	Cálculo y definición de parámetros	71
4.3.4.	Solución del modelo y análisis de resultados	82
	Conclusiones y extensiones	96
	Bibliografía	77
	A. Inversión requerida para cada una de las áreas verdes	81
	B. Soluciones óptimas	83

C. Soluciones por el método lexicográfico

Índice de figuras

1.1. Áreas verdes en m^2 por habitante en cada una de las delegaciones del D.F.	13
1.2. Las áreas verdes y su contribución hacia una ciudad sostenible	15
2.1. Clasificación de los FLP	25
2.2. Arcos de recorrido asociados a la función distancia con $p = 1$ (norma rectangular)	30
2.3. Arcos de recorrido asociados a la función distancia con $p = 2$ (norma euclidiana)	30
2.4. Arcos de recorrido asociados a la función distancia con $p = 3$ (norma cuadrado de la euclidiana)	31
2.5. Uso de las variables de desviación	36
3.1. Concepto de capas (ESRI)	47
3.2. Un ejemplo de los sistemas raster y vectorial	48
3.3. Sistema de transporte	52
3.4. Ejemplo de caminos que generan el área de servicio	56
4.1. Esquema de solución (Etapa 1)	63
4.2. Esquema de solución (Etapa 2)	64
4.3. Flujo de trabajo en SIG y LINGO	67
4.4. Áreas Verdes en la red vial	71

4.5. Flujo de trabajo topológico	72
4.6. Red vial de la delegación Cuauhtémoc	75
4.7. Centroide	75
4.8. Proceso en SIG	77
4.9. Distribución de la población por manzana	81
4.10. Área de cobertura	82
4.11. Solución óptima (Funciones objetivo f_1 , f_2 y f_3)	84
4.12. Solución óptima (Función objetivo f_4)	85
4.13. Zona sin áreas verdes	85
4.14. Método lexicográfico ($alpha = 0.3$, 5 minutos de impedancia)	87
4.15. Método lexicográfico ($alpha = 0.6$, 5 minutos de impedancia)	87
4.16. Método lexicográfico ($alpha = 0.9$, 5 minutos de impedancia)	88
4.17. Método lexicográfico ($alpha = 0.3$, 10 minutos de impedancia)	89
4.18. Método lexicográfico ($alpha = 0.6$, 10 minutos de impedancia)	89
4.19. Método lexicográfico ($alpha = 0.9$, 10 minutos de impedancia)	90
4.20. Método lexicográfico ($alpha = 0.3$, 15 minutos impedancia)	91
4.21. Método lexicográfico ($alpha = 0.6$, 15 minutos de impedancia)	91
4.22. Método lexicográfico ($alpha = 0.9$, 15 minutos de impedancia)	92
4.23. Solución por el método lexicográfico	93

Resumen

En esta tesis se propone el uso de un modelo multiobjetivo de localización discreta a través del cuál se determina el conjunto de áreas verdes óptimas en una zona urbana y permita hacer más objetiva la toma de decisión sobre la localización de dichas áreas. El modelo contempla cuatro objetivos: cobertura geográfica, cobertura poblacional, nivel de accesibilidad e inversión. Para la obtención de información referente a la densidad vial, manzanas cubiertas y población beneficiada por cada una de las áreas verdes se utiliza un Sistema de Información Geográfica, esta herramienta también permite representar espacialmente los resultados obtenidos al solucionar el modelo. Se resuelve un caso de estudio, aplicado a la delegación Cuauhtémoc de la Ciudad de México con la finalidad de mostrar cómo funciona el modelo.

Abstract

In this thesis is proposed the use of a multiobjective model of discreet location which helps to decide the ideal place for setting green areas in an urban zone. This model allows to make a better objective decision on the location of the above mentioned areas. The model considers four goals: geographical coverage, population coverage, level of accessibility and investment. A Geographical Information System is used in order to have all the information required about the road density, covered blocks and population benefited by each of the green areas, this tool also allows to represent spatially the results obtained by solving the model. A case of study is solved, applied to the Cuauhtemoc district of the Mexico City to show how the model works.

Introducción

Con el paso de los años, se ha notado un claro incremento en la población que habita en el Distrito Federal, la centralización de los servicios y la generación de empleos que se vive en esta ciudad, ha traído como consecuencia la sobrepoblación. Esta situación hace más difícil la construcción de nuevos espacios verdes, ya que la ciudad es altamente urbanizada y cada vez quedan menos espacios disponibles para la construcción de parques.

Se ha demostrado que la existencia de parques genera grandes beneficios sociales, ambientales y económicos (Ver Capítulo 2). Existe un estándar internacional establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el que se especifica que deben existir al menos $9m^2$ de áreas verdes por habitante. En la Ciudad de México existen delegaciones que no cumplen con este estándar (Ver Capítulo 1); por lo que es necesario incrementar el número de parques y además, definir su ubicación de manera que se propicie el uso de los mismos, se beneficie a la mayor población posible y se incurra en el menor gasto operativo.

La localización de espacios públicos, como parques, es un problema complejo, ya que existen muchos aspectos que podrían considerarse para decidir si un espacio es buen candidato para ser parque, además, entran en juego intereses de las personas involucradas.

La teoría de localización de servicios, al igual que los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han sido utilizados para contribuir en la solución

de problemas que tienen que ver con la localización de servicios públicos; sin embargo, la mayoría de los trabajos encontrados se enfocan a la solución del problema enfatizando en un sólo tema, que generalmente se refiere a la minimización de costos o a la ubicación de servicios considerando aspectos urbanísticos.

En el presente trabajo se propone la utilización de un modelo multi-objetivo de localización discreta para la selección de espacios aptos para convertirse en parques. El modelo contempla cuatro objetivos: cobertura geográfica, población beneficiada, nivel de accesibilidad e inversión. Se utiliza un SIG para obtener información necesaria para el modelo y para representar espacialmente los resultados.

Se utilizan las herramientas de la programación por metas (GP, por sus siglas en inglés) para resolver el problema, específicamente, se hace uso del método de programación por metas lexicográficas.

El objetivo de la tesis es determinar el conjunto de áreas verdes óptimas en una zona urbana a partir de un modelo multiobjetivo de localización discreta que permita hacer objetiva la toma de decisión sobre la localización de dichas áreas.

Por otro lado, se plantearon los siguientes objetivos particulares para dar continuidad al objetivo de la tesis:

- Utilizar un modelo de programación entera mixta que contribuya a la determinación de la ubicación de las áreas para nuevos parques, donde se consideran aspectos relacionados con:
 - Inversión;
 - Población beneficiada;
 - Facilidad de acceso;

- Cobertura geográfica.
- Utilizar un Sistema de Información Geográfica para la obtención de datos importantes en la formulación del modelo y para la representación de los resultados.
- Aplicar la herramienta matemática a la selección de áreas verdes en la delegación Cuauhtémoc.

La tesis se encuentra estructurada en cuatro capítulos, como se describe a continuación:

En el Capítulo 1 se analiza la situación actual en el Distrito Federal, en lo que a áreas verdes concierne, y se hace notar la necesidad de incrementar el número de parques y los beneficios que ésto conlleva; también se presenta la propuesta que se desarrolla en la tesis, la forma en la que se pretende abordar el problema y los resultados esperados.

En el Capítulo 2 se presentan las herramientas de localización de servicios, los métodos de solución, y se introducen conceptos sobre programación multiobjetivo, esto con la finalidad de familiarizarnos con el tema y entender las herramientas que se utilizarán para la formulación y solución del modelo.

En el Capítulo 3 se explican los conceptos y la metodología de trabajo que se utiliza en el Sistema de Información Geográfica para los fines del desarrollo de la tesis; este capítulo es necesario para que el lector comprenda la utilidad de incorporar el uso de un SIG en la solución de problemas de localización de servicios y conozca los conceptos básicos de un SIG y su forma de trabajo.

En el Capítulo 4 se presenta el modelo propuesto, así como el esquema de solución, la aplicación a una de las delegaciones del Distrito Federal

(Delegación Cuauhtémoc), y la explicación de la metodología utilizada para resolver el problema, así como la presentación y análisis de resultados.

Capítulo 1

La necesidad de áreas verdes en la Ciudad de México

En este capítulo se analiza la situación actual en el Distrito Federal, en lo que a áreas verdes concierne, y se hace notar la necesidad de incrementar el número de parques y los beneficios que ésto conlleva, de igual manera se presenta la propuesta que se desarrolla en la tesis, la forma en la que se pretende abordar el problema y los resultados esperados.

1.1. Clasificación de las áreas verdes

En la actualidad no existe una clasificación internacional para las áreas verdes urbanas, cada entidad en cuestión establece su propia clasificación. En el Artículo 87 del Capítulo II: Áreas verdes, de la Ley Ambiental del Distrito Federal, publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal [3], queda establecida la siguiente clasificación:

Se consideran áreas verdes,

1. Parques y jardines;
2. Plazas jardinadas o arboladas;

3. Jardineras;
4. Zonas con cualquier cubierta vegetal en la vía pública;
5. Alamedas y arboledas;
6. Promontorios, cerros, colinas, elevaciones y depresiones orográficas, pastizales naturales y áreas rurales de producción forestal, agroindustrial o que presten servicios ecoturísticos;
7. Zonas de recarga de mantos acuíferos, y
8. Las demás áreas análogas.

1.2. Situación actual

La sobrepoblación en el Distrito Federal y los pocos espacios disponibles complican la construcción de nuevos espacios verdes que garanticen la cobertura de la población y el cumplimiento de los estándares internacionales que marcan $9m^2$ de áreas verdes por habitante, como un parámetro de sustentabilidad y bienestar de las áreas verdes en espacios urbanos¹.

El gobierno del Distrito Federal en conjunto con la Secretaría del Medio Ambiente (SMA), han mostrado interés por la preservación y el incremento de espacios que contribuyan al bienestar de la sociedad, en la Ley Ambiental del Distrito Federal publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal se incorporan disposiciones que representan una importante evolución en materia de regulación y fomento de áreas verdes urbanas. Estas disposiciones contemplan: 1) El inventario general de las áreas verdes del Distrito Federal y los respectivos inventarios delegacionales correspondientes al territorio bajo su jurisdicción, así como, 2) los programas delegacionales de

¹Cifra publicada en la página de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal

manejo de áreas verdes. En el Artículo 88 Bis 4 se expone claramente en qué consiste el inventario general de áreas verdes del Distrito Federal.

La Tabla 1.1 muestra un resumen del inventario resultante de las obligaciones que marca la Ley Ambiental del Distrito Federal ².

En la Tabla 1.1 se muestra el área en Km^2 de las delegaciones del Distrito Federal, así como la superficie que se encuentra cubierta por áreas verdes en cada una de estas delegaciones, y además se muestra la superficie en m^2 de área verde que le corresponde a cada habitante, según la superficie total existente. Cabe destacar que esta cifra incluye la superficie que abarcan las barrancas, predios y jardines privados, y reservas ecológicas.

Como se puede observar (Ver Figura 1.1), las delegaciones con los porcentajes más bajos de superficie de áreas verdes son ³: Benito Juárez, Cuauhtémoc, Iztacalco, Magdalena Contreras y Tláhuac. Aún falta un largo camino por recorrer para que la Ciudad de México mejore su situación en lo que a áreas verdes concierne, y cuente con más y mejores áreas verdes en pro de la calidad de vida de sus habitantes.

²Información publicada en la página de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, http://www.sma.df.gob.mx/avu/index.php?op=contexto_5a

³Representadas por las barras de color rojo de la Figura 1.1

Delegación	Área en Km^2 (*)	Total de áreas verdes en Km^2	Áreas verdes en m^2 por por habitante
Álvaro Obregón	61.12	24.59	32.8
Azcapotzalco	33.51	4.28	9.7
Benito Juárez	26.51	1.19	3.3
Coyoacán	54.01	20.13	31.4
Cuajimalpa	15.08	5.55	36.7
Cuauhtémoc	32.67	1.81	3.5
Gustavo A. Madero	87.29	14.26	11.5
Iztacalco	23.12	2.25	5.5
Iztapalapa	113.37	18.32	10.3
Magdalena Contreras	14.08	1.82	10.3
Miguel Hidalgo	47.69	8.89	25.2
Tláhuac	19.17	2.27	7.5
Tlalpan	48.29	11.80	20.3
Venustiano Carranza	33.87	5.23	11.3
Xochimilco	22.90	5.89	15.9
Distrito Federal	632.66	128.28	15.1
(*)Áreas estimadas sin suelo de conservación, excepto las delegaciones Gustavo A. Madero e Iztapalapa			

Tabla 1.1: Inventario de áreas verdes en el D.F.

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente, 2010

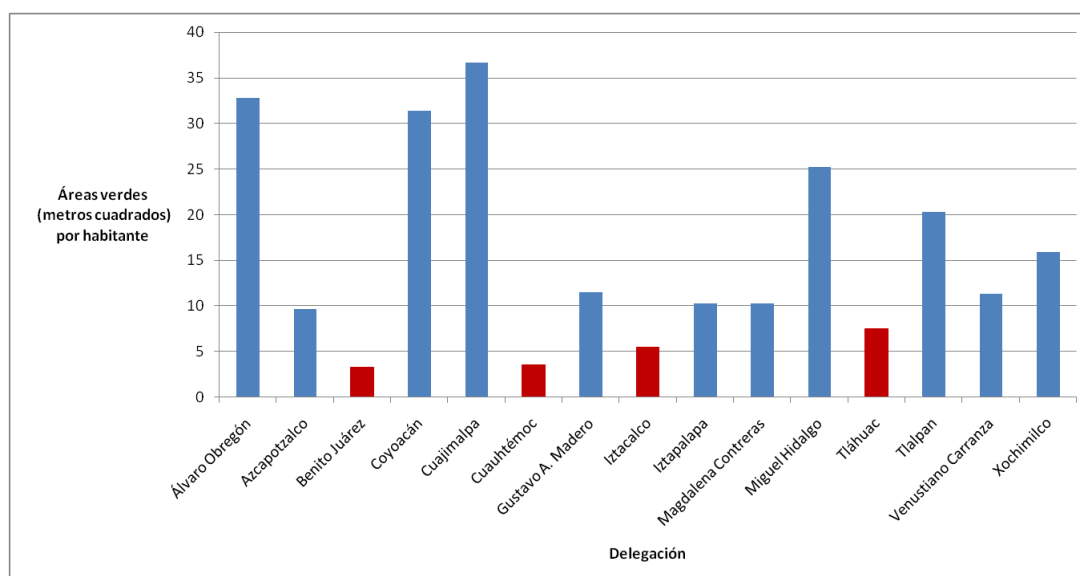


Figura 1.1: Áreas verdes en m^2 por habitante en cada una de las delegaciones del D.F.

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente, 2010

Decidir dónde ubicar un área verde no es una tarea sencilla ya que entran en juego distintos intereses, (como se describe en el Capítulo 4). Generalmente, esta decisión se toma al priorizar sobre la inversión requerida o simplemente por conveniencias personales de los involucrados en la toma de decisión, este *proceso de decisión* tiende a dejar de lado los beneficios que el parque puede ofrecer a la sociedad, y no se toma una decisión que englobe diversos criterios de manera que se encuentre el equilibrio entre los beneficios que el área verde puede proporcionar y la inversión necesaria.

1.3. Importancia de las áreas verdes urbanas

El crecimiento de las ciudades trae consigo complicaciones ambientales, ya que a medida que la población se incrementa, también aumenta el consumo de energía y recursos naturales, lo cual trae consigo consecuencias ambientales, sociales y económicas adversas.

Según la SMA, la Ciudad de México mantiene rezagos importantes en la

dotación integral de servicios, lo que incrementa las desigualdades y propicia problemas propios de las grandes urbes, los que, en la gran mayoría de los casos, están directamente relacionados a la falta de espacios verdes.

Mejorar las condiciones de las áreas verdes no es una tarea que sólo le corresponda al sector gubernamental, sino también a la población en general, ya que el buen manejo de las áreas verdes trae consigo beneficios ambientales, sociales y económicos.

A continuación se describen algunos de los beneficios generados por las áreas verdes:

- *Beneficios ambientales:* Las áreas verdes urbanas mejoran el aire, el agua y los recursos del suelo al absorber contaminantes, incrementar las áreas de captación y almacenamiento de agua, y estabilizar los suelos. También actúan como amortiguadores de la temperatura (dan sombra en el verano y detienen el viento en invierno), son reductores de la contaminación por ruido y los niveles de CO_2 , y proveedores de hábitat para la fauna silvestre [25].
- *Beneficios sociales:* Los beneficios globales a la sociedad son significativos. Los árboles y en general, la vegetación de un parque y aún de un camellón arbolado, prestan un servicio para mantener la salud mental y física de la población urbana. Proveen sitios para el uso del tiempo libre, otorgan oportunidades educativas en temas ambientales y culturales, generan oportunidades para la convivencia social, además de que logran el mejoramiento estético de un ambiente, que de otra manera estaría dominado por asfalto y concreto [25].

- *Beneficios económicos:* La existencia de áreas verdes puede generar beneficios del tipo económico, como se puede observar en el hecho de que los árboles eliminan 5.575 toneladas de contaminantes atmosféricos por año equivalentes a un servicio de limpieza de 9 millones de dólares [17], [25]. Otro aspecto importante del manejo de áreas verdes urbanas es el de los trabajos generados, los proyectos de áreas verdes urbanas son a menudo trabajos de mano de obra intensiva y proporcionan trabajos para la puesta en marcha (preparación de suelo, plantación, etc.), así como trabajos permanentes (mantenimiento, manejo, etc) [25].

Las áreas verdes proporcionan diversos beneficios a las áreas urbanas, particularmente, la existencia de parques implica beneficios al medio ambiente, a la economía y la sociedad, ya mencionados, los cuales contribuyen a una mejor calidad de vida en la población y a su vez conducen hacia la generación de una ciudad sostenible [9], (Ver Figura 1.2).

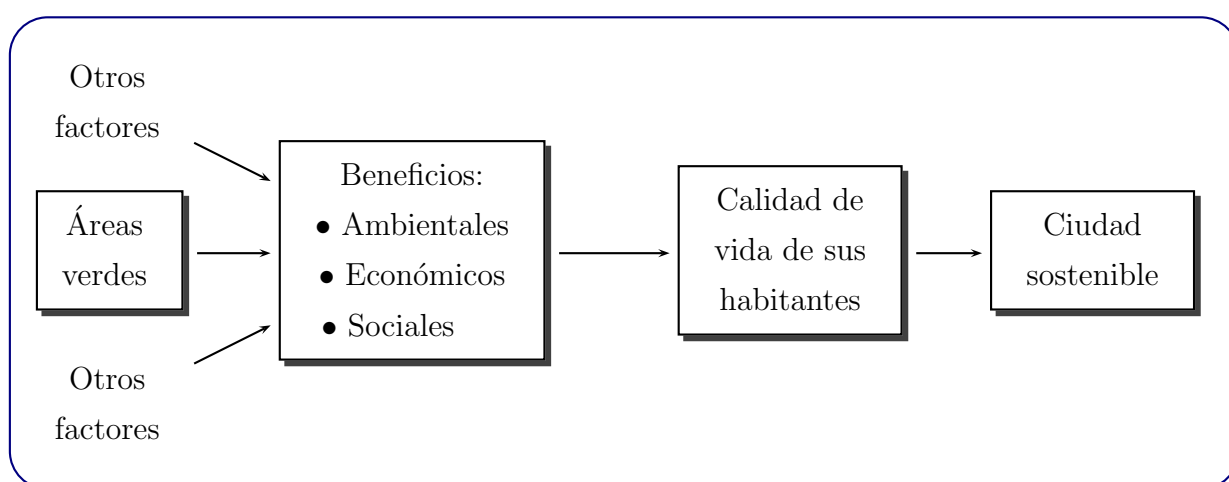


Figura 1.2: Las áreas verdes y su contribución hacia una ciudad sostenible

Fuente: Elaboración propia, basado en Chiesura [9]

1.4. Problema y propuesta de solución

Como se puede verificar con los datos proporcionados por la SMA que se muestran en la Tabla 1.1, en el Distrito Federal existen delegaciones que se encuentra en una posición poco favorable, en términos del cumplimiento de las normas establecidas para el número en metros cuadrados de áreas verdes que deben existir por cada habitante. Nuestra ciudad atraviesa un grave deterioro ambiental derivado de las intensas actividades diarias, del incremento de la población y la poca cultura en el cuidado del medio ambiente. Ante esta situación es necesario crear estrategias que contribuyan al mejoramiento de nuestra calidad de vida.

En aras de contribuir a la creación y mejoramiento de áreas verdes, la Ley Ambiental del Distrito Federal incluye decretos como la creación de un inventario general, y por delegaciones, de áreas verdes en el Distrito Federal, la construcción de un catálogo de áreas susceptibles a ser adoptadas en el Distrito Federal propuestas por las delegaciones, así como la generación de programas o planes de manejo de áreas verdes ⁴.

Existen dos puntos importantes que nos ayudan a entender y definir el problema persistente:

1. Déficit de áreas verdes en algunas delegaciones del Distrito Federal, lo que implica la necesidad de incrementar el número de áreas verdes.
2. Definición de la ubicación óptima para localizar nuevas áreas verdes.

⁴Este catálogo forma parte del programa de adopción de áreas verdes urbanas que se refiere a la ampliación, mejoramiento o cuidado de nuestras áreas verdes en banquetas, camellones y jardines públicos por parte de empresas y grupos de vecinos.

La tarea de definir la ubicación óptima para la localización de nuevas áreas verdes trae consigo el siguiente cuestionamiento: ¿cuáles son los criterios que se deberían considerar para definir si un espacio es buen candidato para localizar un área verde y cómo serán medidos?

El problema de localización de espacios públicos es muy complejo, en primer lugar porque existen múltiples intereses, y en segundo lugar porque son muchos los criterios que se pueden considerar para determinar que un espacio disponible es un buen candidato para ser área verde. Existen algunos trabajos que evalúan criterios en parques, como en el de Erkip, [11] que define factores de servicio y de usuario, dentro de los cuales están:

- *Factores de servicio:* Distancia y accesibilidad, el tiempo de viaje, el nivel de congestión o medida de *comfort*, la seguridad, el atractivo físico, el mantenimiento y consideraciones no estéticas.
- *Factores de usuario:* Características del vecindario (densidad, homogeneidad, edad, sexo, composición y tamaño de la familia, nivel de ingresos, nivel de educación e intereses individuales)

Por otro lado Oh & Jeong, [18] evalúan la distribución de parques en Seúl utilizando indicadores relacionados con la población beneficiada y el área de suelo construida con destino comercial.

El problema de localización de nuevas áreas verdes puede ser formulado como un modelo matemático, es por ello que es importante considerar que a pesar de la existencia de diversos factores que juegan un papel importante en la localización de espacios para nuevos parques, muchos de ellos no son criterios cuantificables, y por lo mismo no pueden ser incluidos en la formulación de un modelo matemático. Generalmente, al tratarse de la ubicación de servicios públicos se persiguen objetivos relacionados con los

costos y el beneficio; la medición del beneficio puede no ser un criterio fácilmente cuantificable, en este caso se relacionó con la disposición de un parque para propiciar su uso; es decir, que esté cerca de los usuarios o que sea accesible, partiendo del supuesto que al contar con un área verde cercana es más probable que sea visitada.

Para la formulación de un modelo matemático es importante analizar y delimitar el problema que se va a abordar, de igual manera es indispensable definir los alcances y los resultados que se pretenden obtener, para ello es necesario determinar los factores a evaluar, sin olvidar la disponibilidad de la información y la complejidad del modelo. Como se mencionó, la localización de espacios para nuevas áreas verdes es un tema que involucra diversos factores que en su gran mayoría, no son cuantificables fácilmente.

En este trabajo se propone utilizar un modelo matemático que permita determinar la localización para los espacios requeridos, el modelo usado es una adaptación del propuesto por Molano [16]. Se consideraron los criterios utilizados en dicho modelo y la disponibilidad de información para determinar que los objetivos perseguidos estarían medidos en torno a los siguientes criterios:

1. Inversión
2. Cobertura geográfica
3. Cobertura poblacional
4. Accesibilidad

Para la construcción de un nuevo servicio siempre es importante considerar la inversión que esto implica, en este caso se tomará en cuenta la **inversión** necesaria para la construcción de un parque, es importante que

el servicio que ubicamos beneficie a diferentes regiones de la localidad, esto contribuye a que diversos sectores se vean beneficiados, lo cual se puede asegurar con el criterio de **cobertura geográfica**, medida a través del número de manzanas que queden cubiertas por las áreas de influencia del conjunto de espacios candidatos. En el mismo sentido, el número de personas beneficiadas por el conjunto de áreas candidatas nos indicarán la **cobertura poblacional** alcanzada, y finalmente, el nivel de **accesibilidad** se determinará a través de un indicador de densidad vial.

Aunque parezca que los criterios de cobertura geográfica y poblacional persiguen el mismo objetivo, y éste pudiera medirse a través de la selección de cualquiera de estos criterios, es importante mencionar que el hecho de que se maximice la población beneficiada no implica que dicha población pertenezca a diferentes manzanas de una localidad, existen manzanas que cubren una gran cantidad de población; por ejemplo, hay manzanas que por ellas sólo cubren la misma cantidad de población que otras 5 manzanas en conjunto, en este caso el objetivo de cobertura poblacional priorizará la selección de estas manzanas, mientras que el objetivo de cobertura geográfica buscará seleccionar más manzanas; por ello es importante tomar en cuenta ambos criterios.

Con este trabajo se pretende proporcionar una herramienta matemática que contribuya a la toma de decisiones a través del uso de criterios objetivos de selección de áreas a convertirse en parques.

En este sentido, y con base en un estudio realizado en la Universidad de los Andes, [16] se plantea un modelo basado en herramientas de programación entera mixta, específicamente, en los modelos de localización discreta ⁵, se utiliza esta herramienta ya que la teoría de localización de

⁵Ya que se cuenta con un conjunto finito de áreas verdes sobre el cual se formulará el modelo y se tomarán las decisiones.

servicios nos permite determinar la ubicación óptima para algún servicio considerando distintas restricciones, y el problema en cuestión se adecúa a este tipo de modelos.

El modelo propuesto es multiobjetivo ya que se incorporan distintas funciones objetivo a alcanzar; esta parte es importante en la formulación del modelo puesto que incrementa la visión del problema y con esto se generarán soluciones que cumplan en medida de lo posible con todos los objetivos planteados. Además, se utiliza un sistema de información geográfica para la obtención de información, análisis y presentación de resultados.

Al tratarse de un modelo multiobjetivo es necesario utilizar técnicas para resolver problemas de programación por metas, en esta tesis se utiliza el método secuencial de programación por metas lexicográficas. Al resolver el problema, específicamente para la formulación del caso de estudio seleccionado, se pretende generar el conjunto de áreas urbanas disponibles para convertirse en parques en la delegación; estos resultados servirán al decisor para tomar la(s) opción(es) más adecuada(s) a las necesidades de la población y del propio gobierno, y garantizar que la inversión se realice sobre los sitios ideales.

A manera de conclusión, el problema identificado radica en la determinación de las ubicaciones óptimas para localizar áreas verdes, por esta razón se propone la utilización de un modelo multiobjetivo de localización discreta y el uso de un sistema de información geográfica para la obtención de datos concernientes a la población beneficiada, las manzanas cubiertas y el nivel de accesibilidad de cada uno de los espacios disponibles, parámetros necesarios para la formulación del modelo.

Una vez comprendida la importancia de la existencia de áreas verdes y la falta de éstas en algunas delegaciones del Distrito Federal, así como la

aportación que tendrá el desarrollo de la tesis para definir la ubicación de estos espacios, es necesario definir algunos conceptos básicos de los problemas de localización de servicios y la programación multiobjetivo, temas que se abordan en el siguiente capítulo.

Capítulo 2

Localización de servicios multiobjetivo

Como se mencionó en el capítulo anterior, el modelo propuesto se basa en herramientas de localización de servicios, es por ello que es importante adentrarnos más a este tema y conocer sobre los diferentes tipos de problemas que existen, los métodos y esquemas de solución para los problemas de localización de servicios y para los problemas de programación multiobjetivo.

2.1. Problemas de localización de servicios y su clasificación

En un sentido muy general, los problemas de localización de servicios (Facility Location Problem, *FLP*) consisten en encontrar, dado un conjunto de sitios posibles, el más adecuado donde uno o más servicios deberían ubicarse, de forma que se optimicen los costos, que generalmente se refieren a los costos fijos por establecer un servicio y los costos variables de producción y transportación.

Los problemas de localización han estado presentes casi desde la exis-

tencia de la humanidad, nuestros ancestros debían decidir cuál era el mejor lugar para habitar y refugiarse de los peligros, teniendo en cuenta también la cercanía a fuentes de riqueza natural tales como ríos y tierras fértiles. En la actualidad, ubicar el mejor lugar para vivir recae en criterios como los siguientes: cercanía de la escuela, distancia al lugar de trabajo, acceso rápido al transporte público, servicios médicos/emergencia cercanos y centros comerciales colindantes. El criterio clave parece estar siempre directamente relacionado con la distancia recorrida.

La primera referencia que se tiene sobre los problemas de localización data del siglo XVII, cuando el matemático P. Fermat propuso el siguiente problema: “ *Dados tres puntos en el plano, encontrar el cuarto punto tal que su distancia al resto es mínima* ”.

En 1640, Torricelli observó que este problema tenía una solución geométrica basada en tres círculos circunscritos. En 1834, Heinen demostró que la propiedad de Torricelli no era general. Antes de esto, en 1750 Simpson generalizó el problema para obtener el punto que minimiza la suma pesada de distancias desde los tres puntos dados.

En 1857, Sylvester propuso el siguiente problema: “ *Se requiere encontrar el círculo de radio mínimo que contenga a un conjunto de puntos en el plano* ”. Éste es el equivalente de un problema de localización bajo el criterio minimax, o a veces descrito como el problema del centro.

2.1.1. Teoría de localización

La disciplina matemática que estudia los problemas de localización, construye los modelos matemáticos apropiados y deriva los métodos para resolverlos se denomina **Teoría de Localización**. Siendo una rama de la Investigación de Operaciones, esta materia proporciona a los decisores he-

ramientas cuantitativas para encontrar buenas soluciones a problemas de decisión de localización reales.

El origen de la teoría de localización moderna se atribuye a A. Weber (1909), quien incorporó el problema original de Fermat al Análisis de Localización en su tratado sobre la teoría de la localización industrial “*Über den Standort der Industrien*” (Teoría de la localización de industrias), traducido posteriormente por Friedrich (1929). El problema consistía en determinar la localización óptima de una fábrica que debía abastecer a un solo mercado y con dos fuentes diferentes de material; el criterio considerado para tal localización era la minimización de los costos de transporte (distancia a recorrer). Éste fue el comienzo de los problemas de localización conocidos como problemas mediana o simplemente problemas de Weber (Wesolowsky, 1993).

La teoría de la localización ha tenido una gran aplicación en el establecimiento de nuevos negocios y en el desarrollo de servicios públicos. Cuando se trata de establecer un nuevo negocio, los comerciantes siguen la siguiente ley de mercado: cuanto más cercana esté la oferta a la fuente de demanda, más rentable será el negocio. Otros problemas de localización de servicios surgen también en el establecimiento de plantas de producción y ensamblaje, almacenes, nuevas oficinas y centros de distribución. El sector público también requiere enfoques óptimos en la localización de servicios de emergencia (ambulancias, estaciones de policía, de bomberos), y recursos públicos (agua y electricidad).

Existen diversas formas para clasificar los diferentes tipos *FLP*, como la siguiente:

La cantidad de servicios a localizar da lugar al primer nivel de clasifi-

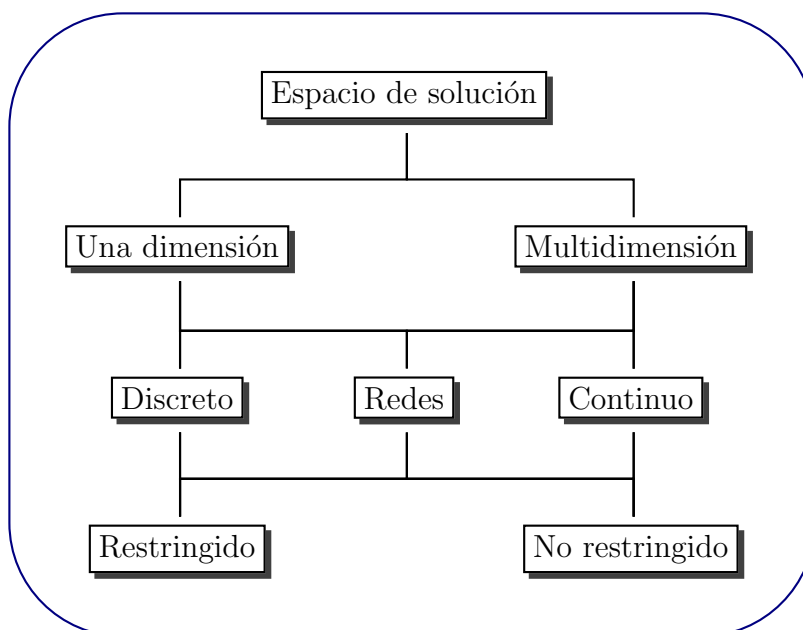


Figura 2.1: Clasificación de los FLP

Fuente: Elaboración propia, basado en Aceves [2]

cación mostrado en la figura anterior, se dice que un *FLP* es de una sola dimensión cuando el problema implica la determinación del sitio de un solo servicio, si el problema incluye la selección simultánea de sitios para la localización de varios servicios, se denomina *FLP* de multidimensión. Nos referimos a un *FLP* discreto cuando existe un conjunto finito de posibles sitios para ubicar los servicios, el caso continuo se presenta cuando los nuevos servicios se pueden ubicar en cualquier parte dentro de un área. *FLP* en redes es un tipo especial de los *FLP* que se modelan en redes o árboles. Finalmente, se puede clasificar un *FLP* en términos de las capacidades de los servicios, que nos indicarán si el problema está restringido o no.

Dentro de esta clasificación, los *FLP* más conocidos son:

- Localización de servicios sin restricciones de capacidad (Uncapacitated Facility Location Problem, *UFLP*)

- Localización de servicios con restricciones de capacidad (Capacitated Facility Location Problem, *CFLP*)
- Localización de servicios en caso continuo.

2.2. Formulación matemática de los problemas de localización de servicios (*FLP*)

Como se mencionó, existen diversos tipos de *FLP*, una de las principales características que hace la diferencia entre uno y otro es la forma en cómo se representan la demanda y los sitios candidatos para instalar un servicio, lo cual implica variantes en la formulación del modelo.

2.2.1. Localización de servicios simple (*UFLP*)

Para el *UFLP*, también conocido como el problema de localización de servicios simple; cuyo adjetivo “simple” fue originalmente mencionado por Spielberg (1969), y cuya primera formulación se debe a Balinski (1996), tenemos la siguiente formulación: Dado un conjunto de posibles plantas, $N = 1, \dots, n$ y un conjunto de clientes $M = 1, \dots, m$, un costo fijo f_j asociado con la apertura de la planta j , y un costo de transportación c_{ij} por cubrir toda la demanda del cliente i a través de la planta j .

