

Un modelo matemático para la optimización de las operaciones de mantenimiento de áreas verdes de la ciudad de Guayaquil

Fernando Sandoya^a, Roxana Villalva^b, Jacinto Monserrate^c

^a Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
fsandoya@espol.edu.ec

^b Rocafuerte Seguros S.A., rvillalva@rocafuerte.com

^c Soluciones Ambientales Totales SAMBITO, jmsambito@gmym.com

Resumen. En esta investigación se desarrolla un modelo matemático de optimización del tipo MIP (mixed integer programming) para determinar una mejor solución en el diseño de un Plan de Visitas para la supervisión del mantenimiento integral de las áreas verdes de la ciudad de Guayaquil, que permita un eficiente cumplimiento de las actividades ejecutadas por los contratistas; minimizando los costos de operación y maximizando el uso de los recursos disponibles. Dadas las características del problema, que incluye incertidumbre en algunas variables, se incorporan distribuciones de probabilidad para incluir el patrón de dicha incertidumbre y determinar su influencia en los valores óptimos. Luego se implementa el modelo matemático en un optimizador de propósito general, basado en algoritmos genéticos y se realiza un análisis de los resultados. El modelo fue implementado con éxito en el 2013, constatándose un significativo ahorro.

Palabras clave: Mantenimiento de áreas verdes, modelos matemáticos de optimización, programación matemática.

Abstract. In this research, a mathematical optimization model type MIP (mixed integer programming) is developed to determine a better solution in the design of a plan for monitoring visits for the integral maintenance of green areas of the city of Guayaquil, which allows an efficient performance of the activities performed by contractors, while minimizing operating costs and maximizing the use of available resources. Given the characteristics of the problem, including uncertainty in some variables, probability distributions are incorporated to include the pattern of this uncertainty and determine their influence on the optimal values. Then the mathematical model is implemented in a general purpose optimizer based on genetic algorithms and analysis of the results is performed. This model was successfully implemented in 2013, resulting in significant savings.

Key words: Green areas, mathematical optimization model, mathematical programming.

1 Introducción

El acelerado crecimiento de las zonas urbanas en las principales ciudades de Latinoamérica es sin duda una de las mayores preocupaciones que tienen sus autoridades municipales, las cifras indican que actualmente el 81% de la población vive

en las zonas urbanas y se estima que para el año 2030 la cifra alcance el 86% tal como sucede actualmente en Europa Occidental, según se señala en [1]. Esto traerá implicaciones económicas, políticas y sociales debido a la alta demanda de los recursos y a la capacidad de reacción que puedan tener las ciudades ante problemas que se han vuelto cotidianos tales como el deterioro del medio ambiente, congestión de tráfico, políticas de uso de tierra, disposición de los desechos y la calidad del aire.

Los beneficios de contar con una cantidad suficiente de áreas verdes urbanas son de origen material, ambiental y social; siendo las de origen material: alimentos, madera, especias, forrajes, fibras, medicinas, postes y otros subproductos; por su parte los beneficios sociales y ambientales están ligados a la salud pública, recreación, contaminación del aire, ruido así como el sombreado de superficies respectivamente