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n f_j y_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

s.a :

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq m y_j \quad \forall j \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j \quad (2.4)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (2.5)$$

donde,

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si se abre la planta } j \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} \text{Fracción de demanda del cliente } i \text{ satisfecha por la planta } j; \\ x_{ij} \text{ sólo tomará valores } 0 \text{ o } 1 \end{cases}$$

2.2.2. Localización de servicios capacitado (*CFLP*)

Para el *CFLP*, también conocido como el problema de localización de servicios capacitado, tenemos la siguiente formulación: Dado un conjunto de posibles plantas, $N = 1, \dots, n$ y un conjunto de clientes $M = 1, \dots, m$, un costo fijo f_j asociado con la apertura de la planta j , y un costo de transportación c_{ij} por enviar un producto de la planta j al cliente i .

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n f_j y_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.6)$$

s.a :

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq k_j y_j \quad \forall j \quad (2.7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = d_i \quad \forall i \quad (2.8)$$

$$x_{ij} \leq 0 \quad \forall i, j \quad (2.9)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad (2.10)$$

donde,

$$\begin{aligned}
 y_j &= \begin{cases} 1 & \text{si se abre la planta } j \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \\
 x_{ij} &= \text{Fracción de demanda del cliente } i \text{ satisfecha por la planta } j \\
 k_j &= \text{Capacidad de la planta } j \\
 d_i &= \text{Demanda del cliente } i
 \end{aligned}$$

2.2.3. Localización de servicios en caso continuo

El problema de *UFLP*, en el caso continuo fue introducido por Roodman y Schwarz (1977), y de una forma un poco diferente por Wesolowsky y Truscott (1975). Van Roy y Erlenkotter (1982) proponen un procedimiento dual-basado que amplía los acercamientos desarrollados por Bilde y Krarup (1977) y Erlenkotter (1978) para *UFLP* discreto. A continuación se muestra la formulación del problema de localización de servicios en el caso continuo.

$$\text{Min}_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} l_p(X_i, a_j) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} l_p(X_i, X_r) \quad (2.11)$$

donde,

m = Número de servicios a ser localizados

n = Número de plantas o puntos de venta

r_{ij} = Factor de peso entre los puntos de venta y los servicios

S_{ij} = Factor de peso entre servicios

$X_i = (x_1, x_2)$: Coordenadas de localización de nuevos servicios

$a_j = (a_1, a_2)$: Coordenadas de localización de los puntos de demanda

$l_p(X_i, a_j)$: Función distancia entre los puntos de venta y los servicios

$l_p(X_i, X_r)$: Función distancia entre servicios

Donde la función distancia para el caso continuo es la norma:

$$l_p(X_i, a_j) = [|x_1 - a_1|^p + |x_2 - a_2|^p]^{1/p}; \quad p \geq 1 \quad (2.12)$$

Si $p = 1$, se tiene la medida de distancia rectangular, la cual es apropiada para el análisis de algunas áreas urbanas que cumplan la propiedad de que los viajes ocurren en un conjunto ortogonal de calles; por ejemplo, en el interior de edificios, donde el conjunto de caminos es paralelo a las paredes de las edificaciones.

Si $p = 2$, se tiene la medida de distancia Euclidiana, la cual es apropiada para problemas como tendido de tuberías, cables eléctricos o telefónicos, rutas marítimas y aéreas, entre otras.

La distancia cuadrado de la euclidiana es apropiada para ciertos problemas de tiempo emergencia, en donde lo fundamental es llegar rápido sin importar el costo, o también para problemas donde se tenga que transportar mercancías o personas.

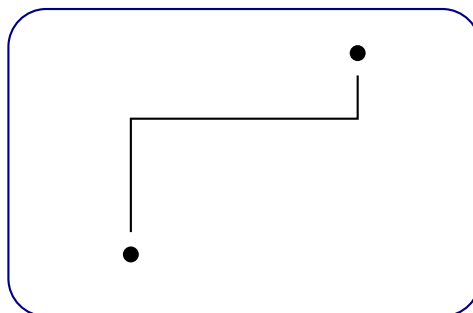


Figura 2.2: Arcos de recorrido asociados a la función distancia con $p = 1$ (norma rectangular)

Fuente: Elaboración propia, basado en Aceves [2]

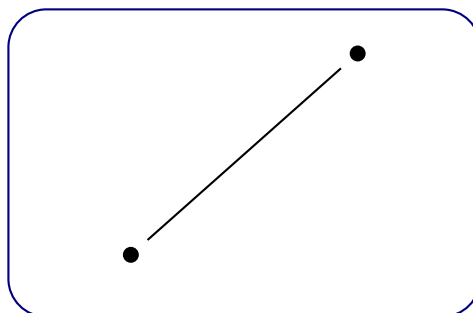


Figura 2.3: Arcos de recorrido asociados a la función distancia con $p = 2$ (norma euclidiana)

Fuente: Elaboración propia, basado en Aceves [2]

En general se puede tener cualquier tipo de medida de distancia establecida como una norma.

2.3. Métodos de solución

Desde el punto de vista del modelado, hay dos herramientas (no excluyentes) que están siendo muy utilizadas en este campo, al igual que en otros muchos de la Investigación de Operaciones: el Análisis Multicriterio y la Programación Entera.

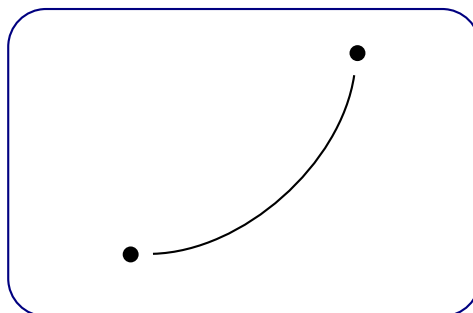


Figura 2.4: Arcos de recorrido asociados a la función distancia con $p = 3$ (norma cuadrado de la euclidiana)

Fuente: Elaboración propia, basado en Aceves [2]

2.3.1. Programación multicriterio

En muchas ocasiones el modelo de localización no debe estar orientado a la optimización de un único objetivo (por ejemplo, la minimización de los costos de transporte) sino varios objetivos, en algunos casos contrapuestos. Por ejemplo, conjuntamente con la minimización de los costos de transporte, si el centro a ubicar tiene efectos nocivos para algunos individuos o regiones a proteger, o se deben cumplir ciertas normas establecidas, debería incluirse otro objetivo orientado a la minimización del impacto ambiental. Nos encontramos en este caso con modelos semi-repulsivos, descritos en Blanquero y Carrizosa (2002), Ohsawa y Tamura (2003). Cuando el problema se refiere a la localización de servicios públicos, además de incluir el criterio de eficiencia (referente a la minimización del costo total de transporte), puede ser benefactor o simplemente necesario considerar algún aspecto de equidad: como puede ser que el servicio tenga la misma calidad para todos los usuarios, lo cual puede modelarse incluyendo una segunda función objetivo: la minimización de la mayor de las distancias, o bien, minimizar una medida de dispersión de las distancias (por ejemplo, la varianza o el rango), para que las distancias que separan al servicio de los

usuarios sean similares. Existen métodos de decisión multicriterio estándar propuestos para resolver FLP , como el método Promethee, el AHP, o las metodologías de Punto Ideal.

2.3.2. Programación entera

Existen diversas técnicas que resuelven FLP , a continuación se enlistan las más conocidas:

- *Algoritmo de partición (Descomposición de Benders)*. Este algoritmo trabaja resolviendo sucesivamente un programa lineal y un programa entero. El programa lineal produce un punto extremo y una nueva restricción para el programa entero. También, el valor de la solución óptima del programa lineal proporciona una cota superior para la solución del programa entero mixto. Cuando se resuelve el programa entero, el cual es equivalente a un programa entero mixto que tiene todas sus restricciones, proporciona una cota inferior que no va decreciendo. Cuando las dos cotas coinciden, se ha encontrado la solución óptima del programa entero mixto y el proceso termina.
- *Heurísticos glotones*. Los algoritmos de aproximación, basados en heurísticos glotones fueron los primeros en ser propuestos para los problemas de localización, por Hochbaum. Quien redujo los FLP a variantes de la cubierta convexa y propuso algoritmos sobre la línea de algoritmos glotones para el problema de la cubierta convexa.
- *Ramificación y acotamiento*. Los algoritmos de aproximación basados en el redondeo de la solución óptima fraccional, que da lugar a la relajación LP del problema original entero fueron propuestos por Shmoys.

- *Técnicas Primal-Dual*. Propuestas por Jain y Vazirani, quienes resolvieron el *UFLP* utilizando el esquema 2-fases primal-dual. Su técnica novedosa consiste en la relajación de las condiciones primales mientras se satisfacen todas las condiciones complementarias de holgura. Esto les permitió obtener algoritmos de aproximación para diversos *FLP*, incluyendo el problema de la *p*-mediana utilizando la técnica de la relajación lagrangeana.
- *Técnicas de búsqueda local*. Es quizá, la técnica más versátil. Para ciertas variantes del *FLP*, las técnicas de búsqueda local son las únicas que proporcionan una aproximación a un factor constante.

2.4. Programación multiobjetivo

En la realidad, la toma de decisiones está basada en el cumplimiento de distintos criterios u objetivos que queremos alcanzar. Por ejemplo, cuando se trata de comprar una casa; el costo, la ubicación, además de la construcción en sí de la casa, son factores que influyen directamente en nuestra decisión; sin embargo, generalmente estos criterios se encuentran en conflicto; por ejemplo, entre más bonita y mejor ubicada se encuentre la casa, el costo incrementa. Es por ello que incluir distintas funciones objetivo al modelo contribuye a que las soluciones encontradas correspondan con las necesidades de la(s) persona(s) involucrada(s).

La programación por metas o multiobjetivo (GP, por sus siglas en inglés) ganó popularidad en los años 1960's y 70's con los trabajos de Ijiri (1965), Lee(1972) e Ignizio(1976), actualmente es un área importante de la optimización multicriterio. La idea de la GP es establecer un nivel de aceptación para cada criterio. La GP se distingue de la programación lineal

por:

1. La conceptualización de los objetivos como *metas*.
2. La asignación de *prioridades* y/o *pesos* al logro de las metas.
3. La presencia de variables de desviación N_i y P_i para medir la desviación positiva y negativa entre el logro de las metas y sus niveles de aceptación NA_i .
4. La minimización de la suma ponderada de las variables de desviación para encontrar las soluciones que se acerquen lo más posible a los objetivos.

Generalmente, no es factible encontrar un punto que satisfaga todas las metas. Así que, se trata de encontrar un punto factible que quede lo más cercano posible a las metas. Existen tres tipos de metas:

- **Meta unilateral inferior.** La cual establece un *límite inferior* por debajo del cual no se quiere estar (pero está bien excederlo)
- **Meta unilateral superior.** La cual establece un *límite superior* que no se quiere exceder (pero está bien quedar por debajo del mismo)
- **Meta bilateral.** Establece un *blanco específico* que no se quiere desviar hacia ningún lado.

Los problemas de GP se pueden clasificar según el tipo de modelo de programación matemática (programación lineal, programación entera, programación no lineal, etc.) al que se ajusta excepto por tener múltiples objetivos en lugar de uno. Otra clasificación se refiere a la importancia de las metas, un caso se conoce como *programación por objetivos sin prioridades*, donde todas las metas tienen una importancia comparable, el otro

caso es llamado *programación por objetivos con prioridades*, donde existe una jerarquía en los niveles de prioridad para las metas.

2.4.1. Variables de desviación en la programación por metas

En la estructura de un modelo de GP, las metas que se pretenden alcanzar se introducen como inecuaciones (g_i), para cada una de estas inecuaciones se consideran *niveles de aceptación* que pueden o no, ser alcanzados. Para cada meta se introducen dos variables, con la finalidad de convertir las inecuaciones en igualdades, estas variables se conocen como *variables de desviación*, donde una representa la desviación negativa (N_i) y la otra, la desviación positiva (P_i).

Las variables de desviación se refieren a las desviaciones existentes entre el logro de las metas con respecto a sus niveles de aceptación. Por ejemplo, si $N_i = C$, esto significa que han faltado C unidades para alcanzar la meta g_i . Por lo tanto, las faltas de logro en las metas están representadas por las variables de desviación negativas.

Por el contrario, las variables de desviación positivas indican en qué cantidad una meta ha superado su nivel de aceptación. Por ejemplo, si $P_i = C$, esto significa que en C unidades se ha superado la meta g_i . Por lo tanto, el exceso de logro en las metas está representado por las variables de desviación positivas.

Como una meta no puede superar y no alcanzar simultáneamente su nivel de aspiración, esto indica que en la solución, al menos una de las variables de desviación será cero. Cuando una meta satisface exactamente su nivel de aceptación, entonces ambas variables de desviación tomarán el valor de cero.

En este sentido, se pueden presentar tres casos que persiguen diferentes

objetivos (para entender mejor estas situaciones, ver Figura 2.5):

- Maximizar el valor objetivo en términos del nivel de aceptación de cierta meta (g_i), es decir, que $f(x_i) \geq NA_i$, entonces la variable de desviación negativa debe tomar el valor más pequeño posible. Por lo tanto, en este caso la variable N_i es minimizada.
- Minimizar el valor objetivo en términos del nivel de aceptación de cierta meta (g_i), es decir, que $f(x_i) \leq NA_i$, entonces la variable de desviación positiva debe tomar el valor más pequeño posible. Por lo tanto, en este caso la variable P_i es minimizada.
- El logro de una meta (g_i) debe coincidir exactamente con el nivel de aceptación, es decir, que $f(x_i) = NA_i$, entonces ambas variables de desviación deben tomar el valor más pequeño posible. Por lo tanto, $N_i + P_i$ deberá minimizarse.

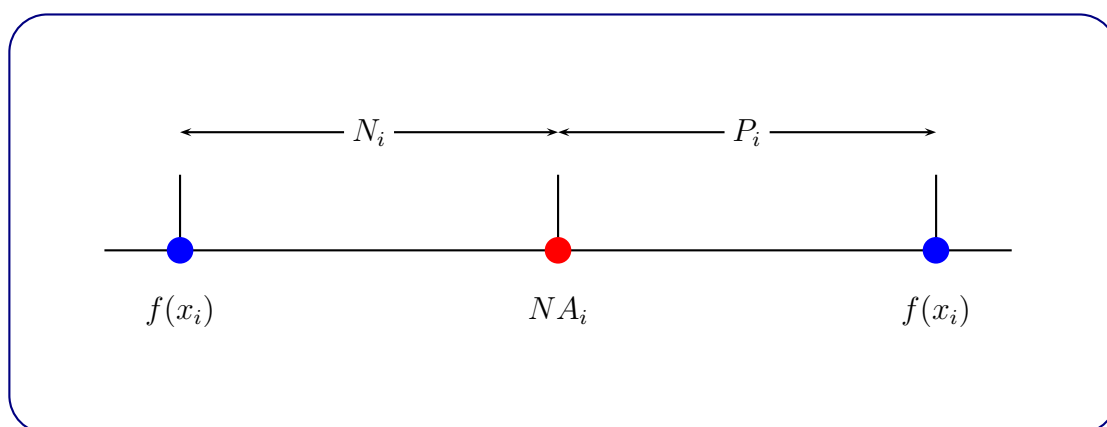


Figura 2.5: Uso de las variables de desviación

Fuente: Elaboración propia

En GP se minimizan las variables de desviación, existen dos enfoques alternativos para generar el proceso de minimización: programación por metas lexicográficas y por metas ponderadas.

2.4.2. Programación por metas lexicográficas

Los orígenes de GP se le atribuyen a Charnes, Cooper y Ferguson en un trabajo realizado en el año de 1955. El enfoque de la programación por metas asume que el *decisor* es capaz de definir todas las metas relevantes en un problema. De igual manera, se supone que el *decisor* es capaz de asignar prioridades excluyentes (Q_i) a las diferentes metas. En la programación por metas lexicográficas (LGP, por sus siglas en inglés), las metas situadas en las prioridades más altas son las que se satisfacen en primer lugar, sólo entonces se considera la satisfacción de las metas situadas en prioridades más bajas.

Para ilustrar la estructura de este tipo de programación, supongamos el siguiente ejemplo:

$$\begin{aligned}
 g_1 : & \quad \text{Max} \quad f_1(x) \quad ; f_1(x) \geq NA_1 \\
 g_2 : & \quad \text{Min} \quad f_2(x) \quad ; f_2(x) \leq NA_2 \\
 g_3 : & \quad \text{Min Max} \quad f_3(x) \quad ; f_3(x) = NA_3 \\
 & \quad \text{s.a :} \\
 & \quad x \quad \in X
 \end{aligned}$$

Una vez que el *decisor* ha definido los niveles de aceptación (NA_i) para cada una de las metas (g_i) y ha priorizado los objetivos, para la resolución y aplicación de la técnica de programación por metas (en cualquiera de sus versiones), se introducen las variables de desviación. La introducción se realiza de la siguiente forma:

- Para la meta g_1 , como $f_1(x) \geq NA_1$ entonces, $f_1(x) + N_1 - P_1 = NA_1$ y se debe minimizar N_1 .

- Para la meta g_2 , como $f_2(x) \leq NA_2$ entonces, $f_2(x) + N_2 - P_2 = NA_2$ y se debe minimizar P_2 .
- Para la meta g_3 , como $f_3(x) = NA_3$ entonces, $f_3(x) + N_3 - P_3 = NA_3$ y se debe minimizar $N_3 + P_3$

Dadas las metas, suponer que los niveles de prioridad en los objetivos están dados como se muestran en el planteamiento del problema, es decir, en primer nivel está la meta g_1 , en segundo nivel g_2 y finalmente la meta g_3 .

Entonces, el problema sería:

$$\begin{aligned}
 & \textit{lexmin} \quad (N_1, P_2, N_3 + P_3) \\
 & \textit{s.a} : \\
 & \quad x \in X \\
 & \quad g_1 : f_1(x) + N_1 - P_1 = NA_1 \\
 & \quad g_2 : f_2(x) + N_2 - P_2 = NA_2 \\
 & \quad g_3 : f_3(x) + N_3 - P_3 = NA_3 \\
 & \quad N_i, P_i \geq 0 \quad \forall i
 \end{aligned}$$

Ahora se tienen que resolver tres problemas, de manera secuencial, integrando cada uno de los objetivos perseguidos.

Problema 1

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} && N_1 \\
 & \text{s.a :} && \\
 & && x \in X \\
 & && f_1(x) + N_1 - P_1 = NA_1 \\
 & && N_i, P_i \geq 0 \quad \forall i
 \end{aligned}$$

Denominamos (x_1^*, N_1^*, P_1^*) a la solución, si $N_1^* = 0$ significa que hemos logrado verificar la primera meta y pasamos al segundo nivel.

Problema 2

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} && P_2 \\
 & \text{s.a :} && \\
 & && x \in X \\
 & && f_1(x) + N_1 - P_1 = NA_1 \\
 & && f_2(x) + N_2 - P_2 = NA_2 \\
 & && N_i, P_i \geq 0 \quad \forall i
 \end{aligned}$$

La idea es que se mantenga la meta anterior y se verifique la segunda. Así, denominamos (x_1^*, N_1^*, P_1^*) a la solución encontrada, si $P_2^* = 0$ significa que hemos logrado verificar la primera meta y la segunda, y pasamos al tercer nivel.

Problema 3

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} && N_3 + P_3 \\
 & \text{s.a :} && \\
 & && x \in X \\
 & && f_1(x) + N_1 - P_1 = NA_1 \\
 & && f_2(x) + N_2 - P_2 = NA_2 \\
 & && f_3(x) + N_3 - P_3 = NA_3 \\
 & && N_i, P_i \geq 0 \quad \forall i
 \end{aligned}$$

Así, finalmente se obtiene la solución que satisface, en medida de lo posible, con los tres objetivos planteados.

A continuación se muestra un pequeño ejemplo para mostrar el funcionamiento de este método.

Ejemplo:

Se supone el problema de planificar la producción de una papelera de propiedad pública en la que existen dos posibles productos: pulpa celulosa obtenida por medios químicos o pulpa celulosa obtenida por medios mecánicos. Se representará por x_1 y x_2 , respectivamente, a las toneladas diarias de pulpa de celulosa obtenida por los dos procedimientos mencionados. Las capacidades máximas de producción se estiman en 300 y 200 toneladas/día para cada uno de los dos tipos de pasta de celulosa. El margen bruto de utilidades (ingresos menos costos variables) por tonelada de pasta de celulosa obtenida por medios químicos es de \$1000, siendo de \$3000 el que se obtiene a través de medios mecánicos. Los costos fijos de la papelera se estiman en 3300 unidades/día; la empresa desearía cubrir por lo menos los costos fijos.

Las preferencias de la empresa se concentran en la maximización del margen bruto de utilidades (objetivo económico) y en la minimización del daño generado en el río en el que la papelera vierte sus residuos productivos (objetivo ambiental). Se estima que los residuos producidos por cada tonelada de pasta de celulosa obtenida por medios mecánicos y por medios químicos generan demandas de oxígeno en el agua del río de 1 y 2 unidades.

Se formulará el modelo como un modelo de programación por metas. Para ello, los términos independientes no se consideran como cantidades rígidas que hay que alcanzar para que la solución sea factible, sino como niveles de aceptación que el centro decisor desea satisfacer en la medida de lo posible. Es decir, las restricciones rígidas iniciales se convierten en metas o restricciones (blandas) que pueden violarse sin que ello genere soluciones imposibles. Para desarrollar este ejercicio se asocia al atributo demanda biológica de oxígeno un nivel de aceptación de 300 unidades, para el atributo margen bruto se asocia un nivel de aceptación de 400 unidades. De esta forma, se tienen las siguientes restricciones:

- 1 : $1000x_1 + 3000x_2 \geq 400$ (Objetivo económico)
- 2 : $x_1 + 2x_2 \leq 300$ (Objetivo ambiental)
- 3 : $x_1 \leq 300$ (Capacidad de producción)
- 4 : $x_2 \leq 200$ (Capacidad de producción)

Para la papelera es primordial cumplir con el objetivo económico y posteriormente con el objetivo ambiental. Una vez definidos los niveles de aceptación y priorizado los objetivos, se pasa a determinar las variables de desviación no deseadas. Para la meta 1 la variable de desviación no deseada será N_1 , pues se desea alcanzar un margen bruto de utilidades lo

más grande posible (de ser posible mayor de 400000 um). Para la meta 2 la variable de desviación no deseada sería P_2 , pues se desea alcanzar una demanda biológica de oxígeno lo más pequeña posible (de ser posible menor de 300 unidades).

Una vez determinadas las variables de desviación no deseadas el siguiente paso en la formulación de un modelo de programación por metas lexicográficas consiste en proceder a la minimización de dichas variables. Entonces, el problema sería:

$$\begin{aligned}
 & \textit{lexmin} && (N_1, P_2) \\
 & \textit{s.a} : \\
 & g_1 : & 1000x_1 + 3000x_2 + N_1 - P_1 = 400000 \\
 & g_2 : & x_1 + 2x_2 + N_2 - P_2 = 300 \\
 & & x_1 \leq 300 \\
 & & x_2 \leq 200 \\
 & & N_1, N_2, P_1, P_2 \geq 0
 \end{aligned}$$

Ahora se tienen que resolver dos problemas de manera secuencial, como se describe a continuación:

Problema 1

$$\begin{array}{ll}
 \text{Min} & N_1 \\
 \text{s.a :} & \\
 g_1 : & 1000x_1 + 3000x_2 + N_1 - P_1 = 400000 \\
 & x_1 \leq 300 \\
 & x_2 \leq 200 \\
 & N_1, P_1 \geq 0
 \end{array}$$

La solución encontrada es: $(x_1 = 300, x_2 = 200, N_1 = 0, P_1 = 500000)$, lo que significa que se excede en \$500,000 con el valor mínimo establecido para el objetivo económico.

Problema 2

$$\begin{array}{ll}
 \text{Min} & P_2 \\
 \text{s.a :} & \\
 g_1 : & 1000x_1 + 3000x_2 + N_1 - P_1 = 400000 \\
 g_2 : & x_1 + 2x_2 + N_2 - P_2 = 300 \\
 & x_1 \leq 300 \\
 & x_2 \leq 200 \\
 & N_1, N_2, P_1, P_2 \geq 0
 \end{array}$$

La solución encontrada es: $(x_1 = 0, x_2 = 0, N_1 = 400000, N_2 = 300, P_1 = 0, P_2 = 0)$, lo que significa que en este caso no se alcanza a cumplir con los objetivos, es por ello que N_1 y N_2 toman los valores establecidos como los mínimos aceptables para cada uno de los objetivos.

2.4.3. Programación por metas ponderadas

Con este método se engloban de manera simultánea todas las metas en una función objetivo que minimiza la suma de todas las variables de desviación. Las desviaciones son ponderadas de acuerdo al nivel de importancia, que en términos relativos tiene cada meta para el *decisor*.

Las variables de la función objetivo están representadas por desviaciones porcentuales con respecto a los niveles de aspiración, en vez de desviaciones absolutas. Este cambio se introduce por el uso de diferentes unidades de medidas en las metas. Por ejemplo, si tuvieramos una meta (g_1) que representa las ganancias, medida en pesos (\$) y otra (g_2) que representa el trabajo, medido en horas hombre, la suma de las desviaciones absolutas de las metas carece de sentido. Siguiendo con este ejemplo, suponiendo que el nivel de aceptación de la meta g_1 es de \$1000, mientras que el de g_2 es de 500 horas hombre. Por consiguiente, la formulación de la función objetivo del modelo de programación por metas ponderadas de este ejemplo sería:

$$\text{Min } \alpha_1 \left(\frac{N_1 * 100}{1000} \right) + \alpha_2 \left(\frac{N_2 * 100}{500} \right)$$

Donde α_1 y α_2 , representan los pesos asociados a las variables de desviación. Relacionando diferentes valores a α se van generando diferentes soluciones.

El modelo propuesto para el problema que se aborda en este trabajo de tesis se considera de localización de servicios del tipo discreto, ya que se cuenta con un conjunto finito de áreas verdes sobre el cual se tomarán

las decisiones. Como el problema es multiobjetivo, se resolverá a través de una técnica de programación por metas, utilizamos el enfoque de programación por metas lexicográficas ya que mediante este enfoque se definen las metas relevantes del problema y se asignan prioridades al cumplimiento de las metas, las metas situadas en las prioridades más altas son las que se satisfacen en primer lugar.

Este capítulo se enfocó en los problemas de localización de servicios y programación multiobjetivo, se desarrolló un ejemplo del método secuencial de programación por metas lexicográficas para entender el funcionamiento del método, ya que será utilizado para resolver el modelo del caso de estudio. Pero antes de presentar la formulación del modelo y el caso de estudio es necesario familiarizarnos con los conceptos básicos de un Sistema de Información Geográfica, los cuales serán descritos en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los problemas de localización multiobjetivo

En este capítulo se explican los conceptos y la metodología de trabajo utilizados en el Sistema de Información Geográfica (SIG, por sus siglas español) para los fines del desarrollo de la tesis, este capítulo es necesario para que el lector comprenda la utilidad de incorporar el uso de un SIG en la solución de problemas de localización de servicios.

3.1. Definición y conceptos básicos de SIG

Existen múltiples definiciones de lo que un SIG representa, una de las definiciones ampliamente aceptada de los SIG es la prevista por el Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis (NCGIA-1990, por sus siglas en inglés): un **SIG** es un sistema de *hardware*, *software* y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión de recursos.

Una forma más completa y fácil de definir los SIG es la que se puede observar en la disposición de capas del conjunto de sus datos, (Ver Figura 3.1).

Como se muestra en la Figura 3.1, es un grupo de mapas de la misma proporción de territorio, donde una determinada localización tiene las mismas coordenadas en todos los mapas incluidos en el sistema. De esta manera es posible analizar sus características temáticas y espaciales para obtener un mejor conocimiento de esta zona.

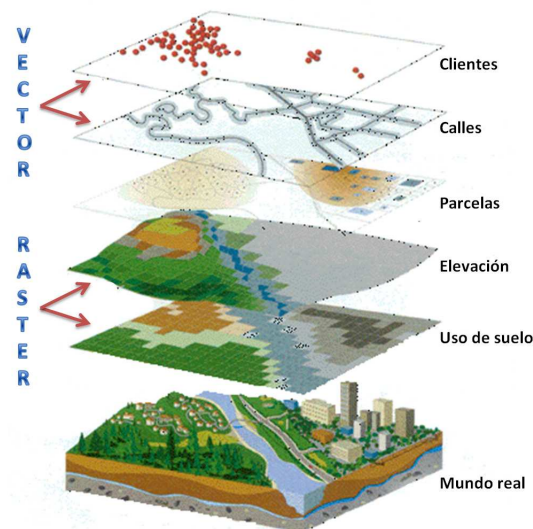


Figura 3.1: Concepto de capas (ESRI)

Los datos geográficos pueden ser representados a través de dos modelos (Ver Figura 3.2):

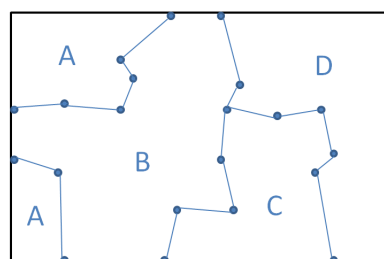
- **Vectorial**, en el cual el límite de un objeto se define por una serie de puntos de los cuales al unirse pueden formar diferentes figuras como líneas, polígonos o simplemente puntos, están definidos por pares de coordenadas. En este modelo el foco de interés se sitúa en las entidades (elementos geográficos) y en su posicionamiento sobre el espacio.

Algunas características de estas figuras son:

- Los *puntos* son objetos espaciales, por lo tanto tienen una localización en el espacio pero no tienen longitud ni anchura; es decir, no poseen dimensiones.
 - Las *líneas* son objetos espaciales que poseen una dimensión; longitud pero no anchura, y se definen por una sucesión de puntos.
 - Los *polígonos* son objetos espaciales de dos dimensiones, longitud y anchura, y se definen como un circuito de líneas.
- **Raster**, no define los objetos sino que subdivide el área de estudio en una malla de celdas regular compuesta de celdas cuadradas (píxeles), en la que registra el atributo temático o característica de la superficie terrestre en ese punto. Este modelo centra su interés en las propiedades del espacio más que en la representación precisa de los elementos que lo conforman.

A	A	A	B	D	D	D
A	A	B	B	D	D	D
B	B	B	B	C	C	D
A	B	B	B	C	C	D
A	B	B	C	C	C	D

(a) Raster



(b) Vector

Figura 3.2: Un ejemplo de los sistemas raster y vectorial

Fuente: Elaboración propia, basada en Church [?]

Por ejemplo, el modelo raster se utiliza frecuentemente para problemas de paisaje y planificación de uso de suelo. Por otro lado, el modelo vectorial se utiliza para representar datos geográficos, como redes de transporte.

En la Figura 3.2 se muestra cómo los modelos raster y vectorial pueden representar una capa; por ejemplo, el uso de suelo para una región específica, donde A, B, C y D representan zonas residenciales, comerciales, forestales y agrícolas, respectivamente.

3.1.1. Estado del arte

Las aplicaciones de los SIG para apoyar el proceso de decisión son múltiples, por mencionar algunos, Villa [27] evalúa componentes de la vegetación de un parque (árboles y arbustos) utilizando la herramienta de análisis multicriterio de los SIG, como ayuda para la planificación de las zonas verdes del parque; Phua [20] utiliza esta herramienta para planear la conservación de los bosques en una escala paisajista; Imaoka [13], utiliza un SIG y un sistema de detección a distancia para ubicar parques urbanos en la ciudad de Nagasaki, Japón. También existe un vasto uso de los modelos de localización, como se puede ver en Owen [19].

En Aguilar [1], se describen algunas aplicaciones de los SIG en la localización de establecimientos turísticos, como son los hoteles y restaurantes. Ramírez [21] emplea modelos de localización incorporados en un SIG para definir la ubicación óptima de equipamientos hospitalarios.

Molano [16] propone una metodología de localización discreta, para determinar las zonas de la ciudad que deben convertirse en parques y utiliza un SIG para obtener la información y representar las soluciones. El modelo propuesto incorpora 5 indicadores de evaluación de las áreas candidatas:

- Costos (de suelo y construcción)
- Cobertura geográfica (número de manzanas cubiertas)
- Cobertura poblacional (cantidad de población beneficiada)

- Accesibilidad (indicador de densidad vial)
- Conectividad con equipamientos de la ciudad (relacionados con la educación, cultura, bienestar social, seguridad ciudadana, defensa, abastecimiento de alimentos, cementerios y servicios funerarios, servicios de administración pública, servicios públicos y de transporte)

Todos estos indicadores, a excepción de los costos, se midieron en el área de influencia de cada área candidata. Esta área de influencia se generó con un área circular de radio $r = 417 \text{ m}$ a partir del centroide del área candidata.

Por un lado, los trabajos que realizan análisis multicriterio usando algún SIG tienen la debilidad de que la herramienta sólo permite evaluar criterios que pueden ser representados espacialmente; es decir, no pueden considerar restricciones relacionadas con costos y capital disponible que son necesarias para los modelos de localización; por otro lado, la mayoría de los modelos de optimización encontrados sólo se enfocan en la solución del problema visto desde un sólo enfoque. Conjuntar el uso de ambas herramientas puede contribuir de manera favorable en el proceso de toma de decisiones, sobre todo cuando se trata de la construcción de espacios públicos. Como se puede observar con los trabajos citados anteriormente, diversos autores han trabajado en conjunto con modelos de localización y el uso de un SIG. Estas dos herramientas son muy poderosas y útiles en los procesos de toma de decisiones; integrar el uso de ambas pueden generar soluciones más claras de entender e interpretar.

3.1.2. Cálculo de accesibilidad a los parques

La accesibilidad es un elemento clave para la geografía del transporte y la geografía en general, es una expresión directa de movilidad, ya sea en términos de personas, carga o información. Los sistemas de transporte bien

desarrollados y eficaces ofrecen un alto nivel de accesibilidad (si se excluyen los impactos de la congestión), mientras que los menos desarrollados tienen menos niveles de accesibilidad. Así, la accesibilidad está relacionada con una serie de oportunidades económicas y sociales.

La **accesibilidad** se define como la medida de la capacidad de una localización para alcanzar o llegar a diferentes lugares. Por lo tanto, la capacidad y la infraestructura del transporte son elementos claves en la determinación de la accesibilidad.

El concepto de accesibilidad está basado en dos conceptos fundamentales:

- La **localización**, donde la relatividad de los sitios se estima en relación con las infraestructuras de transporte, ya que ofrecen la medida para apoyar movimientos.
- La **distancia**, que es derivada de la conectividad entre las localizaciones. La conectividad puede existir sólo cuando existe la posibilidad de conectar dos lugares a través del transporte. Expresa la fricción (Ver Figura 3.3) del espacio y la localización que tiene la menor fricción en relación con otros es la más accesible. Por lo general, la distancia se expresa en unidades como kilómetros o en tiempo, pero también se pueden utilizar unidades como costo o gasto de energía.

Hay dos categorías espaciales para los problemas de accesibilidad, que son interdependientes:

- **Accesibilidad topológica**, relacionada con la medición de accesibilidad a un sistema de nodos y caminos (una red de transporte). Se asume que la accesibilidad es una medida significativa de un atributo cuan-

tificable sólo para elementos específicos de un sistema de transporte, tales como terminales (aeropuertos, puertos o estaciones de metro).

- **Accesibilidad contigua**, se usa para medir la accesibilidad sobre una superficie. Bajo estas condiciones, la accesibilidad es un atributo cuantificable de cada localización, ya que el espacio se considera de manera contigua.

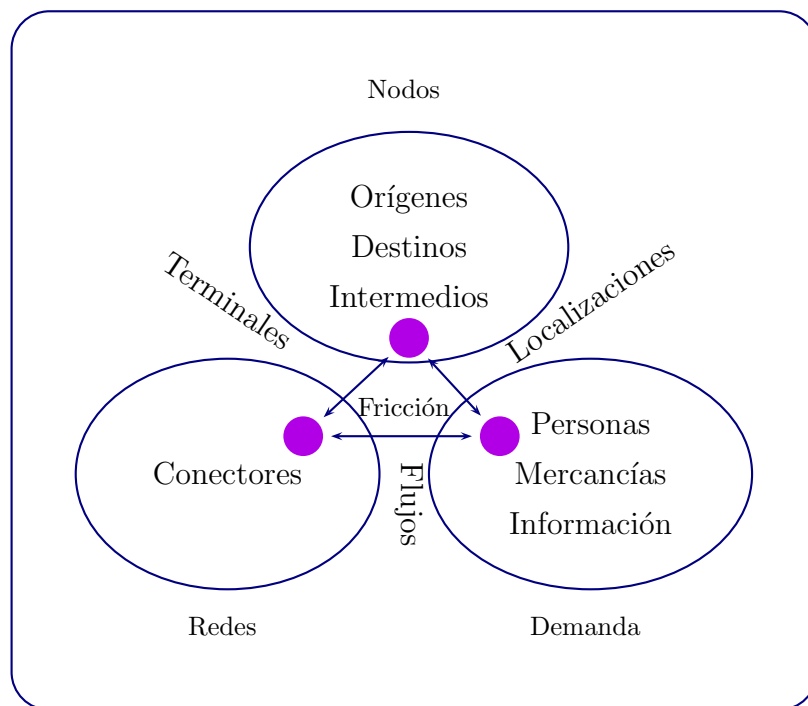


Figura 3.3: Sistema de transporte

Fuente: Elaboración propia, basado en Rodrigue [22]

Modelación de la accesibilidad peatonal de un parque

Existen diversos factores que entran en juego al medir la accesibilidad peatonal de un parque, para el análisis que se va a realizar es necesario entender algunos conceptos involucrados en este proceso.

Un **grafo** es una representación simbólica de una red y de su conectividad. Implica una abstracción de la realidad, por lo que puede simplificarse como un conjunto de nodos enlazados.

Los siguientes elementos son fundamentales para entender la teoría de grafos:

- **Grafo:** Es un conjunto de vértices (v) conectados por aristas (e). Así, $G = (v, e)$.
- **Vértice:** Es un punto terminal o un punto de intersección de un grafo. Es la abstracción de una ubicación como una ciudad, una división administrativa, la intersección de un camino o una terminal (estaciones, terminales, puertos y aeropuertos).
- **Arista:** Una arista e es una conexión entre dos nodos. La arista (i, j) está entre el extremo inicial i , y el extremo final j . Una arista es la abstracción de una estructura de transporte que soporta movimientos entre vértices. Si éstos tienen dirección son representados por una flecha, si no, se asume que son bi-direccionales.

El objetivo de un grafo es representar la estructura, no la forma en que se presenta una red; es decir, la forma de las aristas no es revelante, sólo importa a qué vértices están unidas, la posición de los vértices tampoco importa y se puede variar para obtener un grafo más claro.

La **impedancia** es una medida de la resistencia al desplazamiento que puede ser expresada de distintas formas (distancia, tiempo, costo, etc.). Algunos SIG permiten calcular la ruta óptima entre dos nodos cualesquiera dentro de una red, el de menor impedancia. De acuerdo con lo anterior, el camino mínimo entre dos puntos podrá ser distinto según sea la variable que se tome como impedancia. El cálculo de caminos mínimos resulta de

gran interés para la implementación en un SIG de modelos gravitatorios¹ realistas. Estos modelos requieren el cálculo de la distancia entre pares de objetos. Mediante el cálculo de caminos mínimos, esa distancia puede medirse de forma precisa a través de la red que realmente canaliza los movimientos en lugar de utilizar distancias euclidianas

En el desarrollo de la tesis, el tiempo será la variable que se tome como impedancia y se medirá por los minutos que se tarda un peatón en recorrer cierta distancia. Se considera que la velocidad promedio de un peatón es de $4km/hora$, equivalente a $66.67m/min$ lo que implica que los minutos quedarán determinados por el cociente entre la longitud recorrida en metros y la velocidad promedio del peatón en m/min .

En el SIG utilizado existe una herramienta llamada *Network Analyst* que permite resolver diversos tipos de problemas de red, estas tareas están divididas en cuatro tipo de análisis:

- Análisis de ruta (Route Analyst)
- Análisis de la entidad más cercana (Closest Facility Analysis)
- Análisis de área de servicio (Service Area Analyst)
- Análisis de matriz de costo OD (OD Cost Matrix Analysis)

Para cuestiones de esta tesis, se utiliza el análisis de **área de servicio** ya que mediante esta herramienta es posible identificar áreas de servicio alrededor de cualquier localización dentro de una red. Las áreas de servicio ayudan a evaluar la accesibilidad, también pueden ser utilizadas para identificar la cantidad de población, superficie, o cualquier otra variable

¹Estos modelos se fundamentan en dos variables, una variable *masa* o de atracción, y otra variable *fricción* o de frenado. Los modelos más estudiados son los de Reilly (1931), Huff (1963) y el Multiplicativo de Interacción Competitiva (MMIC) de Nakanishi y Cooper (1974)

que se encuentre al interior de ella. Estas áreas varían de acuerdo con el impedimento seleccionado, ya sea el tiempo, distancia, u otro definido por el usuario.

El *layer* de análisis de área de servicio almacena todas las entradas, parámetros y resultados del análisis realizado. Al crear el *layer* de análisis, éste muestra cuatro categorías: Instalaciones, Barreras, Líneas y Polígonos.

- **Instalaciones:** este *layer* almacena las localizaciones de una red que son utilizadas como entidades al interior del análisis del área de servicio. Cuando un *layer* de área de servicio es creado, el *layer* de entidades aparecerá sin localizaciones de red y éstas deberán ser cargadas por el usuario. En este *layer* deberán cargarse las áreas verdes utilizadas en el modelo.
- **Barreras:** las barreras son utilizadas para identificar aquellos sectores sobre los cuales existen limitantes para el desplazamiento. De igual manera, esta información es incorporada por el usuario.
- **Polígonos:** los polígonos del *layer* de áreas de servicio almacenan los resultados del análisis. Este *layer* es de gran utilidad para los fines de la tesis, ya que a través de estos se podrán obtener los parámetros del número de manzanas cubiertas por cada área verde, la densidad vial y la población beneficiada.
- **Líneas:** el *layer* de líneas puede ser simbolizado al igual que el resto de los *layers*. Al realizar el análisis, la generación de líneas viene desactivada por defecto.

Mediante esta herramienta es posible identificar áreas de servicio alrededor de cualquier locación al interior de una red. Un área de servicio que

incorpora a todas las calles accesibles, dentro de un rango de impedimento determinado. Por ejemplo, un área de servicio de 5 minutos (caminando) alrededor de un punto incorporará a todas aquellas calles que se encuentren dentro de ese rango de tiempo. Una vez construidas dichas áreas, pueden ser utilizadas para identificar cantidad de población, superficie, o cualquier otra variable que se encuentre al interior de ella.

En la Figura 3.4 se muestra un ejemplo de los caminos que se trazan para generar el área de servicio, en este caso definimos 5 minutos como parámetro de impedancia; es decir, se generarán todos los caminos posibles que podría tomar un peatón para llegar al área verde (círculo rojo) y no exceda el tiempo de 5 minutos.

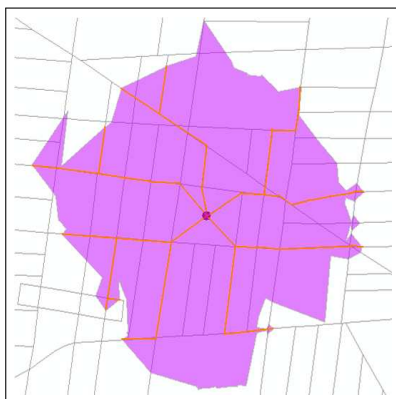


Figura 3.4: Ejemplo de caminos que generan el área de servicio

Fuente: Elaboración propia, Red Vial del Inegi

En el desarrollo del trabajo de esta tesis se utiliza un SIG para obtener información necesaria en la formulación del modelo, se utiliza la red vial de la delegación Cuauhtémoc para realizar el análisis de área de servicio y con el uso de esta herramienta se generan los polígonos de cobertura para cada

una de las áreas verdes disponibles. A partir de estos polígonos se obtiene información referente a la densidad vial, población beneficiada y número de manzanas cubiertas por cada una de las áreas verdes (procedimiento descrito en el siguiente capítulo). El análisis realizado es a nivel peatón, ya que el parámetro de impedancia utilizado es el tiempo, medido por los minutos que le toma a un peatón llegar al área verde.

Además de la utilidad del SIG para obtener los parámetros necesarios del modelo, éste sirve para presentar los resultados encontrados por el modelo.

En este capítulo se describieron de manera general los conceptos necesarios para entender cómo trabajan los SIG y de manera general se describieron las herramientas utilizadas para el desarrollo del trabajo, en el siguiente capítulo se describirá el procedimiento para la obtención de información, análisis y presentación de los resultados, se formulará el modelo propuesto y se resolverá un caso de estudio a fin de mostrar el funcionamiento del modelo.

Capítulo 4

Modelo de localización multiobjetivo para la selección de parques

En este capítulo se presenta el modelo propuesto, así como el esquema de solución, la aplicación a la Delegación Cuauhtémoc y la explicación del proceso de solución del problema, así como la presentación y análisis de resultados obtenidos.

4.1. Formulación del modelo

El modelo que se utilizará en el desarrollo de la tesis es una adaptación del modelo propuesto por Molano [16] ya que es el único que se encontró en la literatura que trabaja sobre la ubicación de parques utilizando un modelo multiobjetivo y un SIG, se realizaron algunas modificaciones para adecuarlo a las necesidades del Distrito Federal, se consideró la facilidad para medir los objetivos y la disponibilidad de la información, de esta manera se definieron los objetivos del modelo (cobertura geográfica, cobertura poblacional, nivel de accesibilidad e inversión), no se tomó en cuenta el criterio de conectividad con equipamientos de la ciudad, propuesto por Molano. Es importante destacar que la formulación del modelo se

realizó para determinar la ubicación de nuevos parques, los cuales quedan contemplados dentro de la definición que conocemos de áreas verdes (Ver Capítulo 1).

El modelo utilizado está basado en un modelo de localización de servicios discreto, el conjunto de áreas candidatas para ser parque que se utilizará para la formulación del modelo da lugar a la clasificación de los problemas de localización de servicios del tipo discreto, a partir de este conjunto se determinará el subconjunto de áreas aptas para convertirse en parque. Una de las principales ventajas del modelo propuesto en esta tesis sobre los modelos de localización de servicios tradicionales, es que se incorporan distintas funciones objetivo en la formulación; es por esta razón que el problema se contempla como un modelo multiobjetivo.

Antes de mostrar la formulación del modelo, es necesario describir la simbología utilizada y descrita a continuación:

Sea I el conjunto de áreas candidatas, conformado por I_I e I_S que representan áreas de tamaño inferior y superior a $10000 m^2$, respectivamente. Estas áreas definen una partición, es decir, $I = I_I \cup I_S$, $I_I \cap I_S = \emptyset$. Para el caso de las áreas I_S , que son las de gran tamaño, son espacios de área variable, ya que el modelo definirá el tamaño ideal del parque que se ubicará allí.

Sea J el conjunto de manzanas que intersectan las áreas de influencia de las áreas candidatas. El área candidata $i (i \in I)$ tiene asociado un radio r_i que define un área de influencia o cobertura. En dicha área se miden parámetros de cada parque, como p_i y v_i , que representan la población beneficiada y el indicador de densidad vial del área candidata i , respectivamente.

Otros atributos del área candidata i son: a_i que representa el tamaño en m^2 del área; c_i , la inversión necesaria para el parque i . Otros parámetros

relacionados con las áreas candidatas son a_{min} y a_{max} que indican la cantidad mínima y máxima de m^2 de nuevos parques, que deben seleccionarse a partir de las áreas candidatas; es decir, el área que se pretende construir de nuevos parques. Por otro lado, t_{min} define el tamaño mínimo de un parque cuando éste se selecciona de un área candidata $i, i \in I_S$.

En términos de distancias, W_j es el subconjunto de áreas candidatas en I que cubren la manzana j ; es decir, el conjunto de parques $i \in I$ que tienen a la manzana j dentro de su área de influencia. Formalmente, $W_j = \{i \in I | d_{ij} \in r_i\}$, donde d_{ij} es la distancia entre los centroides del área candidata i y la manzana j .

Sea y_i la variable de decisión que toma el valor de 1 si el área candidata i es seleccionada para ser parque, y toma el valor de 0 en caso contrario.

Sea x_i la variable de decisión que representa la cantidad de m^2 del área candidata i que se destinará para el uso de parque, $i \in I_S$.

Sea z_j la variable de decisión que toma el valor de 1 si la manzana j es cubierta por al menos un parque, y toma el valor de 0 en caso contrario, es importante mencionar que aunque la variable z_j tome valores binarios, no es necesario definirla en todos los casos como una variable binaria; por la estructura del modelo, en los casos en que la manzana j sólo sea cubierta por una área candidata i , basta con definir que la variable z_j sea menor o igual a uno, para el caso en que la manzana j sea cubierta por dos o más áreas candidatas i es necesario definir a la variable z_j como binaria. Esta parte queda representada por las restricciones (4.11) y (4.12). Cabe mencionar que ésta es una de las principales modificaciones que se realizó al modelo propuesto por Molano [16], ya que al hacer este análisis se pudo observar que no era necesario definir todas las variables como binarias (como se realiza en el modelo de Molano), esta modificación impacta de forma benéfica sobre

la complejidad del modelo.

A continuación se muestra el modelo multiobjetivo de localización discreta para la ubicación de parques:

$$\text{Max } f_1 = \sum_{j \in J} z_j \quad (4.1)$$

$$\text{Max } f_2 = \sum_{i \in I} p_i y_i \quad (4.2)$$

$$\text{Max } f_3 = \sum_{j \in J} v_j y_j \quad (4.3)$$

$$\text{Min } f_4 = \sum_{i \in I} c_i y_i \quad (4.4)$$

s.a :

$$z_j \leq \sum_{i \in W_j} y_i \quad (4.5)$$

$$|I_j| z_j \geq \sum_{i \in W_j} y_i \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

$$a_{min} \leq \sum_{i \in I_I} a_i y_i + \sum_{i \in I_S} x_i \quad (4.7)$$

$$a_{max} \geq \sum_{i \in I_I} a_i y_i + \sum_{i \in I_S} x_i \quad (4.8)$$

$$x_i \geq t_{min} y_i \quad \forall i \in I_S \quad (4.9)$$

$$x_i \leq a_i y_i \quad \forall i \in I_S \quad (4.10)$$

$$z_j \leq 1 \quad \forall j \in J \quad \sum_{i \in W_j} y_i = 1 \quad (4.11)$$

$$z_j \in 0, 1 \quad \forall j \in J \quad \sum_{i \in W_j} y_i \geq 2 \quad (4.12)$$

$$y_i \in 0, 1 \quad \forall i \in I \quad (4.13)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in I_S \quad (4.14)$$

Donde, las expresiones (4.1) a (4.4) representan los objetivos del modelo, las expresiones (4.5) a (4.11) las restricciones del modelo, y (4.12) a (4.14) definen el espacio de solución de las variables de decisión. La expresión (4.1) maximiza el cubrimiento de manzanas y cumple con el criterio de cobertura geográfica, (4.2) maximiza la población beneficiada y cumple con el criterio de cobertura poblacional, (4.3) maximiza la suma de los indicadores de densidad vial, con esta función objetivo se cumple con el criterio de accesibilidad, (4.4) minimiza la inversión. Las expresiones (4.5) determinan que cada manzana j sólo sea cubierta ($z_j = 1$) si algún área candidata i es seleccionada y tiene a la manzana j en su área de cobertura, en caso contrario, si ningún área candidata que pueda cubrir a la manzana j es seleccionada, entonces el lado derecho de la restricción (4.5) obliga a que $z_j = 0$; por otro lado, las restricciones (4.6) obligan a que todas las manzanas j que son cubiertas por el área candidata i se activen ($z_j = 1$) si el área candidata i es seleccionada ($y_i = 1$). Las expresiones (4.7) y (4.8) garantizan que la suma de las áreas destinadas para parque a partir de las áreas candidatas esté entre a_{min} y a_{max} . Las expresiones (4.9) a (4.10) garantizan que si un área candidata $i, i \in I_S$ es seleccionada, entonces el área en m^2 de ésta que serán destinados para parque debe estar entre t_{min} y a_i . Es importante aclarar que el conjunto de restricciones (4.6)-(4.7) sólo se necesitan cuando se quiera alcanzar el objetivo de la expresión (4.1).

4.2. Esquema de solución

Al tratarse de un modelo multiobjetivo implica el uso de una técnica de programación multicriterio, para ello se utilizará el método de programación por métras lexicográficas, ya que con este método de solución se definen las metas relevantes para el problema y se asignan prioridades. Por

lo tanto, el esquema de solución propuesto consta de dos etapas. En la etapa 1 se resuelven cuatro modelos mono-objetivo que estarán compuestos por una de las ecuaciones (4.1) a (4.4) (la cual se define el objetivo perseguido) y las restricciones (4.5) a (4.14) (representadas por Ω), esto con el fin de encontrar la solución óptima de cada uno de los subproblemas, en la Figura 4.1 se muestra la representación gráfica de este procedimiento; en la etapa 2 utilizamos el método secuencial de programación por metas lexicográficas.

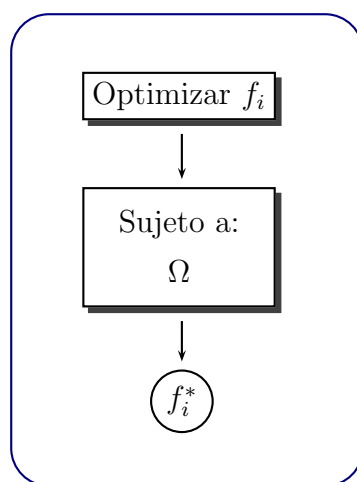


Figura 4.1: Esquema de solución (Etapa 1)

Mediante este proceso de la etapa 1 obtendremos las soluciones óptimas de cada subproblema, resultados que nos servirán en la segunda etapa para definir los niveles mínimos aceptables, los cuales son calculados a través del uso de un valor para α , que nos indica la fracción mínima aceptable del óptimo obtenido.

Para la segunda etapa es necesario ordenar lexicográficamente los objetivos; es decir, de manera secuencial encontrar la solución para un sólo objetivo, de manera que se vayan alcanzando las metas definidas, en este proceso se incorpora el uso del valor de α , que representa la fracción mínima

aceptable del óptimo.

El orden de prioridad utilizado en este caso, sigue el orden en que se presentaron los objetivos en el modelo, esto con el fin de encontrar una solución que garantice buenos resultados en los indicadores a un costo mínimo. En la Figura 4.2 se muestra el procedimiento de la segunda etapa.

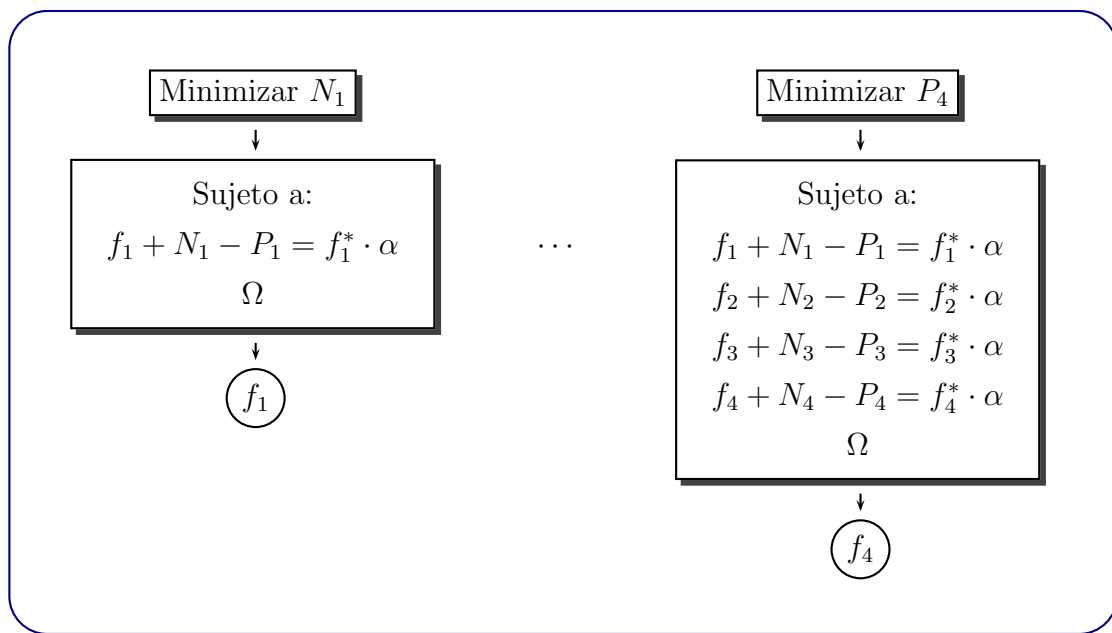


Figura 4.2: Esquema de solución (Etapa 2)

En primer lugar se resuelve un modelo mono-objetivo, cuyo objetivo será *Minimizar N_1* (donde N_1 representa la desviación negativa en el alcance de la función objetivo 4.1), como se trata de un problema de maximización, lo que deseamos es minimizar el faltante para cumplir el valor mínimo establecido; también conocido como nivel de aceptación (NA_i), este valor se define mediante la siguiente ecuación: $NA_1 = (f_1^*) \cdot (\alpha)$; por lo que el modelo queda formado por el conjunto de restricciones Ω , añadiendo la siguiente restricción:

$$f_1 + N_1 + P_1 = NA_1 \quad (4.15)$$

Donde $\alpha \in [0, 1]$ y representa, como ya se mencionó antes, la fracción mínima aceptable del óptimo obtenido, la restricción (4.15) sirve para garantizar, en medida de lo posible, que se cumpla con el nivel de aceptación para esta función objetivo, por ejemplo, si definimos a $\alpha = 0.7$, estamos indicando que queremos que al menos se alcance un 70 % del valor óptimo del objetivo en cuestión.

En segundo lugar se resuelve el problema definido por el objetivo *Minimizar* N_2 (donde N_2 representa la desviación negativa en el alcance de la función objetivo 4.2), el conjunto de restricciones Ω y la restricción (4.15), añadiendo la siguiente restricción:

$$f_2 + N_2 + P_2 = NA_2 \quad (4.16)$$

En tercer lugar se resuelve el problema definido por el objetivo *Minimizar* N_3 (donde N_3 representa la desviación negativa en el alcance de la función objetivo 4.3), el conjunto de restricciones Ω y las restricciones (4.15)-(4.16), añadiendo la siguiente restricción:

$$f_3 + N_3 + P_3 = NA_3 \quad (4.17)$$

Finalmente, se resuelve el problema definido por el objetivo *Maximizar* P_4 (donde P_4 representa la desviación positiva en el alcance de la función objetivo 4.4, como se trata de un problema de minimización, lo que deseamos es minimizar el excedente para cumplir el valor mínimo establecido), el conjunto de restricciones Ω y las restricciones (4.15)-(4.17), añadiendo la siguiente restricción:

$$f_4 + N_4 + P_4 = NA_4 \quad (4.18)$$

Al resolver este último problema obtendremos la solución que cumple, en mayor proporción con los objetivos (4.1)-(4.3), al menor costo, representado por la función objetivo (4.4).

Es importante mencionar que al tratarse de un problema multiobjetivo, los resultados encontrados pueden no cumplir, en la mayoría de los casos, con el óptimo de cada uno de los objetivos planteados, se obtendrá el conjunto de áreas aptas para convertirse en parques, para ello se realizará un análisis de sensibilidad, a través del cual se variará el valor de α con el fin de elegir las áreas que se repitan en cada una de las soluciones para los distintos valores de α , además de que mediante este análisis de sensibilidad se podrá validar el funcionamiento del modelo.

En la Figura 4.3 se muestra un pequeño esquema de trabajo, en el que se resumen las actividades realizadas en el SIG y en LINGO 10¹, y se puede distinguir claramente la interacción entre ambas herramientas.

4.3. Caso de estudio

En esta sección se aplica el modelo a un caso de estudio con la finalidad de mostrar cómo funciona.

4.3.1. Elección de la zona de estudio

Como pudimos ver en el Capítulo 1, en el Distrito Federal existen delegaciones no cumplen con el estándar internacional de $9m^2$ de áreas verdes por

¹Proporcionado por la Jefatura de Investigación de Operaciones del Departamento de Posgrado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

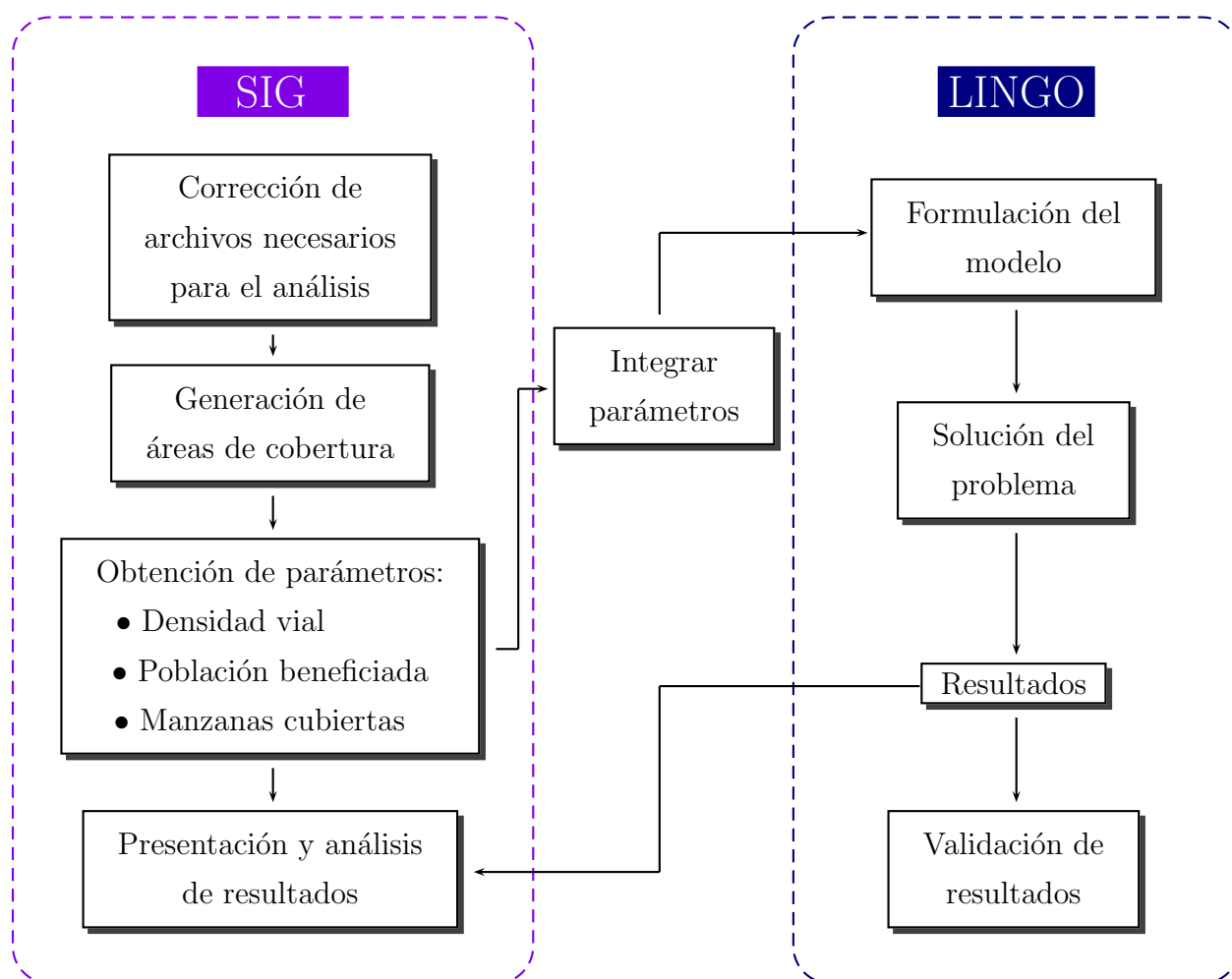


Figura 4.3: Flujo de trabajo en SIG y LINGO

Fuente: Elaboración propia

habitante, una de las delegaciones que se encuentran con los porcentajes más bajos es la delegación Cuauhtémoc, es por ello que el caso de estudio se basó en dicha delegación.

4.3.2. Áreas candidatas para nuevos parques

Para la selección de áreas candidatas, se realizaron dos solicitudes de información a través del sistema de información INFOMEX del Distrito Federal, la primera solicitud se dirigió a la Delegación Cuauhtémoc, de quienes se recibió como respuesta la sugerencia de dirigirnos a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI) y a la Secretaría de Transporte y Vialidad (SETRAVI), por lo que la segunda solicitud se dirigió a dichas secretarías. En ambos casos la respuesta fue negativa y no se proporcionó la información necesaria.

De estas solicitudes surgió el contacto con el Urbanista Martín Daniel López Guzmán, Jefe de la Unidad de Desarrollo Urbano de la Delegación Cuauhtémoc, quien explicó que no cuentan con nuevas áreas para la construcción de nuevos parques; sin embargo, existen distintos espacios de áreas verdes que están en espera de ser atendidas, ya que en este momento están en deterioro y no cumplen con las condiciones necesarias para servir a la población. En este sentido, existe un catálogo de áreas verdes [7], publicado en la página de la SMA, como resultado de uno de los decretos establecidos en la Ley Ambiental del Distrito Federal [3], y para fines de mostrar la funcionalidad del modelo se utilizaron estas áreas verdes, propuestas por la delegación Cuauhtémoc, (Ver Tabla 4.1).

Por lo tanto, el modelo buscará seleccionar las áreas verdes que necesiten ser intervenidas, con el fin de priorizar la inversión.

Numeración	Ubicación	Superficie (m^2)
1	Plaza de la Ciudadela. Av. Balderas y Enrico Martínez. Col. Centro.	13,060
2	Jardín Tolsa. Av. Balderas entre Manuel Tolsa y Enrico Martínez. Col. Centro.	10,500
3	Parque España. Av. Sonora entre Av. Parque España y Av. Oaxaca. Col. Condesa.	30,500
4	Jardín del Arte. Villalongín y Sullivan. Col. Cuauhtémoc.	11,264
5	Jardín de las Artes Gráficas. Dr. Arce, Dr. Andrade, Dr. Durán y Dr. Vértiz. Col. Doctores.	11,765
6	Jardín Ignacio Chávez. Av. Cuauhtémoc entre Dr. Liceaga y Dr. Carmona y valle. Col. Doctores.	10,048
7	Plaza Abasolo. Eje 1 poniente Guerrero entre Luna y Estrella. Col. Guerrero.	5,380
8	Plaza de los Ángeles. Lerdo entre Luna y Estrella. Col. Guerrero.	8,148
9	Jardín de los 4 vientos. Eje Central, Lázaro Cárdenas entre Schubert, Liszt y Ernesto Eluorduy. Col. Peralvillo.	5,500
10	Plaza Río de Janeiro. Durango y Orizaba. Col. Roma Norte.	10,256
11	Jardín Alexander Pushkin. Entre Álvaro Obregón, Morelia y Colima. Col. Roma Norte.	21,640
12	Parque Ramón López Velarde. Av. Cuauhtémoc entre Huatabampo, Av. Toluca y Antonio M. Anza. Col. Centro Urbano Benito Juárez. Roma Sur.	80,573
13	Jardín del Tiempo. Lateral de la Av. de los Insurgentes Norte, entre Tilos y San Simón. Col. Santa María Insurgentes.	2,961
14	Alameda Santa Ma. La Ribera. Salvador Díaz Mirón, Jaime Torres Bodet, Manuel Carpio y Dr. Atl. Col. Santa Ma. La Ribera.	27,046

Numeración	Ubicación	Superficie (m^2)
15	Jardín de Mascarones. Jaime Torres Bodet y Ribera de San Cosme. Col. Santa Ma. La Ribera.	1,983
16	Jardín Vista Alegre (El Pípila). Ramón Fabie, Juan A. Mateos, José Antonio Torres y José Roa Bárcenas. Col. Vista Alegre.	14,970
17	Camellón Circuito Amsterdam. Citlaltepctl a Chilpancingo; Chilpancingo a Iztaccihuatl; Iztaccihuatl a A. Michoacán; Av, Michoacán a Teotihuacán; Teotihuacán a A. Sonora; Av. Sonora a Celaya; Celaya a Popocatepetl; Popocatepetl a Cacahuamilpa; Cacahuamilpaa Huichapan, Huichapan a Av. Sonora; Av. Sonora a Parras; Parras a Laredo; Laredo a Av. Michoacán; Av. Michoacán a Ozuluama; Ozuluama a Citlaltepctl. Col. Hipódromo.	13,370
18	Jardín el Indio. Calzada de la Viga, Calle cerrada de la Viga y callejón Canal. Col. Esperanza.	1,347
19	Jardín Edith Sánchez. Esq. San Luis Potosí, Yucatán y Tonalá. Col. Roma Norte.	930

Tabla 4.1: Catálogo de áreas verdes de la delegación Cuauhtémoc

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente

Al incorporar estas áreas verdes en ArcMap, la representación de éstas se puede observar en la Figura 4.4.

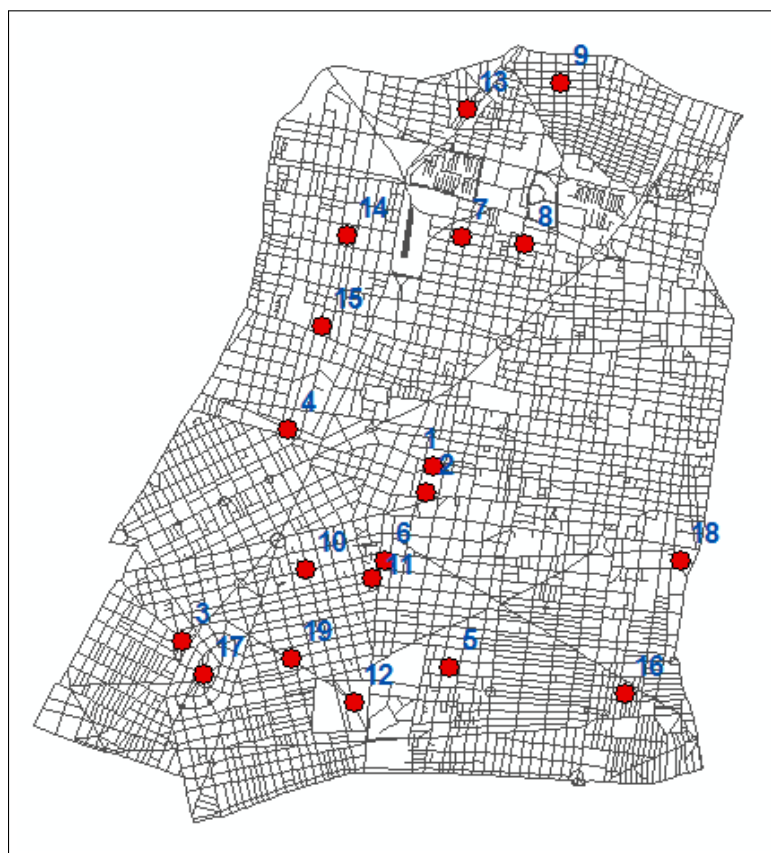


Figura 4.4: Ubicación de las áreas verdes en la red vial de la delegación Cuauhtémoc

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

4.3.3. Cálculo y definición de parámetros

Para la formulación del modelo fue necesario comprar el archivo en formato *shape* que contiene información sobre la red vial, el archivo de las manzanas, y la base de datos con la información de población por manzana de la delegación Cuauhtémoc.

La red vial se adquirió en el INEGI, para poder realizar el análisis y la obtención de algunos parámetros del modelo fue necesario corregir los errores topológicos² de la red, (Ver Tabla 4.2), en esta tabla se muestra la descripción de cada uno de los errores encontrados y el número estimado

²Derivado de la topología, que se refiere al estudio de las propiedades geométricas de una figura que no depende de su posición sino de la conectividad, correlación, continencia, adyacencia y dirección. *Department of Environment, 1987, UK*

de éstos. En la Figura 4.5 se muestra de manera simplificada el proceso de trabajo que se realizó para corregir los errores.

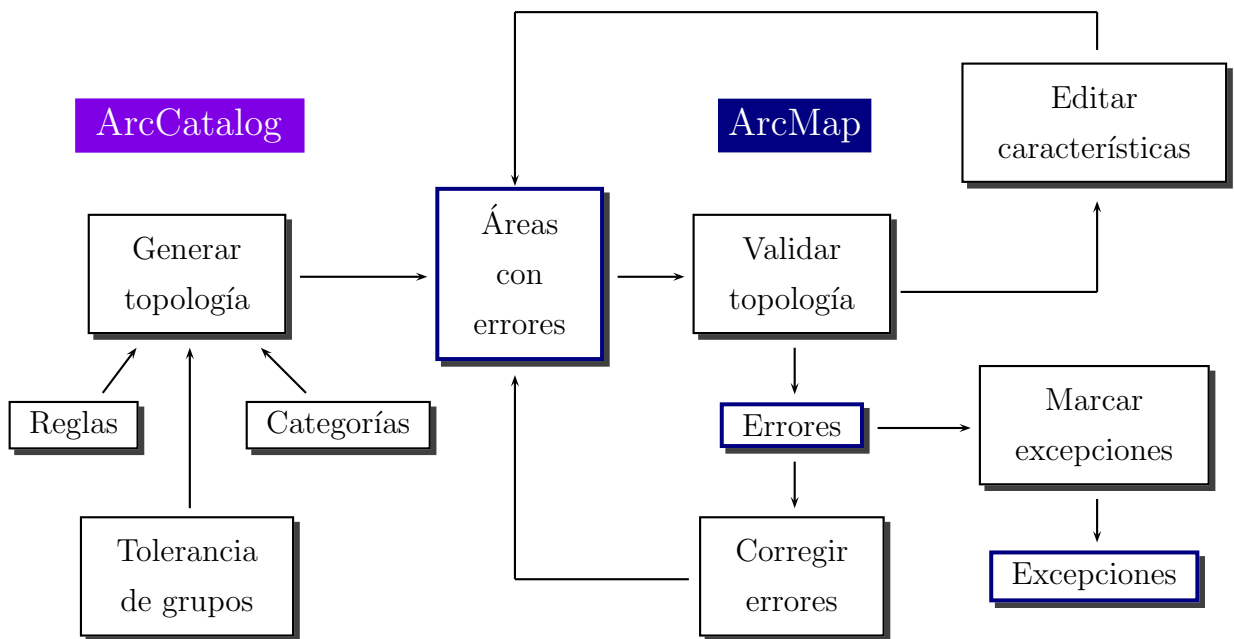


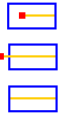




Figura 4.5: Flujo de trabajo topológico

Fuente: Elaboración propia, basado en LeClaire [15]

Tipo de error	Descripción	Esquema	Solución	# errores encontrados
Must Not Overlap	Cualquier línea de algún <i>layer</i> que sobrepone otra(s) líneas del mismo <i>layer</i> , es un error.		Substract	144
Must Not Intersect	Cualquier línea de algún <i>layer</i> que intersecta o sobrepone otras líneas del mismo <i>layer</i> , es un error.		Substract, Split	3862
Must Not Have Dangles	Cualquier línea de algún <i>layer</i> que no toca líneas del mismo <i>layer</i> por ambos puntos finales, es un error.		Extend, Trim, Snap	7930
Must Not Have Pseudos	Cualquier línea de un <i>layer</i> que no toca más de una línea del mismo <i>layer</i> en sus puntos finales, es un error.		Merge To Largest, Merge	3354
Must Not Self-Overlap	Cualquier línea de un <i>layer</i> que se intersecta o sobrepasa a sí misma, es un error.		Simplify	9


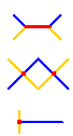

Tipo de error	Descripción	Esquema	Solución	# errores encontrados
Must Not Self-Intersect	Cualquier línea de un <i>layer</i> que se intersecta a sí misma o en algún punto, es un error.		Simplify	6
Must Not Intersect Or Touch Interior	Cualquier línea de un <i>layer</i> que toca líneas del mismo <i>layer</i> en sus puntos finales, o cualquier punto de intersección, es un error.		Substract, Split	32500
Must be Single Part	Cualquier línea de un <i>layer</i> que se forme por más de un segmento, es un error.		Explode	10

Tabla 4.2: Clasificación de errores topológicos

Fuente: Elaboración propia, basado en ESRI

El trabajo realizado tanto en ArcCatalog como en ArcMap fue arduo, y conformó un proceso elaborado y detallado, por un lado se generó la geodatabase en ArcCatalog, se creó la topología y se corrigieron los errores (Ver Figura 4.6); por otro lado se realizó el análisis en ArcMap, (Ver Figura 4.8). Como se mencionó en el Capítulo 3, el análisis se realizó a nivel peatón, el radio de cobertura se generó bajo estos supuestos, a partir del centroide (Ver Figura 4.7) del parque se fue generando el radio de cobertura medido a través de todos los caminos posibles que puede tomar un peatón para

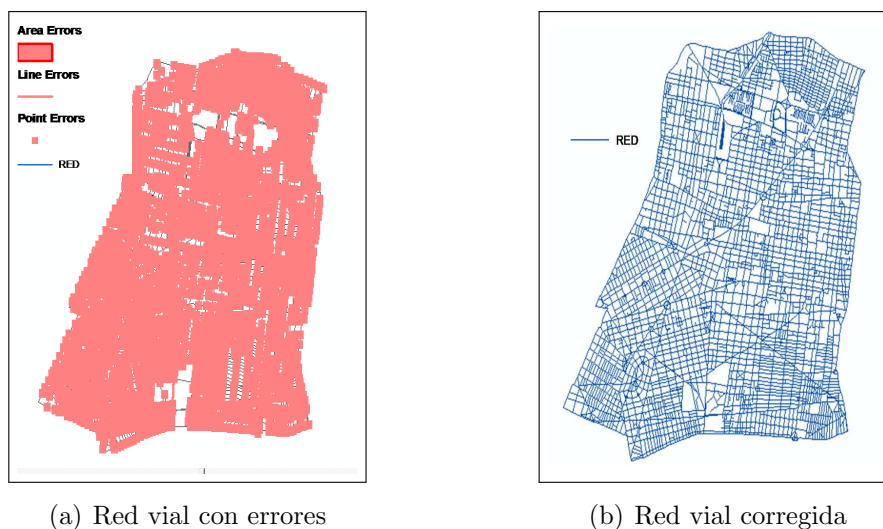


Figura 4.6: Red vial de la delegación Cuauhtémoc

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI

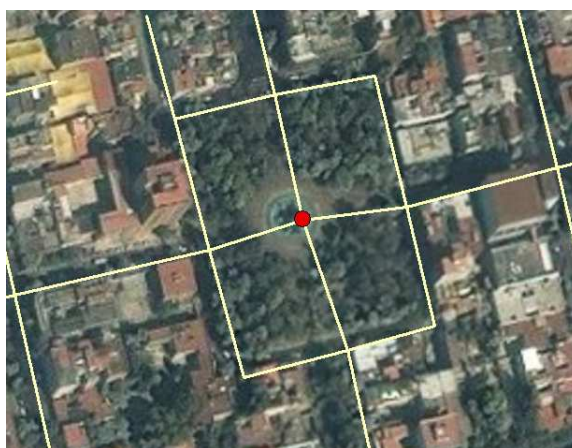
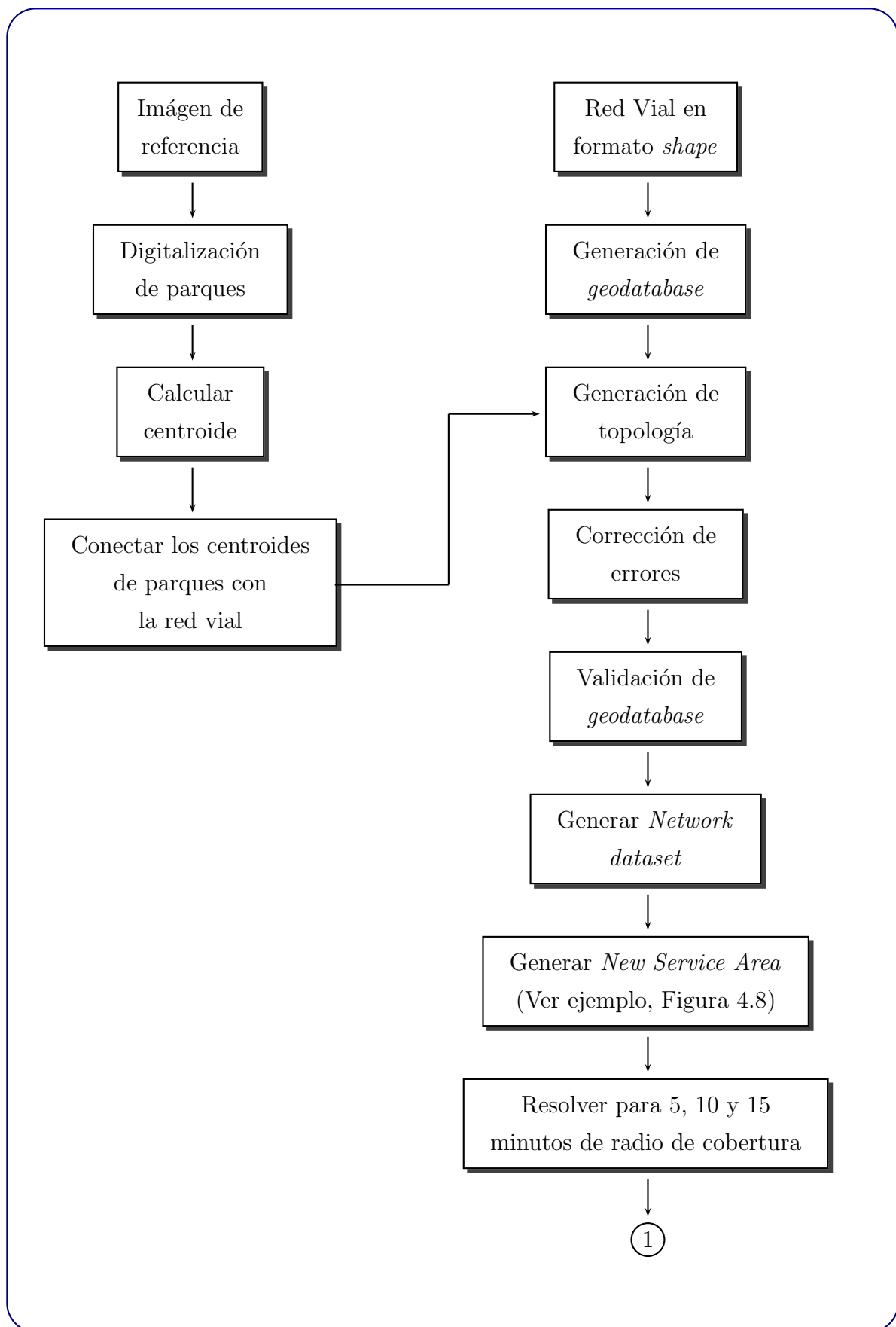


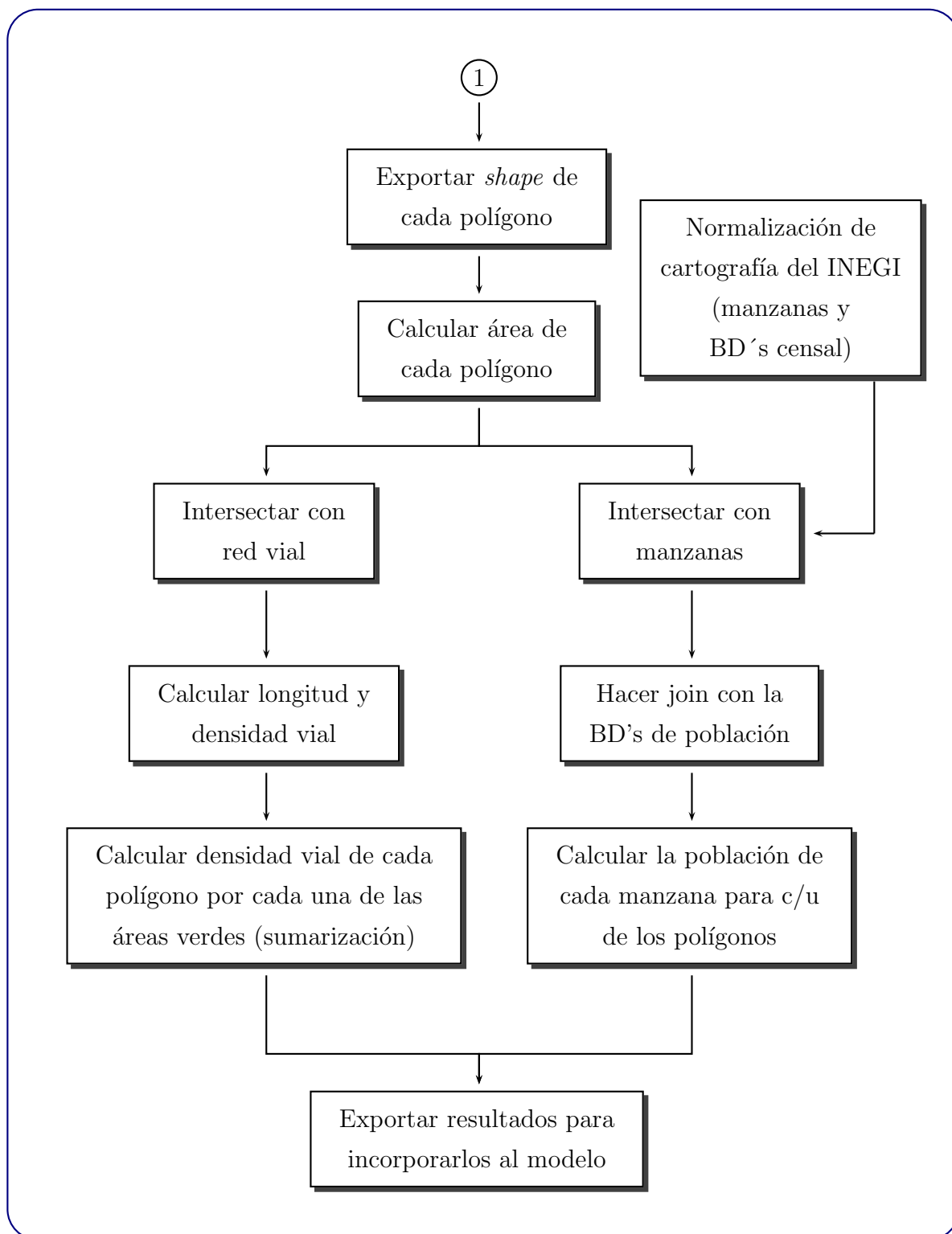
Figura 4.7: Centroide de un área verde

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI(modificada)

llegar al parque en menos de 5, 10 y 15 minutos.

En la Figura 4.7, el círculo rojo representa el centroide del área verde, y las líneas amarillas representan la red vial, se incorporaron caminos hacia



**Figura 4.8:** Proceso en SIG*Fuente:* Elaboración propia

el centroide para modelar el recorrido del peatón hacia el parque, estas modificaciones se aplicaron para cada una de las demás áreas verdes, y lo mismo aplica para las glorietas donde un peatón puede cruzar la calle sin necesidad de seguir el camino trazado por las vialidades de la delegación. Es imposible predecir el movimiento real de un peatón; sin embargo, para fines de estudio basta con incorporar caminos evidentes en la red vial.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) aconseja el diseño de áreas verdes de tal manera que todos los residentes vivan cerca de un espacio abierto (a una distancia de no más de 15 minutos a pie), es por esta razón que se realiza un análisis para 5, 10 y 15 minutos con la finalidad de tener una visión más amplia del impacto que tiene el tiempo de recorrido sobre la cobertura de un parque. Es decir, por cada una de las áreas verdes se generaron 3 polígonos de radio de cobertura, y sobre éstos se obtuvieron los parámetros de densidad vial, población total y el número de manzanas que se encuentran dentro del alcance de cada área verde.

Por otro lado, no se pudo conseguir información concerniente a la inversión necesaria para la remodelación de cada una de las áreas verdes propuestas por la delegación Cuauhtémoc, así que se optó por tomar como una medida de este parámetro el costo de una propiedad (Ver Anexo A) con características similares para todos los casos, y que se encuentre cerca de las áreas verdes en estudio; es decir, pertenecientes a cada una de las colonias de dichas áreas. Se utilizó el costo por metro cuadrado de la propiedad como parámetro para el modelo. Es importante aclarar que este parámetro no es el ideal y podría generar soluciones diferentes que al utilizar los datos reales de inversión requerida. No es un parámetro que represente la realidad de la inversión necesaria, pero para fines del caso de estudio sirve para mostrar el funcionamiento del modelo.

Los parámetros de área mínima y máxima de áreas verdes a remodelar son importantes en la formulación del modelo, ya que a través de estos se generan los límites requeridos para la remodelación de cada una de las áreas verdes y de esta manera se puede priorizar la inversión y asegurar que se elijan los espacios que requieren mayor atención y obtenga el mayor cumplimiento de los objetivos.

Es importante mencionar que los parámetros de inversión requerida, área mínima y máxima, y los referentes a los tamaños permitidos para las áreas verdes, son parámetros sencillos de modificar en el modelo, la parte más complicada en la formulación del modelo concierne a las manzanas cubiertas, la densidad vial y la población beneficiada que se encuentran dentro del radio de cobertura de cada uno de los espacios verdes a construir o remodelar. Para este caso de estudio, se puede asegurar que la información referente a estos tres últimos tópicos ha sido recabada de forma exitosa y con datos reales, para el caso de los otros parámetros fue necesario hacer algunas estimaciones y suposiciones para determinarlos, ya que no se contó con el apoyo necesario por parte de la delegación en cuestión; sin embargo, como se mencionó anteriormente, estos parámetros no tienen gran impacto sobre la formulación del modelo y son fáciles de modificar.

En este sentido, los parámetros utilizados para área máxima y mínima (a_{min}, a_{max}) a construir o remodelar, fueron 28124.1 y 224992.8, respectivamente, que corresponden al cumplimiento como mínimo del 10% del total de las 19 áreas verdes y al 80%. El tamaño mínimo aceptable (t_{min}) quedó definido por el tamaño mínimo de las áreas verdes con tamaño superior a 10000 m , que corresponde a 10048 m .

No tendría sentido enlistar las manzanas que quedan cubiertas por cada una de las áreas verdes, ya que son demasiadas, en la Tabla 4.3 se resumen

los parámetros encontrados en el SIG.

Una vez definidos los parámetros del modelo se puede pasar a la siguiente sección, resolver el modelo y presentar los resultados.

Área verde	# Manzanas cubiertas			Población beneficiada			Densidad Vial		
	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
1	6	30	73	1003	5386	7846	0.0176	0.0171	0.0188
2	1	18	69	87	6544	7241	0.0233	0.0152	0.0169
3	1	16	171	2541	7421	16500	0.0247	0.0224	0.0209
4	10	45	106	1694	7784	11877	0.0203	0.0167	0.0180
5	11	60	114	3196	16978	18656	0.0200	0.0186	0.0196
6	32	87	140	4570	9487	13724	0.0232	0.0159	0.0180
7	22	66	128	10483	17693	26321	0.0209	0.0177	0.0207
8	23	104	170	10574	30995	23418	0.0232	0.0188	0.0196
9	21	66	140	5062	8821	22173	0.0221	0.0247	0.0216
10	12	54	126	1744	6719	11985	0.0187	0.0203	0.0189
11	17	96	147	3092	12772	11553	0.0228	0.0174	0.0174
12	5	37	102	515	5241	12083	0.0188	0.0178	0.0200
13	7	36	100	981	6579	17003	0.0263	0.0230	0.0194
14	9	46	890	5237	17803	12569	0.0166	0.0166	0.0180
15	8	41	87	3661	11354	15257	0.0175	0.0158	0.0163
16	26	89	171	3825	13549	17629	0.0304	0.0226	0.0218
17	15	76	189	3374	9154	13783	0.0244	0.0225	0.0224
18	5	30	69	2300	7934	7979	0.0194	0.0160	0.0187
19	18	66	137	2747	9086	10669	0.0207	0.0213	0.0211

Tabla 4.3: Resumen de parámetros encontrados en el SIG

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.9 se muestra la distribución de la población por manzana dentro de los polígonos de cobertura generados por cada una de las áreas verdes.

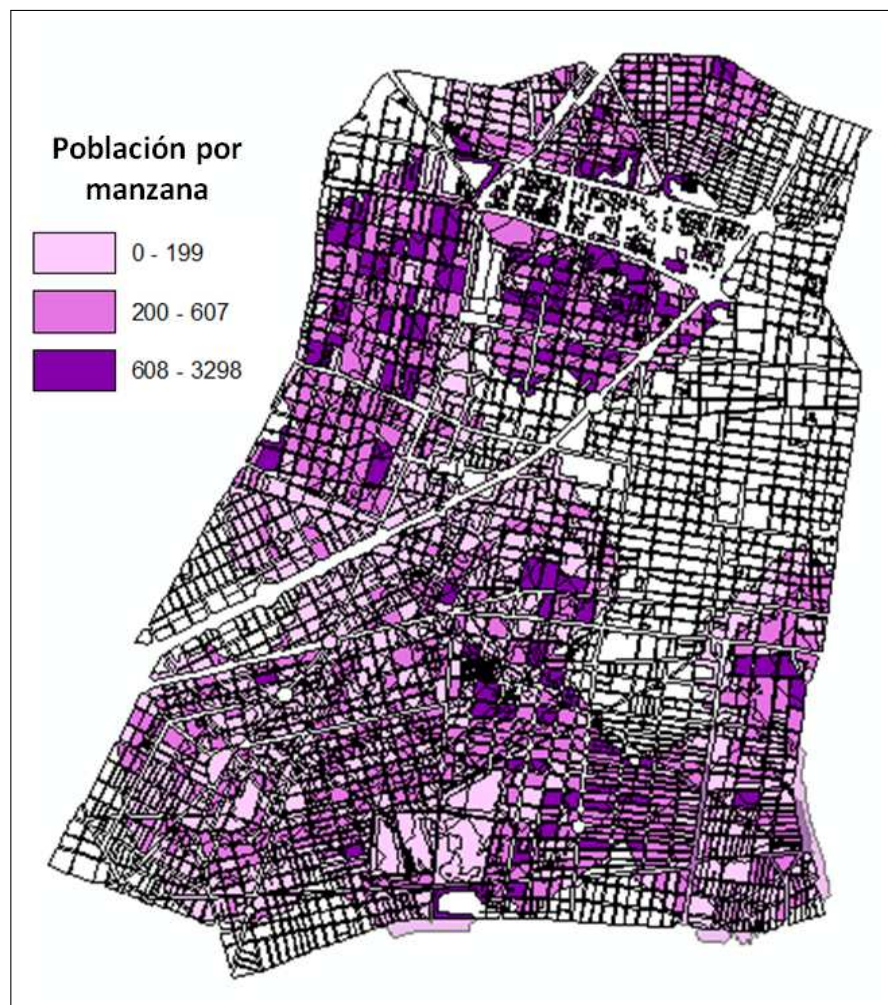


Figura 4.9: Distribución de la población por manzana en los polígonos de cobertura

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI y BD's poblacional

4.3.4. Solución del modelo y análisis de resultados

Una vez definidos los parámetros, se formularon los modelos para cada uno de los escenarios utilizados. Se consideraron tres radios de cobertura distintos para realizar un análisis sobre el impacto de éstos en los polígonos de cobertura generados por las áreas verdes.

Según la OMS deben existir áreas verdes a una distancia de no más de 15 minutos a pie de la casa de algún residente. Es por esta razón que se decidió probar con 5, 10 y 15 minutos como parámetros de impedancia, y evaluar si con las áreas existentes se alcanza a cubrir gran parte de la población.

En la Figura 4.10 se muestra un ejemplo de los polígonos de cobertura generados por cada uno de los valores de impedancia, se distinguen tres polígonos para 5, 10 y 15 minutos, del más pequeño al grande, respectivamente.

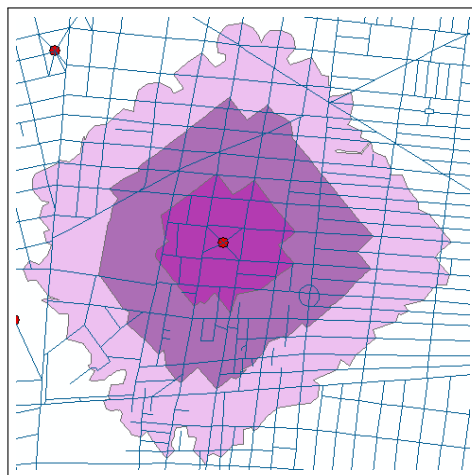


Figura 4.10: Área de cobertura

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI(modificada)

Como se mencionó anteriormente, el esquema de solución consta de dos fases, en la primera fase se encuentran las soluciones óptimas para cada una

de las funciones objetivo, estos resultados son necesarios para la formulación de los siguientes modelos que conforman la segunda fase, y son resueltos a través del método secuencial de programación por metas lexicográficas.

Primera fase

Los resultados concernientes al número de áreas verdes sobre las cuáles se debería invertir son los mismos para cada uno de los escenarios; para el caso de las funciones objetivo f_2 y f_3 , referentes a la maximización de la población beneficiada y el indicador de densidad vial se encuentran directamente relacionadas con el número de áreas verdes existentes, lo que implica que entre más áreas verdes existan mayor será el cumplimiento de estos objetivos. Por otro lado, la función objetivo f_4 se refiere a la minimización de la inversión, por lo que entre menos parques necesiten intervención, menor será el costo. Los valores de las funciones objetivo varían entre cada uno de los 3 escenarios; por ejemplo, el resultado de f_1 tiene que ver con el número de manzanas cubiertas por cada una de las áreas de influencia, este número incrementa al crecer el parámetro de la impedancia; es decir, al utilizar un radio de 15 minutos se cubre un mayor número de manzanas que con un radio de 10 minutos, y éste a su vez cubre más manzanas que un radio de 5 minutos.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados encontrados en la **primera fase**.

La solución óptima para las funciones objetivo f_1 , f_2 y f_3 (para los tres escenarios) es invertir sobre todas las áreas verdes disponibles (son 19 áreas verdes); por el contrario el resultado óptimo de la función objetivo f_4 es invertir sólo en dos áreas verdes: 6 y 11 (Ver Tabla 4.1), ya que con estas se cumplen los requerimientos mínimos. Estos resultados están representados

	Función objetivo	Radio de cobertura			# de áreas verdes
		5 minutos	10 minutos	15 minutos	
1	Manzanas cubiertas	243	856	1451	19
2	Población beneficiada	66683	197270	222296	19
3	Densidad vial	0.41121	0.36073	0.36853	19
4	Inversión	517172638	517172638	517172638	2

Tabla 4.4: Resultados de la primera fase

Fuente: Elaboración propia

por las Figuras 4.11 y 4.12.

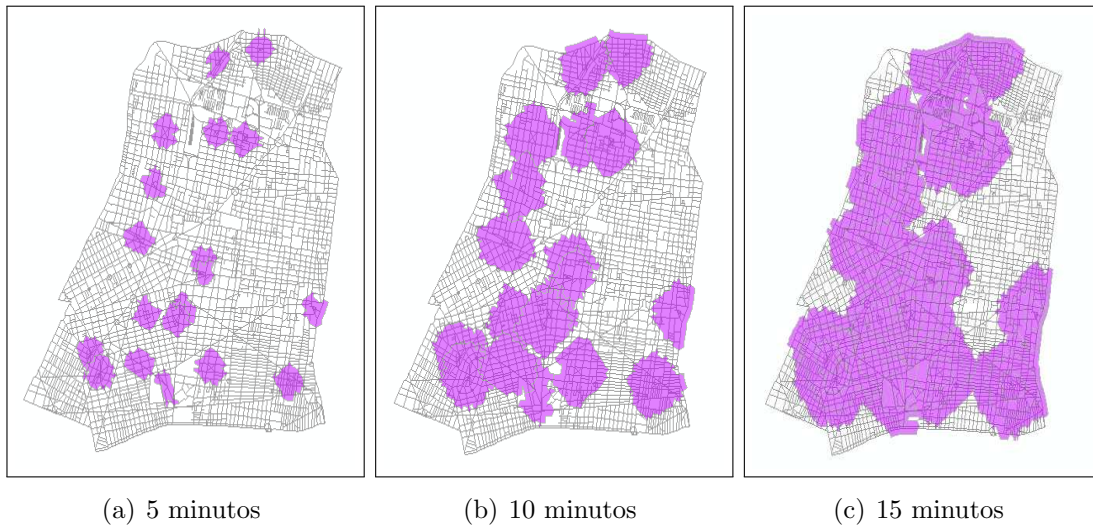


Figura 4.11: Solución óptima para las funciones objetivo f_1 , f_2 y f_3

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI(modificada)

Como se puede observar en las Figuras 4.11 y 4.12, la generación de los polígonos de cobertura está directamente relacionada con el radio de cobertura. Vemos claramente que con una impedancia de 5 minutos no se alcanza a cubrir gran parte de la delegación; por el contrario para impedancias de 10 y 15 minutos se generan soluciones similares; por lo que podríamos inferir



Figura 4.12: Solución óptima para la función objetivo f_4

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI(modificada)

que en su mayoría, la población perteneciente a la delegación Cuauhtémoc se encontraría a menos de 10 minutos de un área verde si cada una de éstas estuviera a disposición de la población; sin embargo, claramente se distingue una zona de la delegación Cuauhtémoc que queda descubierta, por lo que se podría sugerir construir un área verde que beneficie a la población de ese sector, (Ver Figura 4.13).

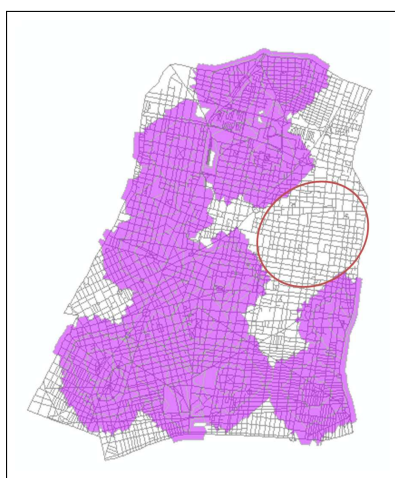


Figura 4.13: Zona sin áreas verdes

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI(modificada)

Segunda fase

Los resultados de la primera fase son necesarios para la **segunda fase**, ya que a través de ellos se define el nivel de aceptación para cada uno de los objetivos, necesario para la formulación del modelo y la solución a través del método secuencial de programación por metas lexicográficas.

Como se describió en el Capítulo 2, el nivel de aceptación está determinado por la multiplicación de la solución óptima por un valor α ; donde α representa la fracción mínima aceptable del óptimo obtenido. En esta fase se incorpora un **análisis de sensibilidad** variando los valores de α . Esto con la finalidad de validar los resultados generados por el modelo, y con base en ellos, tomar una decisión más acertada.

En las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran a manera de resumen, los parámetros utilizados para la formulación de los modelos, que representan los niveles de aceptación para cada una de las funciones objetivo.

Función objetivo		5 minutos		
		$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.9$
1	Manzanas cubiertas	72.9	145.8	218.7
2	Población beneficiada	2004.9	40,009.8	60,014.7
3	Densidad vial	0.1234	0.2467	0.3701
4	Inversión	8,669.565	17,339.13	26,008.695

Tabla 4.5: Parámetros utilizados para una impedancia de 5 minutos

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 4.14 – 4.16 se muestran gráficamente los resultados encontrados a través del método secuencial de programación por metas lexicográficas, para un radio de cobertura de 5 minutos. En cada una de estas figuras se muestran cuatro imágenes que corresponden a las soluciones que se obtienen al ir incorporando las funciones objetivo en la formulación,

la primera figura sólo incorpora la función objetivo f_1 , la segunda incorpora las funciones objetivo f_1 y f_2 , la tercera $f_1 - f_3$ y última figura incorpora las cuatro funciones objetivo $f_1 - f_4$.

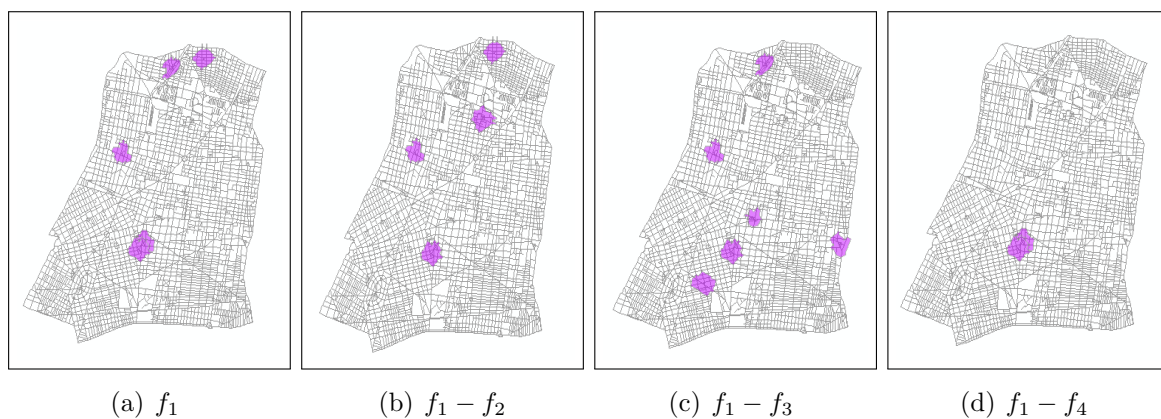


Figura 4.14: Solución por el método lexicográfico($\alpha = 0.3$, 5 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

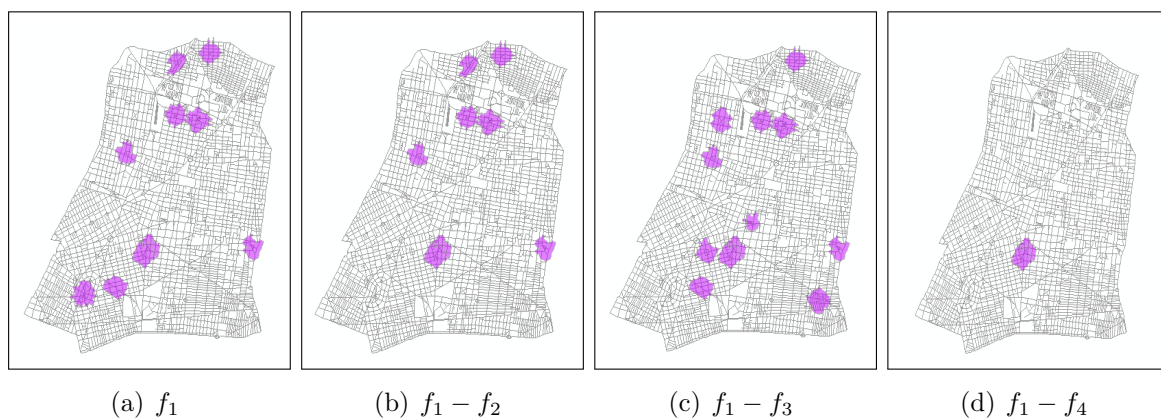


Figura 4.15: Solución por el método lexicográfico($\alpha = 0.6$, 5 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

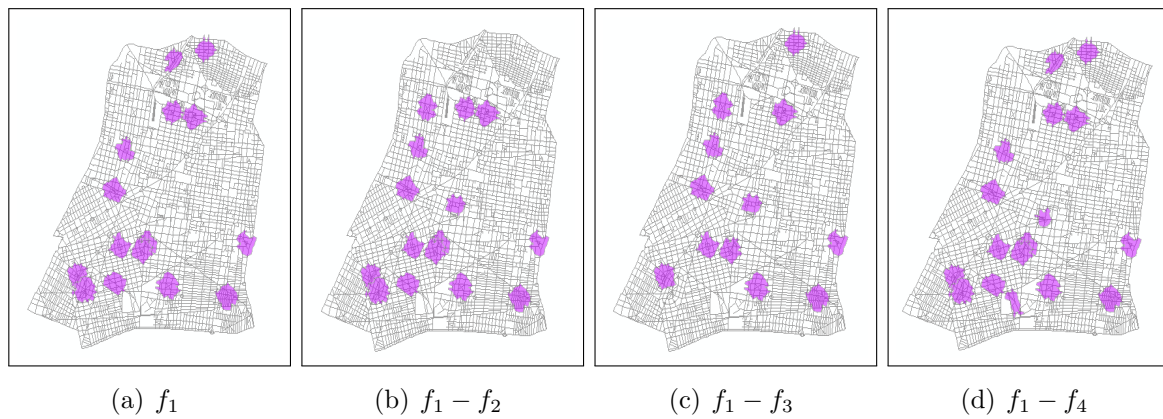


Figura 4.16: Solución por el método lexicográfico ($\alpha = 0.9$, 5 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

Función objetivo		10 minutos		
		$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.9$
1	Manzanas cubiertas	256.8	513.6	770.4
2	Población beneficiada	20,004.9	40,009.8	60,014.7
3	Densidad vial	0.1234	0.2467	0.3701
4	Inversión	8,669.565	17,339.13	26,008.695

Tabla 4.6: Parámetros utilizados para una impedancia de 10 minutos

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 4.17 – 4.19 se muestran gráficamente los resultados encontrados a través del método secuencial de programación por metas lexicográficas, para un radio de cobertura de 10 minutos. En cada una de estas figuras se muestran cuatro imágenes que corresponden a las soluciones que se obtienen al ir incorporando las funciones objetivo en la formulación, la primera figura sólo incorpora la función objetivo f_1 , la segunda incorpora las funciones objetivo f_1 y f_2 , la tercera $f_1 - f_3$ y última figura incorpora las cuatro funciones objetivo $f_1 - f_4$.

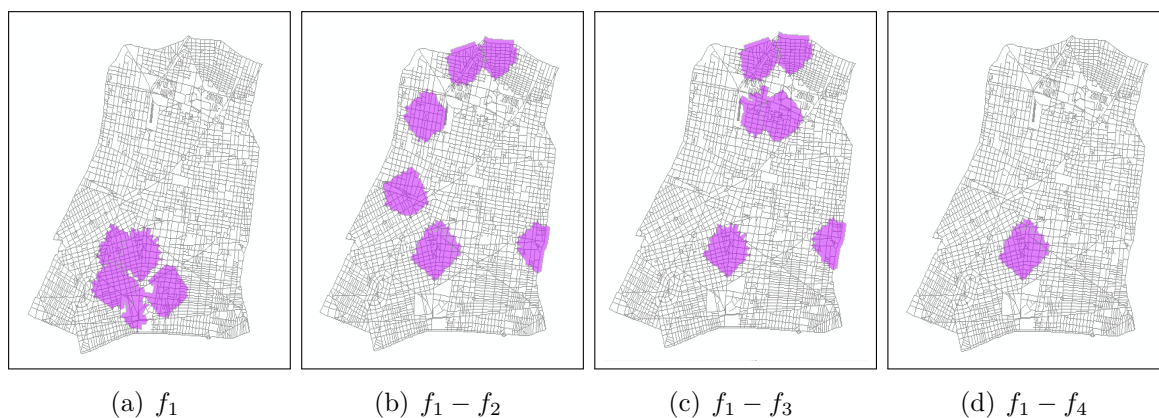


Figura 4.17: Solución por el método lexicográfico($alpha = 0.3$, 10 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

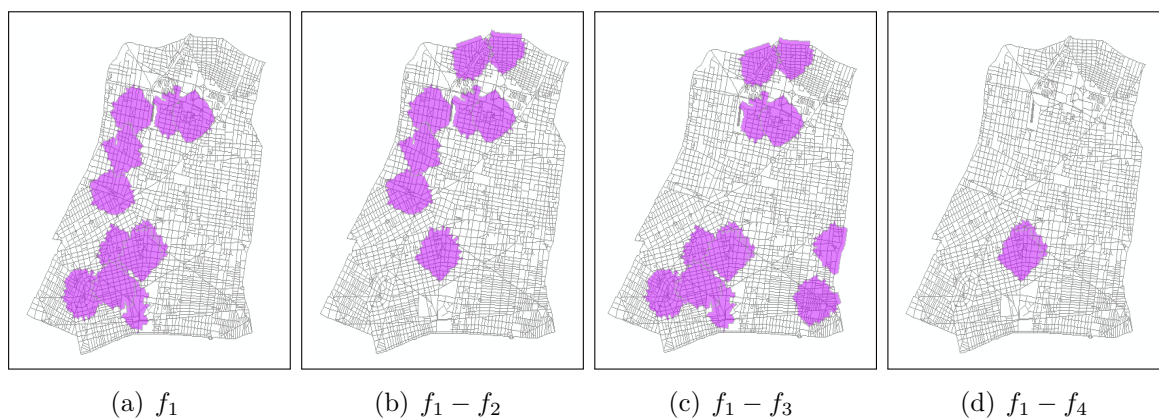


Figura 4.18: Solución por el método lexicográfico($alpha = 0.6$, 10 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

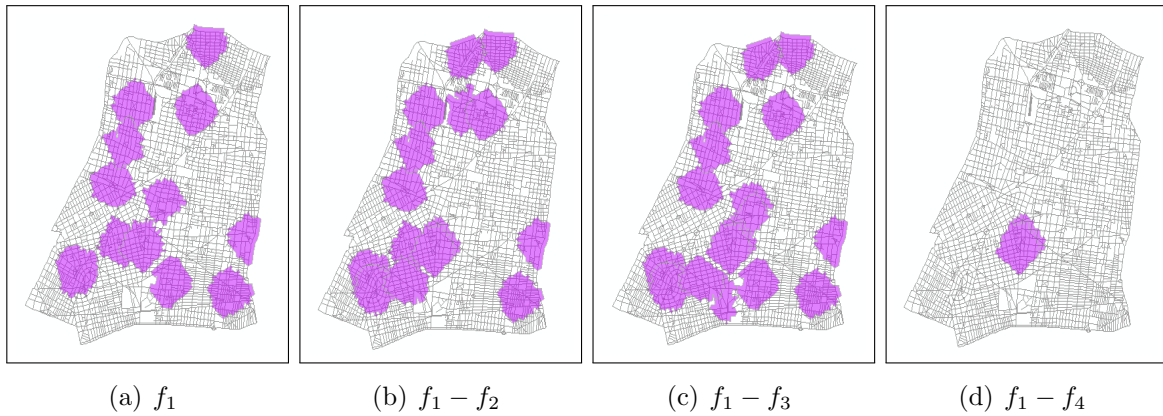


Figura 4.19: Solución por el método lexicográfico ($\alpha = 0.9$, 10 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

Función objetivo		15 minutos		
		$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.9$
1	Manzanas cubiertas	435.3	870.6	1305.9
2	Población beneficiada	20,004.9	40,009.8	60,014.7
3	Densidad vial	0.1234	0.2467	0.3701
4	Inversión	8,669.565	17,339.13	26,008.695

Tabla 4.7: Parámetros utilizados para una impedancia de 15 minutos

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 4.20 – 4.22 se muestran gráficamente los resultados encontrados a través del método secuencial de programación por metas lexicográficas, para un radio de cobertura de 15 minutos. En cada una de estas figuras se muestran cuatro imágenes que corresponden a las soluciones que se obtienen al ir incorporando las funciones objetivo en la formulación, la primera figura sólo incorpora la función objetivo f_1 , la segunda incorpora las funciones objetivo f_1 y f_2 , la tercera $f_1 - f_3$ y última figura incorpora las cuatro funciones objetivo $f_1 - f_4$.

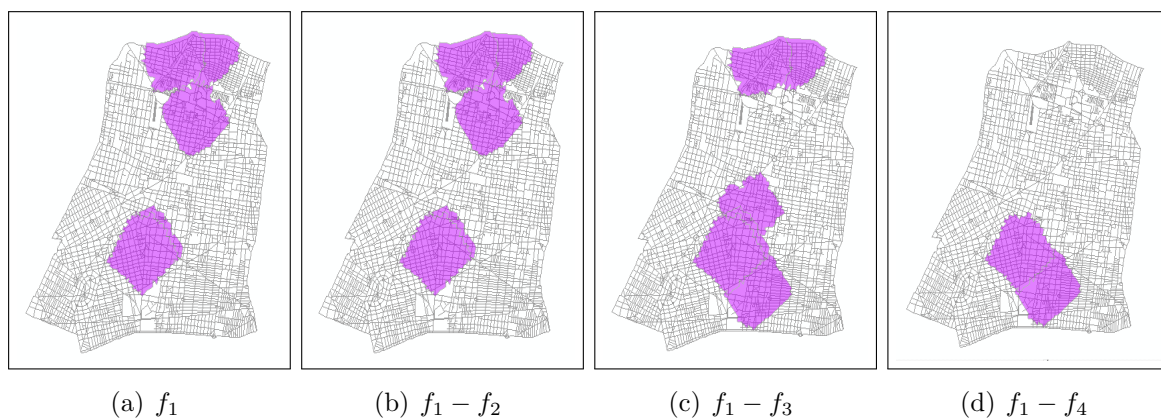


Figura 4.20: Solución por el método lexicográfico($\alpha = 0.3$, 15 minutos impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI(modificada)

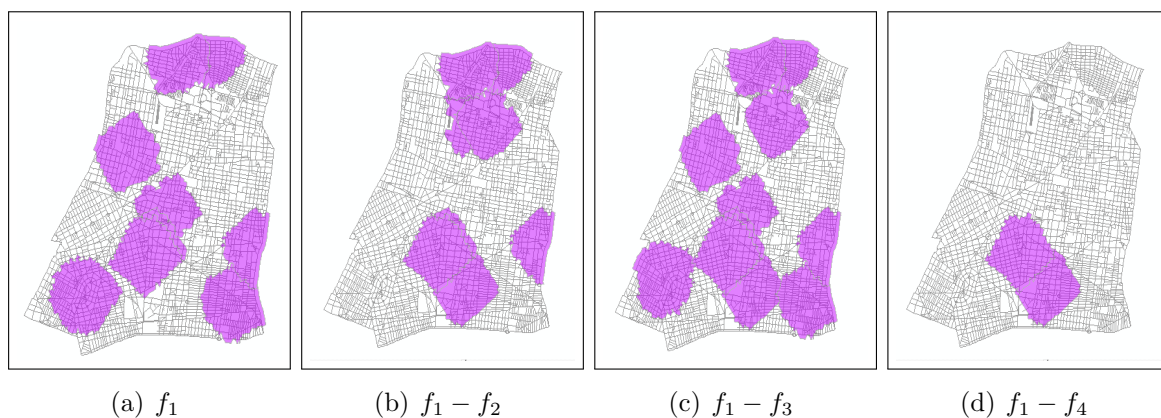


Figura 4.21: Solución por el método lexicográfico($\alpha = 0.6$, 15 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

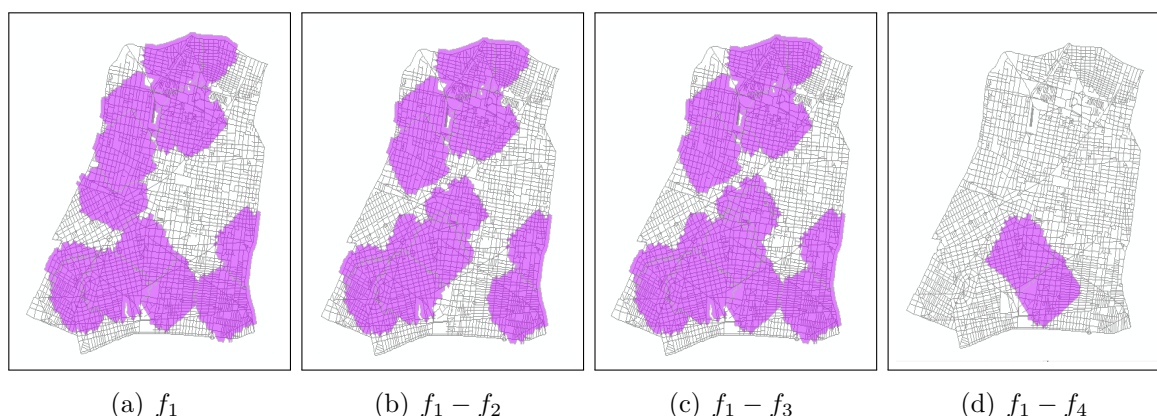


Figura 4.22: Solución por el método lexicográfico ($\alpha = 0.9$, 15 minutos de impedancia)

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI (modificada)

Los resultados encontrados con el método lexicográfico, aún variando los valores de α , son prácticamente iguales, lo que quiere decir que el modelo tiene una buena respuesta a las variaciones de los parámetros. Por tal motivo, podemos confirmar que el modelo propuesto proporciona resultados coherentes y confiables.

Se resolvieron 12 problemas para cada escenario, se utilizaron 3 valores de α : 0.3, 0.6, y 0.9 para cada valor de α se generaron cuatro modelos, necesarios para la solución por el método lexicográfico. Se compararon todos los resultados y se eligieron las áreas verdes que se repetían con más frecuencia en cada uno de los resultados, de esta manera se determinó el subconjunto de áreas verdes sobre las cuales se debe invertir. En la Figura 4.23 se muestra el sector de la delegación Cuauhtémoc que se vería beneficiada al implementar esta solución, la cual nos indica que se debería invertir sobre las áreas verdes 5, 6 y 11, a la izquierda se muestra el área de servicio generado por las áreas verdes, a la derecha se muestra la distribución de la población por manzana de dicha área.

En la Tabla 4.8 se indica el número de variables y restricciones que fueron necesarias para la formulación de los modelos. Como se puede observar, el tamaño del modelo incrementa considerablemente al aumentar el

radio de cobertura.

	Radio de cobertura		
	5 minutos	10 minutos	15 minutos
Variables	292	897	1495
Variables binarias	31	238	609
Restricciones	796	2599	3972

Tabla 4.8: Variables y restricciones necesarias en la formulación de los modelos

Fuente: Elaboración propia

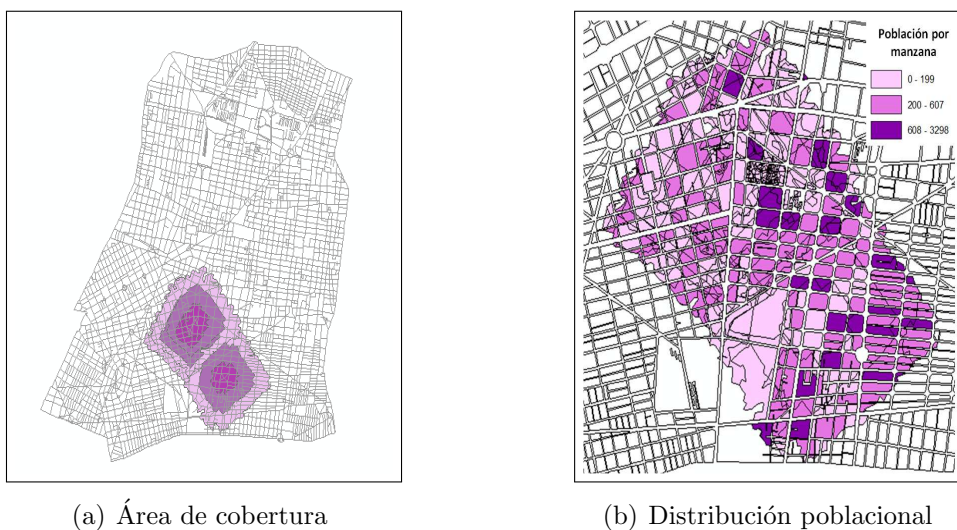


Figura 4.23: Solución por el método lexicográfico

Fuente: Elaboración propia, Red vial del INEGI y BD's poblacional

El problema se resolvió en LINGO 10, los modelos que se obtuvieron en este caso de estudio son de tamaño considerable, es por ello que no se presentan las formulaciones en esta sección; sin embargo, se incluye el ejemplo pequeño para 5 minutos de radio de cobertura, con el fin de mostrar la formulación del problema, no se incorporan los modelos para los escenarios de 10 y 15 minutos de impedancia ya que la formulación es similar al mostrado en los anexos (Ver Anexos B y C).

Validación del modelo

La validación es una parte muy importante en el desarrollo de cualquier modelo, en este caso se realizó un análisis de los resultados generados por el modelo y su respuesta ante los cambios de los parámetros. Esta parte va de la mano con la solución de la segunda fase, en donde se realizó un análisis de sensibilidad al resolver el mismo problema para distintos valores de α , al incorporar este análisis se pudo validar la efectividad del modelo propuesto ya que los resultados obtenidos fueron similares, lo que implica que el modelo genera resultados coherentes y en los que se puede confiar.

En la Tabla 4.9 se muestran los valores para cada una de las funciones objetivo, al considerar que se invertirá sobre las áreas verdes 5, 6 y 11.

Función objetivo		Radio de cobertura		
		5 minutos	10 minutos	15 minutos
1	Manzanas cubiertas	51	161	253
2	Población beneficiada	10855	38018	45152
3	Densidad vial	0.0661	0.05194	0.05509
4	Inversión	533197971	517172638	533197971

Tabla 4.9: Solución de la segunda fase

Fuente: Elaboración propia

Al implementar esta solución, se tienen los siguientes resultados:

- Para un radio de cobertura de 5 minutos, se alcanza a cumplir en un 17.4% con la solución óptima de la función objetivo f_1 , un 4.89% de f_2 , un 17.9% de f_3 y se sobrepasa en un 3.1% el valor de la función objetivo f_4 .
- Para un radio de cobertura de 10 minutos, se alcanza a cumplir en un 18.8% con la solución óptima de la función objetivo f_1 , un 19.3% de f_2 , un 14.4% de f_3 y para el caso de la función objetivo f_4 se alcanza a cubrir en su totalidad con el valor óptimo.
- Para un radio de cobertura de 15 minutos, se alcanza a cumplir en un 20.9% con la solución óptima de la función objetivo f_1 , un 67.7% de f_2 , un 13.4% de f_3 y se sobrepasa en un 3.1% el valor de la función objetivo f_4 .

Conclusiones y extensiones

Conclusiones

A manera de conclusión sobre los resultados obtenidos, la propuesta concreta es invertir sobre las áreas verdes 5, 6, y 11, que corresponden al Jardín de las Artes Gráficas, Jardín Ignacio Chávez y Jardín Alexander Pushkin, respectivamente. Al implementar esta solución (considerando 15 minutos de radio de cobertura, ya que es la norma estipulada por la OMS), se alcanzarán a cubrir 253 manzanas que corresponden al 20.9% del valor óptimo y se verían beneficiadas 45,152 personas alcanzando un 67.7% del óptimo.

En relación con los objetivos planteados para la tesis, se puede concluir que se cumplió con estos, ya que se desarrolló una herramienta matemática que permite determinar el conjunto de áreas aptas para convertirse en parques, además de que se utilizó esta herramienta para generar el subconjunto de áreas verdes sobre las cuales se debería invertir en la delegación Cuauhtémoc, esta información serviría como apoyo al tomador de decisiones. A través de este caso de estudio se pudo comprobar la utilidad del modelo propuesto y los beneficios de incorporar el uso de un SIG.

En relación con el modelo propuesto se obtuvo una mejora en la formulación, ya que en el utilizado por Molano [16], todas las variables necesitaban ser declaradas como binarias; se hizo una adaptación de tal manera

que no se necesitara declarar tantas variables binarias, lo cual reduce la complejidad del modelo y permite sea resuelto en LINGO 10, que de otra manera excedería las capacidades del paquete.

Incorporar diferentes funciones objetivo en un modelo de localización de servicios es ventajoso en términos de satisfacción sobre los resultados que se pretenden obtener, en este punto recae la utilidad de esta herramienta matemática, ya que proporciona un resultado objetivo y veraz sobre el problema en cuestión, y se convierte en un apoyo útil para la toma de decisiones.

El uso de un SIG fue de gran utilidad para el desarrollo de la aplicación, ya que a través del uso de los archivos en formato *shape* de la red vial y las manzanas, además de la base de datos de población por manzana, se pudieron obtener los parámetros de densidad vial, población beneficiada y número de manzanas cubiertas dentro cada una de las áreas de cobertura generadas por las áreas verdes de la delegación Cuauhtémoc, obtener estos datos de otra manera sería prácticamente imposible.

El análisis y la presentación de los resultados fueron más sencillos con el uso del SIG, ya que a través de éste se pudo tener una idea más clara del impacto generado al incorporar los resultados.

Con el caso de estudio propuesto se pudo probar la efectividad del modelo, y se verificó que los resultados encontrados son coherentes con los objetivos planteados. Como se puede ver en la Figura 4.23, se debería priorizar la inversión sobre las áreas verdes 5, 6 y 11, ya que con éstas se alcanza a beneficiar el mayor número de población, se maximizan las manzanas cubiertas, al igual que el indicador de densidad vial y se incurre en el menor costo.

De igual manera, con el caso de estudio se pudo verificar la flexibilidad

del modelo, ya que inicialmente fue creado para la construcción de nuevos parques, pero pudo adaptarse a obtener resultados sobre espacios existentes y priorizar la inversión.

Por otro lado, es importante destacar que a pesar de que está disponible el archivo en formato *shape* de la red vial de la delegación Cuauhtémoc, necesario para el análisis en el SIG, éste no se encuentra listo para ser trabajado y requiere de un arduo trabajo para corregir los errores y poder realizar el análisis correspondiente.

Existe una cultura deficiente sobre el valor de la información y su correcto uso, hay incongruencia sobre la misma información en distintas entidades, específicamente en la red vial del INEGI y la del IFE, quienes manejan distintas claves para clasificar las manzanas de una región; esto ocasionó un problema en la obtención de los parámetros para el modelo, ya que un principio se trabajó sobre la red vial del IFE y al no poder ligarlas con la información de la población por manzanas se tuvo que reiniciar el proceso de corrección de la información con la red del INEGI. Debería existir una norma de clasificación de las claves de manzanas para normalizar las bases de datos y permitir la interacción de información de distintas entidades.

La construcción y preservación de espacios verdes es una cuestión que nos interesa a todos, ya que con los cambios climáticos y el alto porcentaje de obesidad en nuestro país es necesario promover el uso de estos espacios.

Las inversiones realizadas por el gobierno deberían estar fundamentadas en criterios que permitan generar soluciones apropiadas a las necesidades de la población, con el uso de esta herramienta matemática y la metodología propuesta es posible determinar la ubicación de estos espacios de manera que se alcance a cubrir la mayor cantidad de población, se maximicen las

manzanas cubiertas y el nivel de accesibilidad al área verde, todo esto al menor costo.

En esta tesis se muestra una de las contribuciones de la investigación de operaciones al beneficio de la población en la Ciudad de México.

Extensiones

El modelo propuesto es flexible y puede adecuarse para resolver otro tipo de problemas relacionados con la ubicación de servicios públicos, como pueden ser hospitales, escuelas, estaciones de bomberos, etcétera. Este modelo puede servir como base para la formulación de este tipo de problemas y de esta manera convertirse en una herramienta útil para la toma de decisiones sobre la construcción de nuevos espacios públicos.

Por otro lado, el análisis de redes puede ser mejorado a través del uso de algoritmos más sofisticados y la incorporación de otras variables, como pueden ser el tiempo de espera en semáforos o la determinación de horarios.

Para fines de la tesis se utilizó el método lexicográfico de programación por metas, pero en trabajos futuros se puede probar con otros métodos de solución; por cuestiones de complejidad del modelo y limitaciones de los paquetes comerciales para resolver problemas de programación entera se recomienda el uso de técnicas heurísticas para instancias muy grandes.

Un desarrollo importante sería la incorporación de un método de solución para problemas de localización de servicios en SIG, de manera que el mismo *software* permita obtener los parámetros e incorporarlos al modelo, resolver el problema y presentar los resultados de manera interactiva.

Bibliografía

- [1] Aguilar E., Víctor G., Pedro G. V. [2001] *XI Congreso Nacional de ACEDE*, los sistemas de información geográfica y su aplicación en localización de establecimientos turísticos, Universidad de Sevilla.
- [2] Aceves García, Ricardo [2007] *Memorias de la XVII Semana Regional de Investigación y Docencia en Matemáticas*, Departamento de Matemáticas, Universidad de Sonora, México. Mosaicos matemáticos No. 20, pp. 1.6.
- [3] Asamblea Legislativa del Distrito Federal, [2000] *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Ley Ambiental del Distrito Federal, D.F.
- [4] Barrientos Martínez, Miguel Ángel. [2007] *Network Analyst, El análisis de redes desde ArcGIS 9.2*
- [5] Bosques, Sendra Joaquín, Franco, M. S., *Serie Geográfica*, Modelo de localización asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables, pp. 97-112.
- [6] Carrisosa, Emilio, *GeoFocus*, Algunas aportaciones de la investigación operativa a los problemas de localización, No. 5, pp. 268-277.
- [7] Secretaría del Medio Ambiente, [2010] *Catálogo de las áreas verdes susceptibles a ser adoptadas en el Distrito Federal, propuestas por las delegaciones*, Ley Ambiental del Distrito Federal, D.F.

-
- [8] Copas, O. A.[2000] *Solución del problema de localización de servicios multiobjetivo*, Tesis de maestría en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.
- [9] Chiesura, Anna [2004] *Landscape and urban planning*, The role of urban parks for the sustainable city, No. 68, pp. 129-138.
- [10] Espejel,Ileana, Leyva, Claudia.[2006] *Alternativas de manejo para las áreas verdes de la ciudad de Ensenada*, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C.
- [11] Erkip,F.[1997] *The distribution of urban public service: the case of parks and recreational services in Ankara*, Cities 14, No. 6, pp. 353-361.
- [12] Hillier, F., Lieberman, G [2001] *Investigación de Operaciones*, Ed. McGrawHill, 7a. edición, México, D.F.
- [13] Imaoka, T. Miyachi, K. Gothon [2005] *IEEE International*, Selecting location of urban parks in hillside city Nagasaki by usisng GIS and remote sensing, Vol. 2, pp. 1492-1495.
- [14] Jiménez L. M., Rivas, P.J., Zubiaurre, Z. M. [2008] *Cuaderno de Gestión*, Un modelo de programación por metas para la elaboración del contrato-programa de un hospital público, No. 1, Vol. 8, pp. 73-88.
- [15] LeClair Robert [2009] *ESRI Education User Conference*, Topology in ArcGIS, San Diego California.
- [16] Molano, A. L., Sarmiento, O.L.[2007] *Modelo de localización de áreas urbanas para construcción de nuevos parques vecinales en Bogotá*, Tesis de maestría, Universidad de los Andes, Bogotá.

- [17] Nowak, D., J. Dwyer, G. Childs [1997] *Beneficios y costos de manejo de áreas verdes urbanas*, Manuscrito para publicación en Anales del Seminario sobre Áreas Verdes Urbanas, 2-4 de diciembre, Krishnamurthy, L. y J. Rente Nascimento, eds. México: Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- [18] K. Oh, S. Jeong, [2007] *Landscape and Urban Planning* 82, Assessing the spatial distribution of urban parks using GIS, No. 1-2, pp. 25-32.
- [19] Owen S.H., M.S. Daskin [1998] *European Journal of Operational Research*, Strategic facility location: A review, No. 11, pp. 423-447.
- [20] Phua, M. Minowa [2005] *Landscape and Urban Planning*, A GIS-based multicriteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case of study in the Kinabalu area, Sabah Malaysia. Vol. 71, No. 2-4, pp. 207-222.
- [21] Ramírez M. L., Joaquín B. S. [2001] *Anales de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid*, Empleo de modelos de localización incorporados en SIG para definir la ubicación óptima de equipamientos hospitalarios, No. 21, pp. 53-79.
- [22] Rodrigue J.P, Claude C., Brian S. [2006] *The Geography of Transport Systems*, Ed. Routledge, Nueva York.
- [23] Rodríguez C. Z., *Economía y desarrollo*, Teoría de la decisión multicriterio: un enfoque para la toma de decisiones, No. 1, Vol. 126.
- [24] Sharma D. K., Ghosh, D. [2007] *Information and Management Sciences*, Lexicographic goal programming model for police patrol cars deployment in metropolitan cities, No. 2, Vol. 18, pp. 173-188.

- [25] Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K. y J. Williams.[1998] *Manejo de áreas verdes*, Documento de buenas prácticas. Washington, D.C.
- [26] Steuer, R. E [1986] *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*, Ed. John Wiley & Sons , Nueva York, Nueva York.
- [27] Villa M. C., A. Mazza [1996] *Landscape and Urban Planning*, A GIS-based method for multiobjective evaluation of park vegetation, Vol. 35, pp. 203-212.

Anexo A

Inversión requerida para cada una de las áreas verdes

En este anexo se muestran los datos utilizados como parámetro para la inversión requerida en cada una de las áreas verdes. Esta información fue consultada en páginas de inmuebles como <http://casas.trovitmexico.com.mx> y <http://www.segundamano.com.mx>.

Colonia	Costo	m^2	Área verde	Inversión
Centro	1,390,000	57	1 y 2	24,385.9649
Condesa	3,469,000	120	3	28,908.3333
Cuauhtémoc	1,785,000	94	4	18,989.3617
Doctores	1,176,000	126	5 y 6	9,333.3333
Guerrero	500,000	48	7 y 8	10,416.6666
Peralvillo	645,000	52	9	12,403.8462
Roma Norte	1,800,000	92	10,11 y 19	19,565.2174
Roma Sur	1,890,000	95	12	19,894.7368
Santa María Insurgentes	680,000	54	13	12,592.5926
Santa María La Ribera	980,000	82	14 y 15	11,951.2195
Vista Alegre	750,000	75	16	10,000
Hipódromo	1,950,000	119.65	17	16,297.5345
Esperanza	690,000	62	18	11,129.0323

Tabla A.1: Costo de inmuebles dentro de cada una de las colonias involucradas

Fuente: Datos obtenidos de páginas de inmuebles, elaboración propia

Anexo B

Soluciones óptimas

En este anexo se muestran las formulaciones de los problemas generados para la primera fase, son cuatro problemas, a través de los cuales se encontraron las soluciones óptimas para cada uno de los objetivos planteados, estas soluciones son necesarias para incorporarlas en la segunda fase y definir los niveles de aceptación. Se utilizó LINGO 10 para resolver los problemas.

!SOLUCIÓN ÓPTIMA: OBJETIVO 1- COBERTURA GEOGRÁFICA;

Max = M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7 + M8 + M9 + M10 + M11 + M12 + M13 + M14 + M15 + M16 + M17 + M18 + M19 + M20 + M21 + M22 + M23 + M24 + M25 + M26 + M27 + M28 + M29 + M30 + M31 + M32 + M33 + M34 + M35 + M36 + M37 + M38 + M39 + M40 + M41 + M42 + M43 + M44 + M45 + M46 + M47 + M48 + M49 + M50 + M51 + M52 + M53 + M54 + M55 + M56 + M57 + M58 + M59 + M60 + M61 + M62 + M63 + M64 + M65 + M66 + M67 + M68 + M69 + M70 + M71 + M72 + M73 + M74 + M75 + M76 + M77 + M78 + M79 + M80 + M81 + M82 + M83 + M84 + M85 + M86 + M87 + M88 + M89 + M90 + M91 + M92 + M93 + M94 + M95 + M96 + M97 + M98 + M99 + M100 + M101 + M102 + M103 + M104 + M105 + M106 + M107 + M108 + M109 + M110 + M111 + M112 + M113 + M114 + M115 + M116 + M117 + M118 + M119 + M120 + M121 + M122 + M123 + M124 + M125 + M126 + M127 + M128 + M129 + M130 + M131 + M132 + M133 + M134 + M135 + M136 + M137 + M138 + M139 + M140 + M141 + M142 + M143 + M144 + M145 + M146 + M147 + M148 + M149 + M150 + M151 + M152 + M153 + M154 + M155 + M156 + M157 + M158 + M159 + M160 + M161 + M162 + M163 + M164 + M165 + M166 + M167 + M168 + M169 + M170 + M171 + M172 + M173 + M174 + M175 + M176 + M177 + M178 + M179 + M180 + M181 + M182 + M183 + M184 + M185 + M186 + M187 + M188 + M189 + M190 + M191 + M192 + M193 + M194 + M195 + M196 + M197 + M198 + M199 + M200 + M201 + M202 + M203 + M204 + M205 + M206 + M207 + M208 + M209 + M210 + M211 + M212 + M213 + M214 + M215 + M216 + M217 + M218 + M219 + M220 + M221 + M222 + M223 + M224 + M225 + M226 + M227 + M228 + M229 + M230 + M231 + M232 + M233 + M234 + M235 + M236 + M237 + M238 + M239 + M240 + M241 + M242 + M243;

!Restricciones de manzanas;

!PARQUE 1;

M92 <= Y1; M93 <= Y1; M94 <= Y1; M96 <= Y1; M97 <= Y1; M98 <= Y1;
M92 >= Y1; M93 >= Y1; M94 >= Y1; M96 >= Y1; M97 >= Y1; M98 >= Y1;

!PARQUE 2;

M95 <= Y2;
M95 >= Y2;

!PARQUE 3;

M126 <= Y3; M132 <= Y3; M133 <= Y3; M134 <= Y3; M135 <= Y3; M136 <= Y3; M137 <= Y3; M138 <= Y3; M139 <= Y3; M140 <= Y3 + Y17; M141 <= Y3 + Y17; M144 <= Y3;
M145 <= Y3 + Y17; M151 <= Y3; M203 <= Y3; M204 <= Y3;
M126 >= Y3; M132 >= Y3; M133 >= Y3; M134 >= Y3; M135 >= Y3; M136 >= Y3; M137 >= Y3; M138 >= Y3; M139 >= Y3; 2*M140 >= Y3 + Y17; 2*M141 >= Y3 + Y17;
M144 >= Y3; 2*M145 >= Y3 + Y17; M151 >= Y3; M212 >= Y3; M204 >= Y3;

!PARQUE 4;

M78 <= Y4; M82 <= Y4; M83 <= Y4; M84 <= Y4; M86 <= Y4; M87 <= Y4; M88 <= Y4; M89 <= Y4;
M90 <= Y4; M91 <= Y4;
M78 >= Y4; M82 >= Y4; M83 >= Y4; M84 >= Y4; M86 >= Y4; M87 >= Y4; M88 >= Y4; M89 >= Y4;
M90 >= Y4; M91 >= Y4;

!PARQUE 5;

M166 <= Y5; M167 <= Y5; M168 <= Y5; M169 <= Y5; M170 <= Y5; M171 <= Y5; M172 <= Y5; M173 <= Y5; M174 <= Y5; M175 <= Y5; M176 <= Y5;
M166 >= Y5; M167 >= Y5; M168 >= Y5; M169 >= Y5; M170 >= Y5; M171 >= Y5; M172 >= Y5; M173 >= Y5; M174 >= Y5; M175 >= Y5; M176 >= Y5;

!PARQUE 6;

M110 <= Y6 + Y11; M114 <= Y6; M115 <= Y6; M116 <= Y6; M117 <= Y6 + Y11; M118 <= Y6 + Y11;
M218 <= Y6; M219 <= Y6; M220 <= Y6; M221 <= Y6; M222 <= Y6;
M223 <= Y6; M224 <= Y6; M225 <= Y6; M226 <= Y6; M227 <= Y6; M228 <= Y6; M229 <= Y6; M230 <= Y6; M231 <= Y6; M232 <= Y6; M233 <= Y6 + Y11; M234 <= Y6;
M235 <= Y6; M236 <= Y6; M237 <= Y6 + Y11; M238 <= Y6 + Y11; M239 <= Y6 + Y11; M240 <= Y6;
M241 <= Y6; M242 <= Y6 + Y11; M243 <= Y6 + Y11;
2*M110 >= Y6 + Y11; M114 >= Y6; M115 >= Y6; M116 >= Y6; 2*M117 >= Y6 + Y11; 2*M118 >= Y6 + Y11; M218 >= Y6; M219 >= Y6; M220 >= Y6; M221 >= Y6; M222 >= Y6;
M223 >= Y6; M224 >= Y6; M225 >= Y6; M226 >= Y6; M227 >= Y6; M228 >= Y6; M229 >= Y6; M230 >= Y6; M231 >= Y6; M232 >= Y6; 2*M233 >= Y6 + Y11; M234 >= Y6;
M235 >= Y6; M236 >= Y6; 2*M237 >= Y6 + Y11; 2*M238 >= Y6 + Y11; 2*M239 >= Y6 + Y11; M240 >= Y6; M241 >= Y6; 2*M242 >= Y6 + Y11; 2*M243 >= Y6 + Y11;

```

!PARQUE 7;
M37 <= Y7; M38 <= Y7; M39 <= Y7; M40 <= Y7; M41 <= Y7; M42 <= Y7; M43 <= Y7; M48 <= Y7;
M49 <= Y7; M50 <= Y7; M51 <= Y7; M57 <= Y7; M58 <= Y7; M59 <= Y7;
M60 <= Y7; M61 <= Y7; M62 <= Y7;
M37 >= Y7; M38 >= Y7; M39 >= Y7; M40 >= Y7; M41 >= Y7; M42 >= Y7; M43 >= Y7; M48 >= Y7;
M49 >= Y7; M50 >= Y7; M51 >= Y7; M57 >= Y7; M58 >= Y7; M59 >= Y7;
M60 >= Y7; M61 >= Y7; M62 >= Y7;

!PARQUE 8;
M44 <= Y8; M45 <= Y8; M46 <= Y8; M47 <= Y8; M52 <= Y8; M53 <= Y8; M54 <= Y8; M55 <= Y8;
M56 <= Y8; M63 <= Y8; M64 <= Y8; M65 <= Y8; M66 <= Y8; M67 <= Y8;
M68 <= Y8; M69 <= Y8; M70 <= Y8; M71 <= Y8; M73 >= Y8;
M447 >= Y8; M45 >= Y8; M46 >= Y8; M47 >= Y8; M52 >= Y8; M53 >= Y8; M54 >= Y8; M55 >= Y8;
M56 >= Y8; M63 >= Y8; M64 >= Y8; M65 >= Y8; M66 >= Y8; M67 >= Y8;
M68 >= Y8; M69 >= Y8; M70 >= Y8; M71 >= Y8; M73 >= Y8;

!PARQUE 9;
M1 <= Y9; M2 <= Y9; M3 <= Y9; M4 <= Y9; M5 <= Y9; M6 <= Y9; M7 <= Y9; M8 <= Y9; M9 <= Y9;
M10 <= Y9; M18 <= Y9; M19 <= Y9; M20 <= Y9; M21 <= Y9; M22 <= Y9;
M23 <= Y9; M24 <= Y9; M25 <= Y9; M26 <= Y9; M27 <= Y9; M28 <= Y9;
M1 >= Y9; M2 >= Y9; M3 >= Y9; M4 >= Y9; M5 >= Y9; M6 >= Y9; M7 >= Y9; M8 >= Y9; M9 >= Y9;
M10 >= Y9; M18 >= Y9; M19 >= Y9; M20 >= Y9; M21 >= Y9; M22 >= Y9;
M23 >= Y9; M24 >= Y9; M25 >= Y9; M26 >= Y9; M27 >= Y9; M28 >= Y9;

!PARQUE 10;
M100 <= Y10; M101 <= Y10; M102 <= Y10; M103 <= Y10; M104 <= Y10; M105 <= Y10; M106 <= Y10;
M107 <= Y10; M108 <= Y10; M109 <= Y10; M112 <= Y10; M113 <= Y10;
M100 >= Y10; M101 >= Y10; M102 >= Y10; M103 >= Y10; M104 >= Y10; M105 >= Y10; M106 >= Y10;
M107 >= Y10; M108 >= Y10; M109 >= Y10; M112 >= Y10; M113 >= Y10;

!PARQUE 11;
M111 <= Y11; M119 <= Y11; M120 <= Y11; M121 <= Y11; M127 <= Y11; M128 <= Y11; M130 <= Y11;
M131 <= Y11;
M111 >= Y11; M119 >= Y11; M120 >= Y11; M121 >= Y11; M127 >= Y11; M128 >= Y11; M130 >= Y11;
M131 >= Y11;

!PARQUE 12;
M129 <= Y12; M214 <= Y12; M215 <= Y12; M216 <= Y12; M217 <= Y12;
M129 >= Y12; M214 >= Y12; M215 >= Y12; M216 >= Y12; M217 >= Y12;

!PARQUE 13;
M11 <= Y13; M12 <= Y13; M13 <= Y13; M14 <= Y13; M15 <= Y13; M16 <= Y13; M17 <= Y13;
M11 >= Y13; M12 >= Y13; M13 >= Y13; M14 >= Y13; M15 >= Y13; M16 >= Y13; M17 >= Y13;

!PARQUE 14;
M29 <= Y14; M30 <= Y14; M31 <= Y14; M32 <= Y14; M33 <= Y14; M34 <= Y14; M35 <= Y14; M36 <=
Y14; M72 <= Y14;
M29 >= Y14; M30 >= Y14; M31 >= Y14; M32 >= Y14; M33 >= Y14; M34 >= Y14; M35 >= Y14; M36 >=
Y14; M72 >= Y14;

!PARQUE 15;
M74 <= Y15; M75 <= Y15; M76 <= Y15; M77 <= Y15; M79 <= Y15; M80 <= Y15; M81 <= Y15; M85 <=
Y15;
M74 >= Y15; M75 >= Y15; M76 >= Y15; M77 >= Y15; M79 >= Y15; M80 >= Y15; M81 >= Y15; M85 >=
Y15;

!PARQUE 16;
M177 <= Y16; M178 <= Y16; M179 <= Y16; M180 <= Y16; M181 <= Y16; M182 <= Y16; M183 <= Y16;
M184 <= Y16; M185 <= Y16; M186 <= Y16; M187 <= Y16; M188 <= Y16;
M189 <= Y16; M190 <= Y16; M191 <= Y16; M192 <= Y16; M193 <= Y16; M194 <= Y16; M195 <= Y16;
M196 <= Y16; M197 <= Y16; M198 <= Y16; M199 <= Y16; M200 <= Y16;
M201 <= Y16; M202 <= Y16;
M177 >= Y16; M178 >= Y16; M179 >= Y16; M180 >= Y16; M181 >= Y16; M182 >= Y16; M183 >= Y16;
M184 >= Y16; M185 >= Y16; M186 >= Y16; M187 >= Y16; M188 >= Y16;
M189 >= Y16; M190 >= Y16; M191 >= Y16; M192 >= Y16; M193 >= Y16; M194 >= Y16; M195 >= Y16;
M196 >= Y16; M197 >= Y16; M198 >= Y16; M199 >= Y16; M200 >= Y16;

```

```

M201 >= Y16; M202 >= Y16;

!PARQUE 17;
M142 <= Y17; M143 <= Y17; M146 <= Y17; M147 <= Y17; M148 <= Y17; M149 <= Y17; M150 <= Y17;
M205 <= Y17; M206 <= Y17; M207 <= Y17; M208 <= Y17; M209 <= Y17;
M142 >= Y17; M143 >= Y17; M146 >= Y17; M147 >= Y17; M148 >= Y17; M149 >= Y17; M150 >= Y17;
M205 >= Y17; M206 >= Y17; M207 >= Y17; M208 >= Y17; M209 >= Y17;

!PARQUE 18;
M99 <= Y18; M122 <= Y18; M123 <= Y18; M124 <= Y18; M125 <= Y18;
M99 >= Y18; M122 >= Y18; M123 >= Y18; M124 >= Y18; M125 >= Y18;

!PARQUE 19;
M152 <= Y19; M153 <= Y19; M154 <= Y19; M155 <= Y19; M156 <= Y19; M157 <= Y19; M158 <= Y19;
M159 <= Y19; M160 <= Y19; M161 <= Y19; M162 <= Y19; M163 <= Y19;
M164 <= Y19; M165 <= Y19; M210 <= Y19; M211 <= Y19; M212 <= Y19; M213 <= Y19;
M152 >= Y19; M153 >= Y19; M154 >= Y19; M155 >= Y19; M156 >= Y19; M157 >= Y19; M158 >= Y19;
M159 >= Y19; M160 >= Y19; M161 >= Y19; M162 >= Y19; M163 >= Y19;
M164 >= Y19; M165 >= Y19; M210 >= Y19; M211 >= Y19; M212 >= Y19; M213 >= Y19;

!Restricciones de área mínima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

!Restricciones de área máxima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6
>= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100;
X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <=
10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

M1 <= 1; M2 <= 1; M3 <= 1; M4 <= 1; M5 <= 1; M6 <= 1; M7 <= 1; M8
<= 1; M9 <= 1; M10 <= 1; M11 <= 1; M12 <= 1; M13 <= 1;
M14 <= 1; M15 <= 1; M16 <= 1; M17 <= 1; M18 <= 1; M19 <= 1; M20 <= 1; M21
<= 1; M22 <= 1; M23 <= 1; M24 <= 1; M25 <= 1; M26 <= 1;
M27 <= 1; M28 <= 1; M29 <= 1; M30 <= 1; M31 <= 1; M32 <= 1; M33 <= 1; M34
<= 1; M35 <= 1; M36 <= 1; M37 <= 1; M38 <= 1; M39 <= 1;
M40 <= 1; M41 <= 1; M42 <= 1; M43 <= 1; M44 <= 1; M45 <= 1; M46 <= 1; M47
<= 1; M48 <= 1; M49 <= 1; M50 <= 1; M51 <= 1; M52 <= 1;
M53 <= 1; M54 <= 1; M55 <= 1; M56 <= 1; M57 <= 1; M58 <= 1; M59 <= 1; M60
<= 1; M61 <= 1; M62 <= 1; M63 <= 1; M64 <= 1; M65 <= 1;
M66 <= 1; M67 <= 1; M68 <= 1; M69 <= 1; M70 <= 1; M71 <= 1; M72 <= 1; M73
<= 1; M74 <= 1; M75 <= 1; M76 <= 1; M77 <= 1; M78 <= 1;
M79 <= 1; M80 <= 1; M81 <= 1; M82 <= 1; M83 <= 1; M84 <= 1; M85 <= 1; M86
<= 1; M87 <= 1; M88 <= 1; M89 <= 1; M90 <= 1; M91 <= 1;
M92 <= 1; M93 <= 1; M94 <= 1; M95 <= 1; M96 <= 1; M97 <= 1; M98 <= 1; M99
<= 1; M100 <= 1; M101 <= 1; M102 <= 1; M103 <= 1; M104 <= 1;
M105 <= 1; M106 <= 1; M107 <= 1; M108 <= 1; M109 <= 1; M110 <= 1; M111 <= 1; M112
<= 1; M113 <= 1; M114 <= 1; M115 <= 1; M116 <= 1; M117 <= 1;
M118 <= 1; M119 <= 1; M120 <= 1; M121 <= 1; M122 <= 1; M123 <= 1; M124 <= 1; M125
<= 1; M126 <= 1; M127 <= 1; M128 <= 1; M129 <= 1; M130 <= 1;
M131 <= 1; M132 <= 1; M133 <= 1; M134 <= 1; M135 <= 1; M136 <= 1; M137 <= 1; M138
<= 1; M139 <= 1; M140 <= 1; M141 <= 1; M142 <= 1; M143 <= 1;
M144 <= 1; M145 <= 1; M146 <= 1; M147 <= 1; M148 <= 1; M149 <= 1; M150 <= 1; M151
<= 1; M152 <= 1; M153 <= 1; M154 <= 1; M155 <= 1; M156 <= 1;
M157 <= 1; M158 <= 1; M159 <= 1; M160 <= 1; M161 <= 1; M162 <= 1; M163 <= 1; M164
<= 1; M165 <= 1; M166 <= 1; M167 <= 1; M168 <= 1; M169 <= 1;
M170 <= 1; M171 <= 1; M172 <= 1; M173 <= 1; M174 <= 1; M175 <= 1; M176 <= 1; M177
<= 1; M178 <= 1; M179 <= 1; M180 <= 1; M181 <= 1; M182 <= 1;

```

```
M183 <= 1; M184<= 1; M185<= 1; M186<= 1; M187<= 1; M188<= 1; M189<= 1; M190
<= 1; M191<= 1; M192<= 1; M193<= 1; M194<= 1; M195<= 1;
M196 <= 1; M197<= 1; M198<= 1; M199<= 1; M200<= 1; M201<= 1; M202<= 1; M203
<= 1; M204<= 1; M205<= 1; M206<= 1; M207<= 1; M208<= 1;
M209 <= 1; M210<= 1; M211<= 1; M212<= 1; M213<= 1; M214<= 1; M215<= 1; M216
<= 1; M217<= 1; M218<= 1; M219<= 1; M220<= 1; M221<= 1;
M222 <= 1; M223<= 1; M224<= 1; M225<= 1; M226<= 1; M227<= 1; M228<= 1; M229
<= 1; M230<= 1; M231<= 1; M232<= 1; M233<= 1; M234<= 1;
M235 <= 1; M236<= 1; M237<= 1; M238<= 1; M239<= 1; M240<= 1; M241<= 1; M242
<= 1; M243<= 1; M244<= 1; M245<= 1; M246<= 1; M247<= 1;
M248 <= 1; M249<= 1; M250<= 1; M251<= 1; M252<= 1;
```

```
@BIN(Y1); @BIN(Y2); @BIN(Y3); @BIN(Y4); @BIN(Y5); @BIN(Y6); @BIN(Y7);@BIN(Y8); @BIN(Y9);
@BIN(Y10); @BIN(Y11); @BIN(Y12); @BIN(Y13); @BIN(Y14); @BIN(Y15);
@BIN(Y16); @BIN(Y17); @BIN(Y18); @BIN(Y19);
```

```
@BIN(M110); @BIN(M117); @BIN(M118); @BIN(M140); @BIN(M141); @BIN(M145);@BIN(M233); @BIN
(M237); @BIN(M110);@BIN(M238); @BIN(M239); @BIN(M242); @BIN(M243);
```


!SOLUCIÓN ÓPTIMA: OBJETIVO 2- COBERTURA POBLACIONAL;

Max = 1003*Y1 + 87*Y2 + 2541*Y3 + 1694*Y4 + 3193*Y5 + 4570*Y6 + 10483*Y7 + 10574*Y8 + 5062*Y9 + 1744*Y10 + 3092*Y11 + 515*Y12
 + 981*Y13 + 5237*Y14 + 3661*Y15 + 3825*Y16 + 3374*Y17 + 2300*Y18 + 2747*Y19;

!Restricciones de área mínima;

X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 + X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

!Restricciones de área máxima;

X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 + X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

!Restricciones de tamaño de parque;

X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6 >= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100; X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <= 10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
 X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

@BIN(Y1); @BIN(Y2); @BIN(Y3); @BIN(Y4); @BIN(Y5); @BIN(Y6); @BIN(Y7); @BIN(Y8); @BIN(Y9);
 @BIN(Y10); @BIN(Y11); @BIN(Y12); @BIN(Y13); @BIN(Y14); @BIN(Y15);
 @BIN(Y16); @BIN(Y17); @BIN(Y18); @BIN(Y19);

!SOLUCIÓN ÓPTIMA: OBJETIVO 3- ACCESIBILIDAD;

Max = 0.01757899129*Y1 + 0.02333432215*Y2 + 0.02471231706*Y3 + 0.02034681169*Y4 + 0.02001475363*Y5 + 0.02322130061*Y6
 + 0.02087521294*Y7 + 0.02318575421*Y8 + 0.02208173828*Y9 + 0.01875102704*Y10 + 0.02286539512*Y11 + 0.01879793968*Y12
 + 0.02634205140*Y13 + 0.01666540141*Y14 + 0.01750087932*Y15 + 0.03038463992*Y16 + 0.02438145621*Y17
 + 0.01944155323*Y18 + 0.02072508585*Y19;

!Restricciones de área mínima;

X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 + X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

!Restricciones de área máxima;

X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 + X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

!Restricciones de tamaño de parque;

X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6 >= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100; X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <= 10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
 X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

@BIN(Y1); @BIN(Y2); @BIN(Y3); @BIN(Y4); @BIN(Y5); @BIN(Y6); @BIN(Y7); @BIN(Y8); @BIN(Y9);
 @BIN(Y10); @BIN(Y11); @BIN(Y12); @BIN(Y13); @BIN(Y14); @BIN(Y15);
 @BIN(Y16); @BIN(Y17); @BIN(Y18); @BIN(Y19);

```

!SOLUCIÓN ÓPTIMA: OBJETIVO 4- INVERSIÓN;

MIN = 24385.96491*Y1 + 24385.96491*Y2 + 28908.33333*Y3 + 18989.3617*Y4 + 9333.333333*Y5 +
9333.333333*Y6
      + 10416.66667*Y7 + 10416.66667*Y8 + 12403.84615*Y9 + 19565.21739*Y10 + 19565.21739
*Y11 + 19894.73684*Y12
      + 12592.59259*Y13 + 11951.21951*Y14 + 11951.21951*Y15 + 10000*Y16 + 16297.53448*Y17
      + 11129.03226*Y18 + 19565.21739*Y19;

!Restricciones de área mínima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

!Restricciones de área máxima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

!Restricciones de tamaño de parque;
X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6
>= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100;
X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <=
10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

@BIN(Y1); @BIN(Y2); @BIN(Y3); @BIN(Y4); @BIN(Y5); @BIN(Y6); @BIN(Y7);@BIN(Y8); @BIN(Y9);
@BIN(Y10); @BIN(Y11); @BIN(Y12); @BIN(Y13); @BIN(Y14); @BIN(Y15);
@BIN(Y16); @BIN(Y17); @BIN(Y18); @BIN(Y19);

```

Anexo C

Soluciones por el método lexicográfico

En este anexo se muestran las formulaciones de los problemas generados para la segunda fase, son cuatro problemas, se utilizó el método secuencial de programación por metas lexicográficas.

Sólo se incluyen las formulaciones para la información referente al área de cobertura generada con 5 minutos como radio de cobertura. Como se puede ver en este anexo, los modelos incorporan muchas variables y restricciones, y al incrementar el radio de cobertura aumenta de manera considerable el número de variables y restricciones. Por esta razón sólo se incluye el caso de 5 minutos de radio de cobertura, los de 10 y 15 se generaron de manera similar.

```

!MÉTODO LEXICOGRAFICO: OBJETIVO 1- COBERTURA GEOGRÁFICA;

MIN = N1;

!FUNCIÓN OBJETIVO 1;
M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7 + M8 + M9 + M10 + M11 + M12 + M13 + M14 + M15 + M16 + M17
+ M18 + M19 + M20 + M21 + M22 + M23 + M24 + M25 + M26 +
M27 + M28 + M29 + M30 + M31 + M32 + M33 + M34 + M35 + M36 + M37 + M38 + M39 + M40 + M41 +
M42 + M43 + M44 + M45 + M46 + M47 + M48 + M49 + M50 + M51 + M52 +
M53 + M54 + M55 + M56 + M57 + M58 + M59 + M60 + M61 + M62 + M63 + M64 + M65 + M66 + M67 +
M68 + M69 + M70 + M71 + M72 + M73 + M74 + M75 + M76 + M77 + M78 +
M79 + M80 + M81 + M82 + M83 + M84 + M85 + M86 + M87 + M88 + M89 + M90 + M91 + M92 + M93 +
M94 + M95 + M96 + M97 + M98 + M99 + M100 + M101 + M102 + M103 +
M104 + M105 + M106 + M107 + M108 + M109 + M110 + M111 + M112 + M113 + M114 + M115 + M116 +
M117 + M118 + M119 + M120 + M121 + M122 + M123 + M124 + M125 +
M126 + M127 + M128 + M129 + M130 + M131 + M132 + M133 + M134 + M135 + M136 + M137 + M138 +
M139 + M140 + M141 + M142 + M143 + M144 + M145 + M146 + M147 +
M148 + M149 + M150 + M151 + M152 + M153 + M154 + M155 + M156 + M157 + M158 + M159 + M160 +
M161 + M162 + M163 + M164 + M165 + M166 + M167 + M168 + M169 +
M170 + M171 + M172 + M173 + M174 + M175 + M176 + M177 + M178 + M179 + M180 + M181 + M182 +
M183 + M184 + M185 + M186 + M187 + M188 + M189 + M190 + M191 +
M192 + M193 + M194 + M195 + M196 + M197 + M198 + M199 + M200 + M201 + M202 + M203 + M204 +
M205 + M206 + M207 + M208 + M209 + M210 + M211 + M212 + M213 +
M214 + M215 + M216 + M217 + M218 + M219 + M220 + M221 + M222 + M223 + M224 + M225 + M226 +
M227 + M228 + M229 + M230 + M231 + M232 + M233 + M234 + M235 +
M236 + M237 + M238 + M239 + M240 + M241 + M242 + M243 + N1 - P1 = 218.7;

!Restricciones de manzanas;
!PARQUE 1;
M92 <= Y1; M93 <= Y1; M94 <= Y1; M96 <= Y1; M97 <= Y1; M98 <= Y1;
M92 >= Y1; M93 >= Y1; M94 >= Y1; M96 >= Y1; M97 >= Y1; M98 >= Y1;
!PARQUE 2;
M95 <= Y2; M95 >= Y2;
!PARQUE 3;
M126 <= Y3; M132 <= Y3; M133 <= Y3; M134 <= Y3; M135 <= Y3; M136 <= Y3; M137 <= Y3; M138
<= Y3; M139 <= Y3; M140 <= Y3 + Y17; M141 <= Y3 + Y17; M144 <= Y3;
M145 <= Y3 + Y17; M151 <= Y3; M203 <= Y3; M204 <= Y3;
M126 >= Y3; M132 >= Y3; M133 >= Y3; M134 >= Y3; M135 >= Y3; M136 >= Y3; M137 >= Y3; M138 >
= Y3; M139 >= Y3; 2*M140 >= Y3 + Y17; 2*M141 >= Y3 + Y17;
M144 >= Y3; 2*M145 >= Y3 + Y17; M151 >= Y3; M212 >= Y3; M204 >= Y3;
!PARQUE 4;
M78 <= Y4; M82 <= Y4; M83 <= Y4; M84 <= Y4; M86 <= Y4; M87 <= Y4; M88 <= Y4; M89 <= Y4;
M90 <= Y4; M91 <= Y4;
M78 >= Y4; M82 >= Y4; M83 >= Y4; M84 >= Y4; M86 >= Y4; M87 >= Y4; M88 >= Y4; M89 >= Y4;
M90 >= Y4; M91 >= Y4;
!PARQUE 5;
M166 <= Y5; M167 <= Y5; M168 <= Y5; M169 <= Y5; M170 <= Y5; M171 <= Y5; M172 <= Y5; M173
<= Y5; M174 <= Y5; M175 <= Y5; M176 <= Y5;
M166 >= Y5; M167 >= Y5; M168 >= Y5; M169 >= Y5; M170 >= Y5; M171 >= Y5; M172 >= Y5; M173 >
= Y5; M174 >= Y5; M175 >= Y5; M176 >= Y5;
!PARQUE 6;
M110 <= Y6 + Y11; M114 <= Y6; M115 <= Y6; M116 <= Y6; M117 <= Y6 + Y11; M118 <= Y6 + Y11;
M218 <= Y6; M219 <= Y6; M220 <= Y6; M221 <= Y6; M222 <= Y6;
M223 <= Y6; M224 <= Y6; M225 <= Y6; M226 <= Y6; M227 <= Y6; M228 <= Y6; M229 <= Y6; M230
<= Y6; M231 <= Y6; M232 <= Y6; M233 <= Y6 + Y11; M234 <= Y6;
M235 <= Y6; M236 <= Y6; M237 <= Y6 + Y11; M238 <= Y6 + Y11; M239 <= Y6 + Y11; M240 <= Y6;
M241 <= Y6; M242 <= Y6 + Y11; M243 <= Y6 + Y11;
2*M110 >= Y6 + Y11; M114 >= Y6; M115 >= Y6; M116 >= Y6; 2*M117 >= Y6 + Y11; 2*M118 >= Y6 +
Y11; M218 >= Y6; M219 >= Y6; M220 >= Y6; M221 >= Y6; M222 >= Y6;
M223 >= Y6; M224 >= Y6; M225 >= Y6; M226 >= Y6; M227 >= Y6; M228 >= Y6; M229 >= Y6; M230 >
= Y6; M231 >= Y6; M232 >= Y6; 2*M233 >= Y6 + Y11; M234 >= Y6;
M235 >= Y6; M236 >= Y6; 2*M237 >= Y6 + Y11; 2*M238 >= Y6 + Y11; 2*M239 >= Y6 + Y11; M240 >
= Y6; M241 >= Y6; 2*M242 >= Y6 + Y11; 2*M243 >= Y6 + Y11;
!PARQUE 7;
M37 <= Y7; M38 <= Y7; M39 <= Y7; M40 <= Y7; M41 <= Y7; M42 <= Y7; M43 <= Y7; M48 <= Y7;
M49 <= Y7; M50 <= Y7; M51 <= Y7; M57 <= Y7; M58 <= Y7; M59 <= Y7;
M60 <= Y7; M61 <= Y7; M62 <= Y7;

```

```
M37 >= Y7; M38 >= Y7; M39 >= Y7; M40 >= Y7; M41 >= Y7; M42 >= Y7; M43 >= Y7; M48 >= Y7;
M49 >= Y7; M50 >= Y7; M51 >= Y7; M57 >= Y7; M58 >= Y7; M59 >= Y7;
M60 >= Y7; M61 >= Y7; M62 >= Y7;
!PARQUE 8;
M44 <= Y8; M45 <= Y8; M46 <= Y8; M47 <= Y8; M52 <= Y8; M53 <= Y8; M54 <= Y8; M55 <= Y8;
M56 <= Y8; M63 <= Y8; M64 <= Y8; M65 <= Y8; M66 <= Y8; M67 <= Y8;
M68 <= Y8; M69 <= Y8; M70 <= Y8; M71 <= Y8; M73 >= Y8;
M447 >= Y8; M45 >= Y8; M46 >= Y8; M47 >= Y8; M52 >= Y8; M53 >= Y8; M54 >= Y8; M55 >= Y8;
M56 >= Y8; M63 >= Y8; M64 >= Y8; M65 >= Y8; M66 >= Y8; M67 >= Y8;
M68 >= Y8; M69 >= Y8; M70 >= Y8; M71 >= Y8; M73 >= Y8;
!PARQUE 9;
M1 <= Y9; M2 <= Y9; M3 <= Y9; M4 <= Y9; M5 <= Y9; M6 <= Y9; M7 <= Y9; M8 <= Y9; M9 <= Y9;
M10 <= Y9; M18 <= Y9; M19 <= Y9; M20 <= Y9; M21 <= Y9; M22 <= Y9;
M23 <= Y9; M24 <= Y9; M25 <= Y9; M26 <= Y9; M27 <= Y9; M28 <= Y9;
M1 >= Y9; M2 >= Y9; M3 >= Y9; M4 >= Y9; M5 >= Y9; M6 >= Y9; M7 >= Y9; M8 >= Y9; M9 >= Y9;
M10 >= Y9; M18 >= Y9; M19 >= Y9; M20 >= Y9; M21 >= Y9; M22 >= Y9;
M23 >= Y9; M24 >= Y9; M25 >= Y9; M26 >= Y9; M27 >= Y9; M28 >= Y9;
!PARQUE 10;
M100 <= Y10; M101 <= Y10; M102 <= Y10; M103 <= Y10; M104 <= Y10; M105 <= Y10; M106 <= Y10;
M107 <= Y10; M108 <= Y10; M109 <= Y10; M112 <= Y10; M113 <= Y10;
M100 >= Y10; M101 >= Y10; M102 >= Y10; M103 >= Y10; M104 >= Y10; M105 >= Y10; M106 >= Y10;
M107 >= Y10; M108 >= Y10; M109 >= Y10; M112 >= Y10; M113 >= Y10;
!PARQUE 11;
M111 <= Y11; M119 <= Y11; M120 <= Y11; M121 <= Y11; M127 <= Y11; M128 <= Y11; M130 <= Y11;
M131 <= Y11;
M111 >= Y11; M119 >= Y11; M120 >= Y11; M121 >= Y11; M127 >= Y11; M128 >= Y11; M130 >= Y11;
M131 >= Y11;
!PARQUE 12;
M129 <= Y12; M214 <= Y12; M215 <= Y12; M216 <= Y12; M217 <= Y12;
M129 >= Y12; M214 >= Y12; M215 >= Y12; M216 >= Y12; M217 >= Y12;
!PARQUE 13;
M11 <= Y13; M12 <= Y13; M13 <= Y13; M14 <= Y13; M15 <= Y13; M16 <= Y13; M17 <= Y13;
M11 >= Y13; M12 >= Y13; M13 >= Y13; M14 >= Y13; M15 >= Y13; M16 >= Y13; M17 >= Y13;
!PARQUE 14;
M29 <= Y14; M30 <= Y14; M31 <= Y14; M32 <= Y14; M33 <= Y14; M34 <= Y14; M35 <= Y14; M36 <=
Y14; M72 <= Y14;
M29 >= Y14; M30 >= Y14; M31 >= Y14; M32 >= Y14; M33 >= Y14; M34 >= Y14; M35 >= Y14; M36 >=
Y14; M72 >= Y14;
!PARQUE 15;
M74 <= Y15; M75 <= Y15; M76 <= Y15; M77 <= Y15; M79 <= Y15; M80 <= Y15; M81 <= Y15; M85 <=
Y15;
M74 >= Y15; M75 >= Y15; M76 >= Y15; M77 >= Y15; M79 >= Y15; M80 >= Y15; M81 >= Y15; M85 >=
Y15;
!PARQUE 16;
M177 <= Y16; M178 <= Y16; M179 <= Y16; M180 <= Y16; M181 <= Y16; M182 <= Y16; M183 <= Y16;
M184 <= Y16; M185 <= Y16; M186 <= Y16; M187 <= Y16; M188 <= Y16;
M189 <= Y16; M190 <= Y16; M191 <= Y16; M192 <= Y16; M193 <= Y16; M194 <= Y16; M195 <= Y16;
M196 <= Y16; M197 <= Y16; M198 <= Y16; M199 <= Y16; M200 <= Y16;
M201 <= Y16; M202 <= Y16;
M177 >= Y16; M178 >= Y16; M179 >= Y16; M180 >= Y16; M181 >= Y16; M182 >= Y16; M183 >= Y16;
M184 >= Y16; M185 >= Y16; M186 >= Y16; M187 >= Y16; M188 >= Y16;
M189 >= Y16; M190 >= Y16; M191 >= Y16; M192 >= Y16; M193 >= Y16; M194 >= Y16; M195 >= Y16;
M196 >= Y16; M197 >= Y16; M198 >= Y16; M199 >= Y16; M200 >= Y16;
M201 >= Y16; M202 >= Y16;
!PARQUE 17;
M142 <= Y17; M143 <= Y17; M146 <= Y17; M147 <= Y17; M148 <= Y17; M149 <= Y17; M150 <= Y17;
M205 <= Y17; M206 <= Y17; M207 <= Y17; M208 <= Y17; M209 <= Y17;
M142 >= Y17; M143 >= Y17; M146 >= Y17; M147 >= Y17; M148 >= Y17; M149 >= Y17; M150 >= Y17;
M205 >= Y17; M206 >= Y17; M207 >= Y17; M208 >= Y17; M209 >= Y17;
!PARQUE 18;
M99 <= Y18; M122 <= Y18; M123 <= Y18; M124 <= Y18; M125 <= Y18;
M99 >= Y18; M122 >= Y18; M123 >= Y18; M124 >= Y18; M125 >= Y18;
!PARQUE 19;
M152 <= Y19; M153 <= Y19; M154 <= Y19; M155 <= Y19; M156 <= Y19; M157 <= Y19; M158 <= Y19;
M159 <= Y19; M160 <= Y19; M161 <= Y19; M162 <= Y19; M163 <= Y19;
M164 <= Y19; M165 <= Y19; M211 <= Y19; M212 <= Y19; M213 <= Y19;
M152 >= Y19; M153 >= Y19; M154 >= Y19; M155 >= Y19; M156 >= Y19; M157 >= Y19; M158 >= Y19;
```

```

M159 >= Y19; M160 >= Y19; M161 >= Y19; M162 >= Y19; M163 >= Y19;
M164 >= Y19; M165 >= Y19; M210 >= Y19; M211 >= Y19; M212 >= Y19; M213 >= Y19;

!Restricciones de área mínima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

!Restricciones de área máxima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

!Restricciones de tamaño de parque;
X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6
>= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100;
X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <=
10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

M1 <= 1; M2 <= 1; M3 <= 1; M4 <= 1; M5 <= 1; M6 <= 1; M7 <= 1; M8
<= 1; M9 <= 1; M10 <= 1; M11 <= 1; M12 <= 1; M13 <= 1;
M14 <= 1; M15 <= 1; M16 <= 1; M17 <= 1; M18 <= 1; M19 <= 1; M20 <= 1; M21
<= 1; M22 <= 1; M23 <= 1; M24 <= 1; M25 <= 1; M26 <= 1;
M27 <= 1; M28 <= 1; M29 <= 1; M30 <= 1; M31 <= 1; M32 <= 1; M33 <= 1; M34
<= 1; M35 <= 1; M36 <= 1; M37 <= 1; M38 <= 1; M39 <= 1;
M40 <= 1; M41 <= 1; M42 <= 1; M43 <= 1; M44 <= 1; M45 <= 1; M46 <= 1; M47
<= 1; M48 <= 1; M49 <= 1; M50 <= 1; M51 <= 1; M52 <= 1;
M53 <= 1; M54 <= 1; M55 <= 1; M56 <= 1; M57 <= 1; M58 <= 1; M59 <= 1; M60
<= 1; M61 <= 1; M62 <= 1; M63 <= 1; M64 <= 1; M65 <= 1;
M66 <= 1; M67 <= 1; M68 <= 1; M69 <= 1; M70 <= 1; M71 <= 1; M72 <= 1; M73
<= 1; M74 <= 1; M75 <= 1; M76 <= 1; M77 <= 1; M78 <= 1;
M79 <= 1; M80 <= 1; M81 <= 1; M82 <= 1; M83 <= 1; M84 <= 1; M85 <= 1; M86
<= 1; M87 <= 1; M88 <= 1; M89 <= 1; M90 <= 1; M91 <= 1;
M92 <= 1; M93 <= 1; M94 <= 1; M95 <= 1; M96 <= 1; M97 <= 1; M98 <= 1; M99
<= 1; M100 <= 1; M101 <= 1; M102 <= 1; M103 <= 1; M104 <= 1;
M105 <= 1; M106 <= 1; M107 <= 1; M108 <= 1; M109 <= 1; M110 <= 1; M111 <= 1; M112
<= 1; M113 <= 1; M114 <= 1; M115 <= 1; M116 <= 1; M117 <= 1;
M118 <= 1; M119 <= 1; M120 <= 1; M121 <= 1; M122 <= 1; M123 <= 1; M124 <= 1; M125
<= 1; M126 <= 1; M127 <= 1; M128 <= 1; M129 <= 1; M130 <= 1;
M131 <= 1; M132 <= 1; M133 <= 1; M134 <= 1; M135 <= 1; M136 <= 1; M137 <= 1; M138
<= 1; M139 <= 1; M140 <= 1; M141 <= 1; M142 <= 1; M143 <= 1;
M144 <= 1; M145 <= 1; M146 <= 1; M147 <= 1; M148 <= 1; M149 <= 1; M150 <= 1; M151
<= 1; M152 <= 1; M153 <= 1; M154 <= 1; M155 <= 1; M156 <= 1;
M157 <= 1; M158 <= 1; M159 <= 1; M160 <= 1; M161 <= 1; M162 <= 1; M163 <= 1; M164
<= 1; M165 <= 1; M166 <= 1; M167 <= 1; M168 <= 1; M169 <= 1;
M170 <= 1; M171 <= 1; M172 <= 1; M173 <= 1; M174 <= 1; M175 <= 1; M176 <= 1; M177
<= 1; M178 <= 1; M179 <= 1; M180 <= 1; M181 <= 1; M182 <= 1;
M183 <= 1; M184 <= 1; M185 <= 1; M186 <= 1; M187 <= 1; M188 <= 1; M189 <= 1; M190
<= 1; M191 <= 1; M192 <= 1; M193 <= 1; M194 <= 1; M195 <= 1;
M196 <= 1; M197 <= 1; M198 <= 1; M199 <= 1; M200 <= 1; M201 <= 1; M202 <= 1; M203
<= 1; M204 <= 1; M205 <= 1; M206 <= 1; M207 <= 1; M208 <= 1;
M209 <= 1; M210 <= 1; M211 <= 1; M212 <= 1; M213 <= 1; M214 <= 1; M215 <= 1; M216
<= 1; M217 <= 1; M218 <= 1; M219 <= 1; M220 <= 1; M221 <= 1;
M222 <= 1; M223 <= 1; M224 <= 1; M225 <= 1; M226 <= 1; M227 <= 1; M228 <= 1; M229
<= 1; M230 <= 1; M231 <= 1; M232 <= 1; M233 <= 1; M234 <= 1;
M235 <= 1; M236 <= 1; M237 <= 1; M238 <= 1; M239 <= 1; M240 <= 1; M241 <= 1; M242
<= 1; M243 <= 1; M244 <= 1; M245 <= 1; M246 <= 1; M247 <= 1;
M248 <= 1; M249 <= 1; M250 <= 1; M251 <= 1; M252 <= 1;

@BIN(Y1); @BIN(Y2); @BIN(Y3); @BIN(Y4); @BIN(Y5); @BIN(Y6); @BIN(Y7);@BIN(Y8); @BIN(Y9);
@BIN(Y10); @BIN(Y11); @BIN(Y12); @BIN(Y13); @BIN(Y14); @BIN(Y15);
@BIN(Y16); @BIN(Y17); @BIN(Y18); @BIN(Y19);
@BIN(M110); @BIN(M117); @BIN(M118); @BIN(M140); @BIN(M141); @BIN(M145);@BIN(M233); @BIN
(M237); @BIN(M110);@BIN(M238); @BIN(M239); @BIN(M242); @BIN(M243);

```

```

!MÉTODO LEXICOGRÁFICO: OBJETIVO 1-2;

MIN = N2;

!FUNCIÓN OBJETIVO 1;
M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7 + M8 + M9 + M10 + M11 + M12 + M13 + M14 + M15 + M16 + M17
+ M18 + M19 + M20 + M21 + M22 + M23 + M24 + M25 + M26 +
M27 + M28 + M29 + M30 + M31 + M32 + M33 + M34 + M35 + M36 + M37 + M38 + M39 + M40 + M41 +
M42 + M43 + M44 + M45 + M46 + M47 + M48 + M49 + M50 + M51 + M52 +
M53 + M54 + M55 + M56 + M57 + M58 + M59 + M60 + M61 + M62 + M63 + M64 + M65 + M66 + M67 +
M68 + M69 + M70 + M71 + M72 + M73 + M74 + M75 + M76 + M77 + M78 +
M79 + M80 + M81 + M82 + M83 + M84 + M85 + M86 + M87 + M88 + M89 + M90 + M91 + M92 + M93 +
M94 + M95 + M96 + M97 + M98 + M99 + M100 + M101 + M102 + M103 +
M104 + M105 + M106 + M107 + M108 + M109 + M110 + M111 + M112 + M113 + M114 + M115 + M116 +
M117 + M118 + M119 + M120 + M121 + M122 + M123 + M124 + M125 +
M126 + M127 + M128 + M129 + M130 + M131 + M132 + M133 + M134 + M135 + M136 + M137 + M138 +
M139 + M140 + M141 + M142 + M143 + M144 + M145 + M146 + M147 +
M148 + M149 + M150 + M151 + M152 + M153 + M154 + M155 + M156 + M157 + M158 + M159 + M160 +
M161 + M162 + M163 + M164 + M165 + M166 + M167 + M168 + M169 +
M170 + M171 + M172 + M173 + M174 + M175 + M176 + M177 + M178 + M179 + M180 + M181 + M182 +
M183 + M184 + M185 + M186 + M187 + M188 + M189 + M190 + M191 +
M192 + M193 + M194 + M195 + M196 + M197 + M198 + M199 + M200 + M201 + M202 + M203 + M204 +
M205 + M206 + M207 + M208 + M209 + M210 + M211 + M212 + M213 +
M214 + M215 + M216 + M217 + M218 + M219 + M220 + M221 + M222 + M223 + M224 + M225 + M226 +
M227 + M228 + M229 + M230 + M231 + M232 + M233 + M234 + M235 +
M236 + M237 + M238 + M239 + M240 + M241 + M242 + M243 + N1 - P1 = 218.7;

!FUNCIÓN OBJETIVO 2;
1003*Y1 + 87*Y2 + 2541*Y3 + 1694*Y4 + 3193*Y5 + 4570*Y6 + 10483*Y7 + 10574*Y8 + 5062*Y9 +
1744*Y10 + 3092*Y11 + 515*Y12
+ 981*Y13 + 5237*Y14 + 3661*Y15 + 3825*Y16 + 3374*Y17 + 2300*Y18 + 2747*Y19 + N2 -
P2 = 60014.7;

!Restricciones de manzanas;
!PARQUE 1;
M92 <= Y1; M93 <= Y1; M94 <= Y1; M96 <= Y1; M97 <= Y1; M98 <= Y1;
M92 >= Y1; M93 >= Y1; M94 >= Y1; M96 >= Y1; M97 >= Y1; M98 >= Y1;
!PARQUE 2;
M95 <= Y2;
M95 >= Y2;
!PARQUE 3;
M126 <= Y3; M132 <= Y3; M133 <= Y3; M134 <= Y3; M135 <= Y3; M136 <= Y3; M137 <= Y3; M138
<= Y3; M139 <= Y3; M140 <= Y3 + Y17; M141 <= Y3 + Y17; M144 <= Y3;
M145 <= Y3 + Y17; M151 <= Y3; M203 <= Y3; M204 <= Y3;
M126 >= Y3; M132 >= Y3; M133 >= Y3; M134 >= Y3; M135 >= Y3; M136 >= Y3; M137 >= Y3; M138 >
= Y3; M139 >= Y3; 2*M140 >= Y3 + Y17; 2*M141 >= Y3 + Y17;
M144 >= Y3; 2*M145 >= Y3 + Y17; M151 >= Y3; M212 >= Y3; M204 >= Y3;
!PARQUE 4;
M78 <= Y4; M82 <= Y4; M83 <= Y4; M84 <= Y4; M86 <= Y4; M87 <= Y4; M88 <= Y4; M89 <= Y4;
M90 <= Y4; M91 <= Y4;
M78 >= Y4; M82 >= Y4; M83 >= Y4; M84 >= Y4; M86 >= Y4; M87 >= Y4; M88 >= Y4; M89 >= Y4;
M90 >= Y4; M91 >= Y4;
!PARQUE 5;
M166 <= Y5; M167 <= Y5; M168 <= Y5; M169 <= Y5; M170 <= Y5; M171 <= Y5; M172 <= Y5; M173
<= Y5; M174 <= Y5; M175 <= Y5; M176 <= Y5;
M166 >= Y5; M167 >= Y5; M168 >= Y5; M169 >= Y5; M170 >= Y5; M171 >= Y5; M172 >= Y5; M173 >
= Y5; M174 >= Y5; M175 >= Y5; M176 >= Y5;
!PARQUE 6;
M110 <= Y6 + Y11; M114 <= Y6; M115 <= Y6; M116 <= Y6; M117 <= Y6 + Y11; M118 <= Y6 + Y11;
M218 <= Y6; M219 <= Y6; M220 <= Y6; M221 <= Y6; M222 <= Y6;
M223 <= Y6; M224 <= Y6; M225 <= Y6; M226 <= Y6; M227 <= Y6; M228 <= Y6; M229 <= Y6; M230
<= Y6; M231 <= Y6; M232 <= Y6; M233 <= Y6 + Y11; M234 <= Y6;
M235 <= Y6; M236 <= Y6; M237 <= Y6 + Y11; M238 <= Y6 + Y11; M239 <= Y6 + Y11; M240 <= Y6;
M241 <= Y6; M242 <= Y6 + Y11; M243 <= Y6 + Y11;
2*M110 >= Y6 + Y11; M114 >= Y6; M115 >= Y6; M116 >= Y6; 2*M117 >= Y6 + Y11; 2*M118 >= Y6 +
Y11; M218 >= Y6; M219 >= Y6; M220 >= Y6; M221 >= Y6; M222 >= Y6;
M223 >= Y6; M224 >= Y6; M225 >= Y6; M226 >= Y6; M227 >= Y6; M228 >= Y6; M229 >= Y6; M230 >

```

```

= Y6; M231 >= Y6; M232 >= Y6; 2*M233 >= Y6 + Y11; M234 >= Y6;
M235 >= Y6; M236 >= Y6; 2*M237 >= Y6 + Y11; 2*M238 >= Y6 + Y11; 2*M239 >= Y6 + Y11; M240 >
= Y6; M241 >= Y6; 2*M242 >= Y6 + Y11; 2*M243 >= Y6 + Y11;
!PARQUE 7;
M37 <= Y7; M38 <= Y7; M39 <= Y7; M40 <= Y7; M41 <= Y7; M42 <= Y7; M43 <= Y7; M48 <= Y7;
M49 <= Y7; M50 <= Y7; M51 <= Y7; M57 <= Y7; M58 <= Y7; M59 <= Y7;
M60 <= Y7; M61 <= Y7; M62 <= Y7;
M37 >= Y7; M38 >= Y7; M39 >= Y7; M40 >= Y7; M41 >= Y7; M42 >= Y7; M43 >= Y7; M48 >= Y7;
M49 >= Y7; M50 >= Y7; M51 >= Y7; M57 >= Y7; M58 >= Y7; M59 >= Y7;
M60 >= Y7; M61 >= Y7; M62 >= Y7;
!PARQUE 8;
M44 <= Y8; M45 <= Y8; M46 <= Y8; M47 <= Y8; M52 <= Y8; M53 <= Y8; M54 <= Y8; M55 <= Y8;
M56 <= Y8; M63 <= Y8; M64 <= Y8; M65 <= Y8; M66 <= Y8; M67 <= Y8;
M68 <= Y8; M69 <= Y8; M70 <= Y8; M71 <= Y8; M73 >= Y8;
M447 >= Y8; M45 >= Y8; M46 >= Y8; M47 >= Y8; M52 >= Y8; M53 >= Y8; M54 >= Y8; M55 >= Y8;
M56 >= Y8; M63 >= Y8; M64 >= Y8; M65 >= Y8; M66 >= Y8; M67 >= Y8;
M68 >= Y8; M69 >= Y8; M70 >= Y8; M71 >= Y8; M73 >= Y8;
!PARQUE 9;
M1 <= Y9; M2 <= Y9; M3 <= Y9; M4 <= Y9; M5 <= Y9; M6 <= Y9; M7 <= Y9; M8 <= Y9; M9 <= Y9;
M10 <= Y9; M18 <= Y9; M19 <= Y9; M20 <= Y9; M21 <= Y9; M22 <= Y9;
M23 <= Y9; M24 <= Y9; M25 <= Y9; M26 <= Y9; M27 <= Y9; M28 <= Y9;
M1 >= Y9; M2 >= Y9; M3 >= Y9; M4 >= Y9; M5 >= Y9; M6 >= Y9; M7 >= Y9; M8 >= Y9; M9 >= Y9;
M10 >= Y9; M18 >= Y9; M19 >= Y9; M20 >= Y9; M21 >= Y9; M22 >= Y9;
M23 >= Y9; M24 >= Y9; M25 >= Y9; M26 >= Y9; M27 >= Y9; M28 >= Y9;
!PARQUE 10;
M100 <= Y10; M101 <= Y10; M102 <= Y10; M103 <= Y10; M104 <= Y10; M105 <= Y10; M106 <= Y10;
M107 <= Y10; M108 <= Y10; M109 <= Y10; M112 <= Y10; M113 <= Y10;
M100 >= Y10; M101 >= Y10; M102 >= Y10; M103 >= Y10; M104 >= Y10; M105 >= Y10; M106 >= Y10;
M107 >= Y10; M108 >= Y10; M109 >= Y10; M112 >= Y10; M113 >= Y10;
!PARQUE 11;
M111 <= Y11; M119 <= Y11; M120 <= Y11; M121 <= Y11; M127 <= Y11; M128 <= Y11; M130 <= Y11;
M131 <= Y11;
M111 >= Y11; M119 >= Y11; M120 >= Y11; M121 >= Y11; M127 >= Y11; M128 >= Y11; M130 >= Y11;
M131 >= Y11;
!PARQUE 12;
M129 <= Y12; M214 <= Y12; M215 <= Y12; M216 <= Y12; M217 <= Y12;
M129 >= Y12; M214 >= Y12; M215 >= Y12; M216 >= Y12; M217 >= Y12;
!PARQUE 13;
M11 <= Y13; M12 <= Y13; M13 <= Y13; M14 <= Y13; M15 <= Y13; M16 <= Y13; M17 <= Y13;
M11 >= Y13; M12 >= Y13; M13 >= Y13; M14 >= Y13; M15 >= Y13; M16 >= Y13; M17 >= Y13;
!PARQUE 14;
M29 <= Y14; M30 <= Y14; M31 <= Y14; M32 <= Y14; M33 <= Y14; M34 <= Y14; M35 <= Y14; M36 <=
Y14; M72 <= Y14;
M29 >= Y14; M30 >= Y14; M31 >= Y14; M32 >= Y14; M33 >= Y14; M34 >= Y14; M35 >= Y14; M36 >=
Y14; M72 >= Y14;
!PARQUE 15;
M74 <= Y15; M75 <= Y15; M76 <= Y15; M77 <= Y15; M79 <= Y15; M80 <= Y15; M81 <= Y15; M85 <=
Y15;
M74 >= Y15; M75 >= Y15; M76 >= Y15; M77 >= Y15; M79 >= Y15; M80 >= Y15; M81 >= Y15; M85 >=
Y15;
!PARQUE 16;
M177 <= Y16; M178 <= Y16; M179 <= Y16; M180 <= Y16; M181 <= Y16; M182 <= Y16; M183 <= Y16;
M184 <= Y16; M185 <= Y16; M186 <= Y16; M187 <= Y16; M188 <= Y16;
M189 <= Y16; M190 <= Y16; M191 <= Y16; M192 <= Y16; M193 <= Y16; M194 <= Y16; M195 <= Y16;
M196 <= Y16; M197 <= Y16; M198 <= Y16; M199 <= Y16; M200 <= Y16;
M201 <= Y16; M202 <= Y16;
M177 >= Y16; M178 >= Y16; M179 >= Y16; M180 >= Y16; M181 >= Y16; M182 >= Y16; M183 >= Y16;
M184 >= Y16; M185 >= Y16; M186 >= Y16; M187 >= Y16; M188 >= Y16;
M189 >= Y16; M190 >= Y16; M191 >= Y16; M192 >= Y16; M193 >= Y16; M194 >= Y16; M195 >= Y16;
M196 >= Y16; M197 >= Y16; M198 >= Y16; M199 >= Y16; M200 >= Y16;
M201 >= Y16; M202 >= Y16;
!PARQUE 17;
M142 <= Y17; M143 <= Y17; M146 <= Y17; M147 <= Y17; M148 <= Y17; M149 <= Y17; M150 <= Y17;
M205 <= Y17; M206 <= Y17; M207 <= Y17; M208 <= Y17; M209 <= Y17;
M142 >= Y17; M143 >= Y17; M146 >= Y17; M147 >= Y17; M148 >= Y17; M149 >= Y17; M150 >= Y17;
M205 >= Y17; M206 >= Y17; M207 >= Y17; M208 >= Y17; M209 >= Y17;
!PARQUE 18;

```



```

M99 <= Y18; M122 <= Y18; M123 <= Y18; M124 <= Y18; M125 <= Y18;
M99 >= Y18; M122 >= Y18; M123 >= Y18; M124 >= Y18; M125 >= Y18;
'PARQUE 19;
M152 <= Y19; M153 <= Y19; M154 <= Y19; M155 <= Y19; M156 <= Y19; M157 <= Y19; M158 <= Y19;
M159 <= Y19; M160 <= Y19; M161 <= Y19; M162 <= Y19; M163 <= Y19;
M164 <= Y19; M165 <= Y19; M210 <= Y19; M211 <= Y19; M212 <= Y19; M213 <= Y19;
M152 >= Y19; M153 >= Y19; M154 >= Y19; M155 >= Y19; M156 >= Y19; M157 >= Y19; M158 >= Y19;
M159 >= Y19; M160 >= Y19; M161 >= Y19; M162 >= Y19; M163 >= Y19;
M164 >= Y19; M165 >= Y19; M210 >= Y19; M211 >= Y19; M212 >= Y19; M213 >= Y19;

'Restricciones de área mínima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

'Restricciones de área máxima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

'Restricciones de tamaño de parque;
X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6
>= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100;
X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <=
10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

M1 <= 1; M2 <= 1; M3 <= 1; M4 <= 1; M5 <= 1; M6 <= 1; M7 <= 1; M8
<= 1; M9 <= 1; M10 <= 1; M11 <= 1; M12 <= 1; M13 <= 1;
M14 <= 1; M15 <= 1; M16 <= 1; M17 <= 1; M18 <= 1; M19 <= 1; M20 <= 1; M21
<= 1; M22 <= 1; M23 <= 1; M24 <= 1; M25 <= 1; M26 <= 1;
M27 <= 1; M28 <= 1; M29 <= 1; M30 <= 1; M31 <= 1; M32 <= 1; M33 <= 1; M34
<= 1; M35 <= 1; M36 <= 1; M37 <= 1; M38 <= 1; M39 <= 1;
M40 <= 1; M41 <= 1; M42 <= 1; M43 <= 1; M44 <= 1; M45 <= 1; M46 <= 1; M47
<= 1; M48 <= 1; M49 <= 1; M50 <= 1; M51 <= 1; M52 <= 1;
M53 <= 1; M54 <= 1; M55 <= 1; M56 <= 1; M57 <= 1; M58 <= 1; M59 <= 1; M60
<= 1; M61 <= 1; M62 <= 1; M63 <= 1; M64 <= 1; M65 <= 1;
M66 <= 1; M67 <= 1; M68 <= 1; M69 <= 1; M70 <= 1; M71 <= 1; M72 <= 1; M73
<= 1; M74 <= 1; M75 <= 1; M76 <= 1; M77 <= 1; M78 <= 1;
M79 <= 1; M80 <= 1; M81 <= 1; M82 <= 1; M83 <= 1; M84 <= 1; M85 <= 1; M86
<= 1; M87 <= 1; M88 <= 1; M89 <= 1; M90 <= 1; M91 <= 1;
M92 <= 1; M93 <= 1; M94 <= 1; M95 <= 1; M96 <= 1; M97 <= 1; M98 <= 1; M99
<= 1; M100 <= 1; M101 <= 1; M102 <= 1; M103 <= 1; M104 <= 1;
M105 <= 1; M106 <= 1; M107 <= 1; M108 <= 1; M109 <= 1; M110 <= 1; M111 <= 1; M112
<= 1; M113 <= 1; M114 <= 1; M115 <= 1; M116 <= 1; M117 <= 1;
M118 <= 1; M119 <= 1; M120 <= 1; M121 <= 1; M122 <= 1; M123 <= 1; M124 <= 1; M125
<= 1; M126 <= 1; M127 <= 1; M128 <= 1; M129 <= 1; M130 <= 1;
M131 <= 1; M132 <= 1; M133 <= 1; M134 <= 1; M135 <= 1; M136 <= 1; M137 <= 1; M138
<= 1; M139 <= 1; M140 <= 1; M141 <= 1; M142 <= 1; M143 <= 1;
M144 <= 1; M145 <= 1; M146 <= 1; M147 <= 1; M148 <= 1; M149 <= 1; M150 <= 1; M151
<= 1; M152 <= 1; M153 <= 1; M154 <= 1; M155 <= 1; M156 <= 1;
M157 <= 1; M158 <= 1; M159 <= 1; M160 <= 1; M161 <= 1; M162 <= 1; M163 <= 1; M164
<= 1; M165 <= 1; M166 <= 1; M167 <= 1; M168 <= 1; M169 <= 1;
M170 <= 1; M171 <= 1; M172 <= 1; M173 <= 1; M174 <= 1; M175 <= 1; M176 <= 1; M177
<= 1; M178 <= 1; M179 <= 1; M180 <= 1; M181 <= 1; M182 <= 1;
M183 <= 1; M184 <= 1; M185 <= 1; M186 <= 1; M187 <= 1; M188 <= 1; M189 <= 1; M190
<= 1; M191 <= 1; M192 <= 1; M193 <= 1; M194 <= 1; M195 <= 1;
M196 <= 1; M197 <= 1; M198 <= 1; M199 <= 1; M200 <= 1; M201 <= 1; M202 <= 1; M203
<= 1; M204 <= 1; M205 <= 1; M206 <= 1; M207 <= 1; M208 <= 1;
M209 <= 1; M210 <= 1; M211 <= 1; M212 <= 1; M213 <= 1; M214 <= 1; M215 <= 1; M216
<= 1; M217 <= 1; M218 <= 1; M219 <= 1; M220 <= 1; M221 <= 1;
M222 <= 1; M223 <= 1; M224 <= 1; M225 <= 1; M226 <= 1; M227 <= 1; M228 <= 1; M229
<= 1; M230 <= 1; M231 <= 1; M232 <= 1; M233 <= 1; M234 <= 1;
M235 <= 1; M236 <= 1; M237 <= 1; M238 <= 1; M239 <= 1; M240 <= 1; M241 <= 1; M242
<= 1; M243 <= 1; M244 <= 1; M245 <= 1; M246 <= 1; M247 <= 1;
M248 <= 1; M249 <= 1; M250 <= 1; M251 <= 1; M252 <= 1;

```

```

!MÉTODO LEXICOGRAFICO: OBJETIVO 1-3;

MIN = N3;

!FUNCIÓN OBJETIVO 1;
M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7 + M8 + M9 + M10 + M11 + M12 + M13 + M14 + M15 + M16 + M17
+ M18 + M19 + M20 + M21 + M22 + M23 + M24 + M25 + M26 +
M27 + M28 + M29 + M30 + M31 + M32 + M33 + M34 + M35 + M36 + M37 + M38 + M39 + M40 + M41 +
M42 + M43 + M44 + M45 + M46 + M47 + M48 + M49 + M50 + M51 + M52 +
M53 + M54 + M55 + M56 + M57 + M58 + M59 + M60 + M61 + M62 + M63 + M64 + M65 + M66 + M67 +
M68 + M69 + M70 + M71 + M72 + M73 + M74 + M75 + M76 + M77 + M78 +
M79 + M80 + M81 + M82 + M83 + M84 + M85 + M86 + M87 + M88 + M89 + M90 + M91 + M92 + M93 +
M94 + M95 + M96 + M97 + M98 + M99 + M100 + M101 + M102 + M103 +
M104 + M105 + M106 + M107 + M108 + M109 + M110 + M111 + M112 + M113 + M114 + M115 + M116 +
M117 + M118 + M119 + M120 + M121 + M122 + M123 + M124 + M125 +
M126 + M127 + M128 + M129 + M130 + M131 + M132 + M133 + M134 + M135 + M136 + M137 + M138 +
M139 + M140 + M141 + M142 + M143 + M144 + M145 + M146 + M147 +
M148 + M149 + M150 + M151 + M152 + M153 + M154 + M155 + M156 + M157 + M158 + M159 + M160 +
M161 + M162 + M163 + M164 + M165 + M166 + M167 + M168 + M169 +
M170 + M171 + M172 + M173 + M174 + M175 + M176 + M177 + M178 + M179 + M180 + M181 + M182 +
M183 + M184 + M185 + M186 + M187 + M188 + M189 + M190 + M191 +
M192 + M193 + M194 + M195 + M196 + M197 + M198 + M199 + M200 + M201 + M202 + M203 + M204 +
M205 + M206 + M207 + M208 + M209 + M210 + M211 + M212 + M213 +
M214 + M215 + M216 + M217 + M218 + M219 + M220 + M221 + M222 + M223 + M224 + M225 + M226 +
M227 + M228 + M229 + M230 + M231 + M232 + M233 + M234 + M235 +
M236 + M237 + M238 + M239 + M240 + M241 + M242 + M243 + N1 - P1 = 218.7;

!FUNCIÓN OBJETIVO 2;
1003*Y1 + 87*Y2 + 2541*Y3 + 1694*Y4 + 3193*Y5 + 4570*Y6 + 10483*Y7 + 10574*Y8 + 5062*Y9 +
1744*Y10 + 3092*Y11 + 515*Y12
+ 981*Y13 + 5237*Y14 + 3661*Y15 + 3825*Y16 + 3374*Y17 + 2300*Y18 + 2747*Y19 + N2 -
P2 = 60014.7;

!FUNCIÓN OBJETIVO 3;
0.01757899129*Y1 + 0.02333432215*Y2 + 0.02471231706*Y3 + 0.02034681169*Y4 + 0.02001475363
*Y5 + 0.02322130061*Y6
+ 0.02087521294*Y7 + 0.02318575421*Y8 + 0.02208173828*Y9 + 0.01875102704*Y10 +
0.02286539512*Y11 + 0.01879793968*Y12
+ 0.02634205140*Y13 + 0.01666540141*Y14 + 0.01750087932*Y15 + 0.03038463992*Y16 +
0.02438145621*Y17
+ 0.01944155323*Y18 + 0.02072508585*Y19 + N3 - P3 = 0.37008594;

!Restricciones de manzanas;
!PARQUE 1;
M92 <= Y1; M93 <= Y1; M94 <= Y1; M96 <= Y1; M97 <= Y1; M98 <= Y1;
M92 >= Y1; M93 >= Y1; M94 >= Y1; M96 >= Y1; M97 >= Y1; M98 >= Y1;
!PARQUE 2;
M95 <= Y2; M95 >= Y2;
!PARQUE 3;
M126 <= Y3; M132 <= Y3; M133 <= Y3; M134 <= Y3; M135 <= Y3; M136 <= Y3; M137 <= Y3; M138
<= Y3; M139 <= Y3; M140 <= Y3 + Y17; M141 <= Y3 + Y17; M144 <= Y3;
M145 <= Y3 + Y17; M151 <= Y3; M203 <= Y3; M204 <= Y3;
M126 >= Y3; M132 >= Y3; M133 >= Y3; M134 >= Y3; M135 >= Y3; M136 >= Y3; M137 >= Y3; M138 >
= Y3; M139 >= Y3; 2*M140 >= Y3 + Y17; 2*M141 >= Y3 + Y17;
M144 >= Y3; 2*M145 >= Y3 + Y17; M151 >= Y3; M212 >= Y3; M204 >= Y3;
!PARQUE 4;
M78 <= Y4; M82 <= Y4; M83 <= Y4; M84 <= Y4; M86 <= Y4; M87 <= Y4; M88 <= Y4; M89 <= Y4;
M90 <= Y4; M91 <= Y4;
M78 >= Y4; M82 >= Y4; M83 >= Y4; M84 >= Y4; M86 >= Y4; M87 >= Y4; M88 >= Y4; M89 >= Y4;
M90 >= Y4; M91 >= Y4;
!PARQUE 5;
M166 <= Y5; M167 <= Y5; M168 <= Y5; M169 <= Y5; M170 <= Y5; M171 <= Y5; M172 <= Y5; M173
<= Y5; M174 <= Y5; M175 <= Y5; M176 <= Y5;
M166 >= Y5; M167 >= Y5; M168 >= Y5; M169 >= Y5; M170 >= Y5; M171 >= Y5; M172 >= Y5; M173 >
= Y5; M174 >= Y5; M175 >= Y5; M176 >= Y5;
!PARQUE 6;

```

```
M110 <= Y6 + Y11; M114 <= Y6; M115 <= Y6; M116 <= Y6; M117 <= Y6 + Y11; M118 <= Y6 + Y11;
M218 <= Y6; M219 <= Y6; M220 <= Y6; M221 <= Y6; M222 <= Y6;
M223 <= Y6; M224 <= Y6; M225 <= Y6; M226 <= Y6; M227 <= Y6; M228 <= Y6; M229 <= Y6; M230
<= Y6; M231 <= Y6; M232 <= Y6; M233 <= Y6 + Y11; M234 <= Y6;
M235 <= Y6; M236 <= Y6; M237 <= Y6 + Y11; M238 <= Y6 + Y11; M239 <= Y6 + Y11; M240 <= Y6;
M241 <= Y6; M242 <= Y6 + Y11; M243 <= Y6 + Y11;
2*M110 >= Y6 + Y11; M114 >= Y6; M115 >= Y6; M116 >= Y6; 2*M117 >= Y6 + Y11; 2*M118 >= Y6 +
Y11; M218 >= Y6; M219 >= Y6; M220 >= Y6; M221 >= Y6; M222 >= Y6;
M223 >= Y6; M224 >= Y6; M225 >= Y6; M226 >= Y6; M227 >= Y6; M228 >= Y6; M229 >= Y6; M230 >
= Y6; M231 >= Y6; M232 >= Y6; 2*M233 >= Y6 + Y11; M234 >= Y6;
M235 >= Y6; M236 >= Y6; 2*M237 >= Y6 + Y11; 2*M238 >= Y6 + Y11; 2*M239 >= Y6 + Y11; M240 >
= Y6; M241 >= Y6; 2*M242 >= Y6 + Y11; 2*M243 >= Y6 + Y11;
!PARQUE 7;
M37 <= Y7; M38 <= Y7; M39 <= Y7; M40 <= Y7; M41 <= Y7; M42 <= Y7; M43 <= Y7; M48 <= Y7;
M49 <= Y7; M50 <= Y7; M51 <= Y7; M57 <= Y7; M58 <= Y7; M59 <= Y7;
M60 <= Y7; M61 <= Y7; M62 <= Y7;
M37 >= Y7; M38 >= Y7; M39 >= Y7; M40 >= Y7; M41 >= Y7; M42 >= Y7; M43 >= Y7; M48 >= Y7;
M49 >= Y7; M50 >= Y7; M51 >= Y7; M57 >= Y7; M58 >= Y7; M59 >= Y7;
M60 >= Y7; M61 >= Y7; M62 >= Y7;
!PARQUE 8;
M44 <= Y8; M45 <= Y8; M46 <= Y8; M47 <= Y8; M52 <= Y8; M53 <= Y8; M54 <= Y8; M55 <= Y8;
M56 <= Y8; M63 <= Y8; M64 <= Y8; M65 <= Y8; M66 <= Y8; M67 <= Y8;
M68 <= Y8; M69 <= Y8; M70 <= Y8; M71 <= Y8; M73 >= Y8;
M447 >= Y8; M45 >= Y8; M46 >= Y8; M47 >= Y8; M52 >= Y8; M53 >= Y8; M54 >= Y8; M55 >= Y8;
M56 >= Y8; M63 >= Y8; M64 >= Y8; M65 >= Y8; M66 >= Y8; M67 >= Y8;
M68 >= Y8; M69 >= Y8; M70 >= Y8; M71 >= Y8; M73 >= Y8;
!PARQUE 9;
M1 <= Y9; M2 <= Y9; M3 <= Y9; M4 <= Y9; M5 <= Y9; M6 <= Y9; M7 <= Y9; M8 <= Y9; M9 <= Y9;
M10 <= Y9; M18 <= Y9; M19 <= Y9; M20 <= Y9; M21 <= Y9; M22 <= Y9;
M23 <= Y9; M24 <= Y9; M25 <= Y9; M26 <= Y9; M27 <= Y9; M28 <= Y9;
M1 >= Y9; M2 >= Y9; M3 >= Y9; M4 >= Y9; M5 >= Y9; M6 >= Y9; M7 >= Y9; M8 >= Y9; M9 >= Y9;
M10 >= Y9; M18 >= Y9; M19 >= Y9; M20 >= Y9; M21 >= Y9; M22 >= Y9;
M23 >= Y9; M24 >= Y9; M25 >= Y9; M26 >= Y9; M27 >= Y9; M28 >= Y9;
!PARQUE 10;
M100 <= Y10; M101 <= Y10; M102 <= Y10; M103 <= Y10; M104 <= Y10; M105 <= Y10; M106 <= Y10;
M107 <= Y10; M108 <= Y10; M109 <= Y10; M112 <= Y10; M113 <= Y10;
M100 >= Y10; M101 >= Y10; M102 >= Y10; M103 >= Y10; M104 >= Y10; M105 >= Y10; M106 >= Y10;
M107 >= Y10; M108 >= Y10; M109 >= Y10; M112 >= Y10; M113 >= Y10;
!PARQUE 11;
M111 <= Y11; M119 <= Y11; M120 <= Y11; M121 <= Y11; M127 <= Y11; M128 <= Y11; M130 <= Y11;
M131 <= Y11;
M111 >= Y11; M119 >= Y11; M120 >= Y11; M121 >= Y11; M127 >= Y11; M128 >= Y11; M130 >= Y11;
M131 >= Y11;
!PARQUE 12;
M129 <= Y12; M214 <= Y12; M215 <= Y12; M216 <= Y12; M217 <= Y12;
M129 >= Y12; M214 >= Y12; M215 >= Y12; M216 >= Y12; M217 >= Y12;
!PARQUE 13;
M11 <= Y13; M12 <= Y13; M13 <= Y13; M14 <= Y13; M15 <= Y13; M16 <= Y13; M17 <= Y13;
M11 >= Y13; M12 >= Y13; M13 >= Y13; M14 >= Y13; M15 >= Y13; M16 >= Y13; M17 >= Y13;
!PARQUE 14;
M29 <= Y14; M30 <= Y14; M31 <= Y14; M32 <= Y14; M33 <= Y14; M34 <= Y14; M35 <= Y14; M36 <=
Y14; M72 <= Y14;
M29 >= Y14; M30 >= Y14; M31 >= Y14; M32 >= Y14; M33 >= Y14; M34 >= Y14; M35 >= Y14; M36 >=
Y14; M72 >= Y14;
!PARQUE 15;
M74 <= Y15; M75 <= Y15; M76 <= Y15; M77 <= Y15; M79 <= Y15; M80 <= Y15; M81 <= Y15; M85 <=
Y15;
M74 >= Y15; M75 >= Y15; M76 >= Y15; M77 >= Y15; M79 >= Y15; M80 >= Y15; M81 >= Y15; M85 >=
Y15;
!PARQUE 16;
M177 <= Y16; M178 <= Y16; M179 <= Y16; M180 <= Y16; M181 <= Y16; M182 <= Y16; M183 <= Y16;
M184 <= Y16; M185 <= Y16; M186 <= Y16; M187 <= Y16; M188 <= Y16;
M189 <= Y16; M190 <= Y16; M191 <= Y16; M192 <= Y16; M193 <= Y16; M194 <= Y16; M195 <= Y16;
M196 <= Y16; M197 <= Y16; M198 <= Y16; M199 <= Y16; M200 <= Y16;
M201 <= Y16; M202 <= Y16;
M177 >= Y16; M178 >= Y16; M179 >= Y16; M180 >= Y16; M181 >= Y16; M182 >= Y16; M183 >= Y16;
M184 >= Y16; M185 >= Y16; M186 >= Y16; M187 >= Y16; M188 >= Y16;
```

```

M189 >= Y16; M190 >= Y16; M191 >= Y16; M192 >= Y16; M193 >= Y16; M194 >= Y16; M195 >= Y16;
M196 >= Y16; M197 >= Y16; M198 >= Y16; M199 >= Y16; M200 >= Y16;
M201 >= Y16; M202 >= Y16;
'PARQUE 17;
M142 <= Y17; M143 <= Y17; M146 <= Y17; M147 <= Y17; M148 <= Y17; M149 <= Y17; M150 <= Y17;
M205 <= Y17; M206 <= Y17; M207 <= Y17; M208 <= Y17; M209 <= Y17;
M142 >= Y17; M143 >= Y17; M146 >= Y17; M147 >= Y17; M148 >= Y17; M149 >= Y17; M150 >= Y17;
M205 >= Y17; M206 >= Y17; M207 >= Y17; M208 >= Y17; M209 >= Y17;
'PARQUE 18;
M99 <= Y18; M122 <= Y18; M123 <= Y18; M124 <= Y18; M125 <= Y18;
M99 >= Y18; M122 >= Y18; M123 >= Y18; M124 >= Y18; M125 >= Y18;
'PARQUE 19;
M152 <= Y19; M153 <= Y19; M154 <= Y19; M155 <= Y19; M156 <= Y19; M157 <= Y19; M158 <= Y19;
M159 <= Y19; M160 <= Y19; M161 <= Y19; M162 <= Y19; M163 <= Y19;
M164 <= Y19; M165 <= Y19; M210 <= Y19; M211 <= Y19; M212 <= Y19; M213 <= Y19;
M152 >= Y19; M153 >= Y19; M154 >= Y19; M155 >= Y19; M156 >= Y19; M157 >= Y19; M158 >= Y19;
M159 >= Y19; M160 >= Y19; M161 >= Y19; M162 >= Y19; M163 >= Y19;
M164 >= Y19; M165 >= Y19; M210 >= Y19; M211 >= Y19; M212 >= Y19; M213 >= Y19;

'Restricciones de área mínima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

'Restricciones de área máxima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

'Restricciones de tamaño de parque;
X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6
>= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100;
X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <=
10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

M1 <= 1; M2 <= 1; M3 <= 1; M4 <= 1; M5 <= 1; M6 <= 1; M7 <= 1; M8
<= 1; M9 <= 1; M10 <= 1; M11 <= 1; M12 <= 1; M13 <= 1;
M14 <= 1; M15 <= 1; M16 <= 1; M17 <= 1; M18 <= 1; M19 <= 1; M20 <= 1; M21
<= 1; M22 <= 1; M23 <= 1; M24 <= 1; M25 <= 1; M26 <= 1;
M27 <= 1; M28 <= 1; M29 <= 1; M30 <= 1; M31 <= 1; M32 <= 1; M33 <= 1; M34
<= 1; M35 <= 1; M36 <= 1; M37 <= 1; M38 <= 1; M39 <= 1;
M40 <= 1; M41 <= 1; M42 <= 1; M43 <= 1; M44 <= 1; M45 <= 1; M46 <= 1; M47
<= 1; M48 <= 1; M49 <= 1; M50 <= 1; M51 <= 1; M52 <= 1;
M53 <= 1; M54 <= 1; M55 <= 1; M56 <= 1; M57 <= 1; M58 <= 1; M59 <= 1; M60
<= 1; M61 <= 1; M62 <= 1; M63 <= 1; M64 <= 1; M65 <= 1;
M66 <= 1; M67 <= 1; M68 <= 1; M69 <= 1; M70 <= 1; M71 <= 1; M72 <= 1; M73
<= 1; M74 <= 1; M75 <= 1; M76 <= 1; M77 <= 1; M78 <= 1;
M79 <= 1; M80 <= 1; M81 <= 1; M82 <= 1; M83 <= 1; M84 <= 1; M85 <= 1; M86
<= 1; M87 <= 1; M88 <= 1; M89 <= 1; M90 <= 1; M91 <= 1;
M92 <= 1; M93 <= 1; M94 <= 1; M95 <= 1; M96 <= 1; M97 <= 1; M98 <= 1; M99
<= 1; M100 <= 1; M101 <= 1; M102 <= 1; M103 <= 1; M104 <= 1;
M105 <= 1; M106 <= 1; M107 <= 1; M108 <= 1; M109 <= 1; M110 <= 1; M111 <= 1; M112
<= 1; M113 <= 1; M114 <= 1; M115 <= 1; M116 <= 1; M117 <= 1;
M118 <= 1; M119 <= 1; M120 <= 1; M121 <= 1; M122 <= 1; M123 <= 1; M124 <= 1; M125
<= 1; M126 <= 1; M127 <= 1; M128 <= 1; M129 <= 1; M130 <= 1;
M131 <= 1; M132 <= 1; M133 <= 1; M134 <= 1; M135 <= 1; M136 <= 1; M137 <= 1; M138
<= 1; M139 <= 1; M140 <= 1; M141 <= 1; M142 <= 1; M143 <= 1;
M144 <= 1; M145 <= 1; M146 <= 1; M147 <= 1; M148 <= 1; M149 <= 1; M150 <= 1; M151
<= 1; M152 <= 1; M153 <= 1; M154 <= 1; M155 <= 1; M156 <= 1;
M157 <= 1; M158 <= 1; M159 <= 1; M160 <= 1; M161 <= 1; M162 <= 1; M163 <= 1; M164
<= 1; M165 <= 1; M166 <= 1; M167 <= 1; M168 <= 1; M169 <= 1;
M170 <= 1; M171 <= 1; M172 <= 1; M173 <= 1; M174 <= 1; M175 <= 1; M176 <= 1; M177
<= 1; M178 <= 1; M179 <= 1; M180 <= 1; M181 <= 1; M182 <= 1;
M183 <= 1; M184 <= 1; M185 <= 1; M186 <= 1; M187 <= 1; M188 <= 1; M189 <= 1; M190
<= 1; M191 <= 1; M192 <= 1; M193 <= 1; M194 <= 1; M195 <= 1;
M196 <= 1; M197 <= 1; M198 <= 1; M199 <= 1; M200 <= 1; M201 <= 1; M202 <= 1; M203

```

```
<= 1; M204<= 1; M205<= 1; M206<= 1; M207<= 1; M208<= 1;
M209 <= 1; M210<= 1; M211<= 1; M212<= 1; M213<= 1; M214<= 1; M215<= 1; M216
<= 1; M217<= 1; M218<= 1; M219<= 1; M220<= 1; M221<= 1;
M222 <= 1; M223<= 1; M224<= 1; M225<= 1; M226<= 1; M227<= 1; M228<= 1; M229
<= 1; M230<= 1; M231<= 1; M232<= 1; M233<= 1; M234<= 1;
M235 <= 1; M236<= 1; M237<= 1; M238<= 1; M239<= 1; M240<= 1; M241<= 1; M242
<= 1; M243<= 1; M244<= 1; M245<= 1; M246<= 1; M247<= 1;
M248 <= 1; M249<= 1; M250<= 1; M251<= 1; M252<= 1;
```

```
@BIN(Y1); @BIN(Y2); @BIN(Y3); @BIN(Y4); @BIN(Y5); @BIN(Y6); @BIN(Y7);@BIN(Y8); @BIN(Y9);
@BIN(Y10); @BIN(Y11); @BIN(Y12); @BIN(Y13); @BIN(Y14); @BIN(Y15);
@BIN(Y16); @BIN(Y17); @BIN(Y18); @BIN(Y19);
```

```
@BIN(M110); @BIN(M117); @BIN(M118); @BIN(M140); @BIN(M141); @BIN(M145);@BIN(M233); @BIN
(M237); @BIN(M110);@BIN(M238); @BIN(M239); @BIN(M242); @BIN(M243);
```

!MÉTODO LEXICOGRAFICO: OBJETIVO 1-4;

MIN = P4;

!FUNCIÓN OBJETIVO 1;

M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7 + M8 + M9 + M10 + M11 + M12 + M13 + M14 + M15 + M16 + M17 + M18 + M19 + M20 + M21 + M22 + M23 + M24 + M25 + M26 + M27 + M28 + M29 + M30 + M31 + M32 + M33 + M34 + M35 + M36 + M37 + M38 + M39 + M40 + M41 + M42 + M43 + M44 + M45 + M46 + M47 + M48 + M49 + M50 + M51 + M52 + M53 + M54 + M55 + M56 + M57 + M58 + M59 + M60 + M61 + M62 + M63 + M64 + M65 + M66 + M67 + M68 + M69 + M70 + M71 + M72 + M73 + M74 + M75 + M76 + M77 + M78 + M79 + M80 + M81 + M82 + M83 + M84 + M85 + M86 + M87 + M88 + M89 + M90 + M91 + M92 + M93 + M94 + M95 + M96 + M97 + M98 + M99 + M100 + M101 + M102 + M103 + M104 + M105 + M106 + M107 + M108 + M109 + M110 + M111 + M112 + M113 + M114 + M115 + M116 + M117 + M118 + M119 + M120 + M121 + M122 + M123 + M124 + M125 + M126 + M127 + M128 + M129 + M130 + M131 + M132 + M133 + M134 + M135 + M136 + M137 + M138 + M139 + M140 + M141 + M142 + M143 + M144 + M145 + M146 + M147 + M148 + M149 + M150 + M151 + M152 + M153 + M154 + M155 + M156 + M157 + M158 + M159 + M160 + M161 + M162 + M163 + M164 + M165 + M166 + M167 + M168 + M169 + M170 + M171 + M172 + M173 + M174 + M175 + M176 + M177 + M178 + M179 + M180 + M181 + M182 + M183 + M184 + M185 + M186 + M187 + M188 + M189 + M190 + M191 + M192 + M193 + M194 + M195 + M196 + M197 + M198 + M199 + M200 + M201 + M202 + M203 + M204 + M205 + M206 + M207 + M208 + M209 + M210 + M211 + M212 + M213 + M214 + M215 + M216 + M217 + M218 + M219 + M220 + M221 + M222 + M223 + M224 + M225 + M226 + M227 + M228 + M229 + M230 + M231 + M232 + M233 + M234 + M235 + M236 + M237 + M238 + M239 + M240 + M241 + M242 + M243 + N1 - P1 = 218.7;

!FUNCIÓN OBJETIVO 2;

1003*Y1 + 87*Y2 + 2541*Y3 + 1694*Y4 + 3193*Y5 + 4570*Y6 + 10483*Y7 + 10574*Y8 + 5062*Y9 + 1744*Y10 + 3092*Y11 + 515*Y12 + 981*Y13 + 5237*Y14 + 3661*Y15 + 3825*Y16 + 3374*Y17 + 2300*Y18 + 2747*Y19 + N2 - P2 = 60014.7;

!FUNCIÓN OBJETIVO 3;

0.01757899129*Y1 + 0.02333432215*Y2 + 0.02471231706*Y3 + 0.02034681169*Y4 + 0.02001475363*Y5 + 0.02322130061*Y6 + 0.02087521294*Y7 + 0.02318575421*Y8 + 0.02208173828*Y9 + 0.01875102704*Y10 + 0.02286539512*Y11 + 0.01879793968*Y12 + 0.02634205140*Y13 + 0.01666540141*Y14 + 0.01750087932*Y15 + 0.03038463992*Y16 + 0.02438145621*Y17 + 0.01944155323*Y18 + 0.02072508585*Y19 + N3 - P3 = 0.37008594;

!FUNCIÓN OBJETIVO 4;

24385.96491*Y1 + 24385.96491*Y2 + 28908.33333*Y3 + 18989.3617*Y4 + 9333.33333*Y5 + 9333.33333*Y6 + 10416.66667*Y7 + 10416.66667*Y8 + 12403.84615*Y9 + 19565.21739*Y10 + 19565.21739*Y11 + 19894.73684*Y12 + 12592.59259*Y13 + 11951.21951*Y14 + 11951.21951*Y15 + 10000*Y16 + 16297.53448*Y17 + 11129.03226*Y18 + 19565.21739*Y19 + N4 - P4 = 26008.695;

!Restricciones de manzanas;

!PARQUE 1;

M92 <= Y1; M93 <= Y1; M94 <= Y1; M96 <= Y1; M97 <= Y1; M98 <= Y1;
M92 >= Y1; M93 >= Y1; M94 >= Y1; M96 >= Y1; M97 >= Y1; M98 >= Y1;

!PARQUE 2;

M95 <= Y2; M95 >= Y2;

!PARQUE 3;

M126 <= Y3; M132 <= Y3; M133 <= Y3; M134 <= Y3; M135 <= Y3; M136 <= Y3; M137 <= Y3; M138 <= Y3; M139 <= Y3; M140 <= Y3 + Y17; M141 <= Y3 + Y17; M144 <= Y3;
M145 <= Y3 + Y17; M151 <= Y3; M203 <= Y3; M204 <= Y3;
M126 >= Y3; M132 >= Y3; M133 >= Y3; M134 >= Y3; M135 >= Y3; M136 >= Y3; M137 >= Y3; M138 >= Y3; M139 >= Y3; 2*M140 >= Y3 + Y17; 2*M141 >= Y3 + Y17;
M144 >= Y3; 2*M145 >= Y3 + Y17; M151 >= Y3; M212 >= Y3; M204 >= Y3;

!PARQUE 4;

M78 <= Y4; M82 <= Y4; M83 <= Y4; M84 <= Y4; M86 <= Y4; M87 <= Y4; M88 <= Y4; M89 <= Y4;
M90 <= Y4; M91 <= Y4;
M78 >= Y4; M82 >= Y4; M83 >= Y4; M84 >= Y4; M86 >= Y4; M87 >= Y4; M88 >= Y4; M89 >= Y4;

```
M90 >= Y4; M91 >= Y4;
!PARQUE 5;
M166 <= Y5; M167 <= Y5; M168 <= Y5; M169 <= Y5; M170 <= Y5; M171 <= Y5; M172 <= Y5; M173
<= Y5; M174 <= Y5; M175 <= Y5; M176 <= Y5;
M166 >= Y5; M167 >= Y5; M168 >= Y5; M169 >= Y5; M170 >= Y5; M171 >= Y5; M172 >= Y5; M173 >
= Y5; M174 >= Y5; M175 >= Y5; M176 >= Y5;
!PARQUE 6;
M110 <= Y6 + Y11; M114 <= Y6; M115 <= Y6; M116 <= Y6; M117 <= Y6 + Y11; M118 <= Y6 + Y11;
M218 <= Y6; M219 <= Y6; M220 <= Y6; M221 <= Y6; M222 <= Y6;
M223 <= Y6; M224 <= Y6; M225 <= Y6; M226 <= Y6; M227 <= Y6; M228 <= Y6; M229 <= Y6; M230
<= Y6; M231 <= Y6; M232 <= Y6; M233 <= Y6 + Y11; M234 <= Y6;
M235 <= Y6; M236 <= Y6; M237 <= Y6 + Y11; M238 <= Y6 + Y11; M239 <= Y6 + Y11; M240 <= Y6;
M241 <= Y6; M242 <= Y6 + Y11; M243 <= Y6 + Y11;
2*M110 >= Y6 + Y11; M114 >= Y6; M115 >= Y6; M116 >= Y6; 2*M117 >= Y6 + Y11; 2*M118 >= Y6 +
Y11; M218 >= Y6; M219 >= Y6; M220 >= Y6; M221 >= Y6; M222 >= Y6;
M223 >= Y6; M224 >= Y6; M225 >= Y6; M226 >= Y6; M227 >= Y6; M228 >= Y6; M229 >= Y6; M230 >
= Y6; M231 >= Y6; M232 >= Y6; 2*M233 >= Y6 + Y11; M234 >= Y6;
M235 >= Y6; M236 >= Y6; 2*M237 >= Y6 + Y11; 2*M238 >= Y6 + Y11; 2*M239 >= Y6 + Y11; M240 >
= Y6; M241 >= Y6; 2*M242 >= Y6 + Y11; 2*M243 >= Y6 + Y11;
!PARQUE 7;
M37 <= Y7; M38 <= Y7; M39 <= Y7; M40 <= Y7; M41 <= Y7; M42 <= Y7; M43 <= Y7; M48 <= Y7;
M49 <= Y7; M50 <= Y7; M51 <= Y7; M57 <= Y7; M58 <= Y7; M59 <= Y7;
M60 <= Y7; M61 <= Y7; M62 <= Y7;
M37 >= Y7; M38 >= Y7; M39 >= Y7; M40 >= Y7; M41 >= Y7; M42 >= Y7; M43 >= Y7; M48 >= Y7;
M49 >= Y7; M50 >= Y7; M51 >= Y7; M57 >= Y7; M58 >= Y7; M59 >= Y7;
M60 >= Y7; M61 >= Y7; M62 >= Y7;
!PARQUE 8;
M44 <= Y8; M45 <= Y8; M46 <= Y8; M47 <= Y8; M52 <= Y8; M53 <= Y8; M54 <= Y8; M55 <= Y8;
M56 <= Y8; M63 <= Y8; M64 <= Y8; M65 <= Y8; M66 <= Y8; M67 <= Y8;
M68 <= Y8; M69 <= Y8; M70 <= Y8; M71 <= Y8; M73 >= Y8;
M447 >= Y8; M45 >= Y8; M46 >= Y8; M47 >= Y8; M52 >= Y8; M53 >= Y8; M54 >= Y8; M55 >= Y8;
M56 >= Y8; M63 >= Y8; M64 >= Y8; M65 >= Y8; M66 >= Y8; M67 >= Y8;
M68 >= Y8; M69 >= Y8; M70 >= Y8; M71 >= Y8; M73 >= Y8;
!PARQUE 9;
M1 <= Y9; M2 <= Y9; M3 <= Y9; M4 <= Y9; M5 <= Y9; M6 <= Y9; M7 <= Y9; M8 <= Y9; M9 <= Y9;
M10 <= Y9; M18 <= Y9; M19 <= Y9; M20 <= Y9; M21 <= Y9; M22 <= Y9;
M23 <= Y9; M24 <= Y9; M25 <= Y9; M26 <= Y9; M27 <= Y9; M28 <= Y9;
M1 >= Y9; M2 >= Y9; M3 >= Y9; M4 >= Y9; M5 >= Y9; M6 >= Y9; M7 >= Y9; M8 >= Y9; M9 >= Y9;
M10 >= Y9; M18 >= Y9; M19 >= Y9; M20 >= Y9; M21 >= Y9; M22 >= Y9;
M23 >= Y9; M24 >= Y9; M25 >= Y9; M26 >= Y9; M27 >= Y9; M28 >= Y9;
!PARQUE 10;
M100 <= Y10; M101 <= Y10; M102 <= Y10; M103 <= Y10; M104 <= Y10; M105 <= Y10; M106 <= Y10;
M107 <= Y10; M108 <= Y10; M109 <= Y10; M112 <= Y10; M113 <= Y10;
M100 >= Y10; M101 >= Y10; M102 >= Y10; M103 >= Y10; M104 >= Y10; M105 >= Y10; M106 >= Y10;
M107 >= Y10; M108 >= Y10; M109 >= Y10; M112 >= Y10; M113 >= Y10;
!PARQUE 11;
M111 <= Y11; M119 <= Y11; M120 <= Y11; M121 <= Y11; M127 <= Y11; M128 <= Y11; M130 <= Y11;
M131 <= Y11;
M111 >= Y11; M119 >= Y11; M120 >= Y11; M121 >= Y11; M127 >= Y11; M128 >= Y11; M130 >= Y11;
M131 >= Y11;
!PARQUE 12;
M129 <= Y12; M214 <= Y12; M215 <= Y12; M216 <= Y12; M217 <= Y12;
M129 >= Y12; M214 >= Y12; M215 >= Y12; M216 >= Y12; M217 >= Y12;
!PARQUE 13;
M11 <= Y13; M12 <= Y13; M13 <= Y13; M14 <= Y13; M15 <= Y13; M16 <= Y13; M17 <= Y13;
M11 >= Y13; M12 >= Y13; M13 >= Y13; M14 >= Y13; M15 >= Y13; M16 >= Y13; M17 >= Y13;
!PARQUE 14;
M29 <= Y14; M30 <= Y14; M31 <= Y14; M32 <= Y14; M33 <= Y14; M34 <= Y14; M35 <= Y14; M36 <=
Y14; M72 <= Y14;
M29 >= Y14; M30 >= Y14; M31 >= Y14; M32 >= Y14; M33 >= Y14; M34 >= Y14; M35 >= Y14; M36 >=
Y14; M72 >= Y14;
!PARQUE 15;
M74 <= Y15; M75 <= Y15; M76 <= Y15; M77 <= Y15; M79 <= Y15; M80 <= Y15; M81 <= Y15; M85 <=
Y15;
M74 >= Y15; M75 >= Y15; M76 >= Y15; M77 >= Y15; M79 >= Y15; M80 >= Y15; M81 >= Y15; M85 >=
Y15;
!PARQUE 16;
```

```

M177 <= Y16; M178 <= Y16; M179 <= Y16; M180 <= Y16; M181 <= Y16; M182 <= Y16; M183 <= Y16;
M184 <= Y16; M185 <= Y16; M186 <= Y16; M187 <= Y16; M188 <= Y16;
M189 <= Y16; M190 <= Y16; M191 <= Y16; M192 <= Y16; M193 <= Y16; M194 <= Y16; M195 <= Y16;
M196 <= Y16; M197 <= Y16; M198 <= Y16; M199 <= Y16; M200 <= Y16;
M201 <= Y16; M202 <= Y16;
M177 >= Y16; M178 >= Y16; M179 >= Y16; M180 >= Y16; M181 >= Y16; M182 >= Y16; M183 >= Y16;
M184 >= Y16; M185 >= Y16; M186 >= Y16; M187 >= Y16; M188 >= Y16;
M189 >= Y16; M190 >= Y16; M191 >= Y16; M192 >= Y16; M193 >= Y16; M194 >= Y16; M195 >= Y16;
M196 >= Y16; M197 >= Y16; M198 >= Y16; M199 >= Y16; M200 >= Y16;
M201 >= Y16; M202 >= Y16;
'PARQUE 17;
M142 <= Y17; M143 <= Y17; M146 <= Y17; M147 <= Y17; M148 <= Y17; M149 <= Y17; M150 <= Y17;
M205 <= Y17; M206 <= Y17; M207 <= Y17; M208 <= Y17; M209 <= Y17;
M142 >= Y17; M143 >= Y17; M146 >= Y17; M147 >= Y17; M148 >= Y17; M149 >= Y17; M150 >= Y17;
M205 >= Y17; M206 >= Y17; M207 >= Y17; M208 >= Y17; M209 >= Y17;
'PARQUE 18;
M99 <= Y18; M122 <= Y18; M123 <= Y18; M124 <= Y18; M125 <= Y18;
M99 >= Y18; M122 >= Y18; M123 >= Y18; M124 >= Y18; M125 >= Y18;
'PARQUE 19;
M152 <= Y19; M153 <= Y19; M154 <= Y19; M155 <= Y19; M156 <= Y19; M157 <= Y19; M158 <= Y19;
M159 <= Y19; M160 <= Y19; M161 <= Y19; M162 <= Y19; M163 <= Y19;
M164 <= Y19; M165 <= Y19; M210 <= Y19; M211 <= Y19; M212 <= Y19; M213 <= Y19;
M152 >= Y19; M153 >= Y19; M154 >= Y19; M155 >= Y19; M156 >= Y19; M157 >= Y19; M158 >= Y19;
M159 >= Y19; M160 >= Y19; M161 >= Y19; M162 >= Y19; M163 >= Y19;
M164 >= Y19; M165 >= Y19; M210 >= Y19; M211 >= Y19; M212 >= Y19; M213 >= Y19;

'Restricciones de área mínima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 >= 28124.1;

'Restricciones de área máxima;
X1 + X2 + X3 + X4 + X5 + X6 + 5380*Y7 + 8148*Y8 + 5500*Y9 + X10 + X11 + X12 + 2961*Y13 +
X14 + 1983*Y15 + X16 + X17 + 1347*Y18 + 930*Y19 <= 224992.8;

'Restricciones de tamaño de parque;
X1 >= 10048*Y1; X2 >= 10048*Y2; X3 >= 10048*Y3; X4 >= 10048*Y4; X5 >= 10048*Y5; X6
>= 10048*Y6; X10 >= 10048*Y10; X11 >= 100;
X1 <= 13060*Y1; X2 <= 10500*Y2; X3 <= 30500*Y3; X4 <= 11264*Y4; X5 <= 11765*Y5; X6 <=
10048*Y6; X10 <= 10256*Y10; X11 <= 21640*Y11;

X12 >= 10048*Y12; X14 >= 10048*Y14; X16 >= 10048*Y16; X17 >= 10048*Y17;
X12 <= 80573*Y12; X14 <= 27046*Y14; X16 <= 14970*Y16; X17 <= 13370*Y17;

M1 <= 1; M2 <= 1; M3 <= 1; M4 <= 1; M5 <= 1; M6 <= 1; M7 <= 1; M8
<= 1; M9 <= 1; M10 <= 1; M11 <= 1; M12 <= 1; M13 <= 1;
M14 <= 1; M15 <= 1; M16 <= 1; M17 <= 1; M18 <= 1; M19 <= 1; M20 <= 1; M21
<= 1; M22 <= 1; M23 <= 1; M24 <= 1; M25 <= 1; M26 <= 1;
M27 <= 1; M28 <= 1; M29 <= 1; M30 <= 1; M31 <= 1; M32 <= 1; M33 <= 1; M34
<= 1; M35 <= 1; M36 <= 1; M37 <= 1; M38 <= 1; M39 <= 1;
M40 <= 1; M41 <= 1; M42 <= 1; M43 <= 1; M44 <= 1; M45 <= 1; M46 <= 1; M47
<= 1; M48 <= 1; M49 <= 1; M50 <= 1; M51 <= 1; M52 <= 1;
M53 <= 1; M54 <= 1; M55 <= 1; M56 <= 1; M57 <= 1; M58 <= 1; M59 <= 1; M60
<= 1; M61 <= 1; M62 <= 1; M63 <= 1; M64 <= 1; M65 <= 1;
M66 <= 1; M67 <= 1; M68 <= 1; M69 <= 1; M70 <= 1; M71 <= 1; M72 <= 1; M73
<= 1; M74 <= 1; M75 <= 1; M76 <= 1; M77 <= 1; M78 <= 1;
M79 <= 1; M80 <= 1; M81 <= 1; M82 <= 1; M83 <= 1; M84 <= 1; M85 <= 1; M86
<= 1; M87 <= 1; M88 <= 1; M89 <= 1; M90 <= 1; M91 <= 1;
M92 <= 1; M93 <= 1; M94 <= 1; M95 <= 1; M96 <= 1; M97 <= 1; M98 <= 1; M99
<= 1; M100 <= 1; M101 <= 1; M102 <= 1; M103 <= 1; M104 <= 1;
M105 <= 1; M106 <= 1; M107 <= 1; M108 <= 1; M109 <= 1; M110 <= 1; M111 <= 1; M112
<= 1; M113 <= 1; M114 <= 1; M115 <= 1; M116 <= 1; M117 <= 1;
M118 <= 1; M119 <= 1; M120 <= 1; M121 <= 1; M122 <= 1; M123 <= 1; M124 <= 1; M125
<= 1; M126 <= 1; M127 <= 1; M128 <= 1; M129 <= 1; M130 <= 1;
M131 <= 1; M132 <= 1; M133 <= 1; M134 <= 1; M135 <= 1; M136 <= 1; M137 <= 1; M138
<= 1; M139 <= 1; M140 <= 1; M141 <= 1; M142 <= 1; M143 <= 1;
M144 <= 1; M145 <= 1; M146 <= 1; M147 <= 1; M148 <= 1; M149 <= 1; M150 <= 1; M151
<= 1; M152 <= 1; M153 <= 1; M154 <= 1; M155 <= 1; M156 <= 1;

```



```
M157 <= 1; M158<= 1; M159<= 1; M160<= 1; M161<= 1; M162<= 1; M163<= 1; M164
<= 1; M165<= 1; M166<= 1; M167<= 1; M168<= 1; M169<= 1;
M170 <= 1; M171<= 1; M172<= 1; M173<= 1; M174<= 1; M175<= 1; M176<= 1; M177
<= 1; M178<= 1; M179<= 1; M180<= 1; M181<= 1; M182<= 1;
M183 <= 1; M184<= 1; M185<= 1; M186<= 1; M187<= 1; M188<= 1; M189<= 1; M190
<= 1; M191<= 1; M192<= 1; M193<= 1; M194<= 1; M195<= 1;
M196 <= 1; M197<= 1; M198<= 1; M199<= 1; M200<= 1; M201<= 1; M202<= 1; M203
<= 1; M204<= 1; M205<= 1; M206<= 1; M207<= 1; M208<= 1;
M209 <= 1; M210<= 1; M211<= 1; M212<= 1; M213<= 1; M214<= 1; M215<= 1; M216
<= 1; M217<= 1; M218<= 1; M219<= 1; M220<= 1; M221<= 1;
M222 <= 1; M223<= 1; M224<= 1; M225<= 1; M226<= 1; M227<= 1; M228<= 1; M229
<= 1; M230<= 1; M231<= 1; M232<= 1; M233<= 1; M234<= 1;
M235 <= 1; M236<= 1; M237<= 1; M238<= 1; M239<= 1; M240<= 1; M241<= 1; M242
<= 1; M243<= 1; M244<= 1; M245<= 1; M246<= 1; M247<= 1;
M248 <= 1; M249<= 1; M250<= 1; M251<= 1; M252<= 1;

@BIN(Y1); @BIN(Y2); @BIN(Y3); @BIN(Y4); @BIN(Y5); @BIN(Y6); @BIN(Y7);@BIN(Y8); @BIN(Y9);
@BIN(Y10); @BIN(Y11); @BIN(Y12); @BIN(Y13); @BIN(Y14); @BIN(Y15);
@BIN(Y16); @BIN(Y17); @BIN(Y18); @BIN(Y19);

@BIN(M110); @BIN(M117); @BIN(M118); @BIN(M140); @BIN(M141); @BIN(M145);@BIN(M233); @BIN
(M237); @BIN(M110);@BIN(M238); @BIN(M239); @BIN(M242); @BIN(M243);
```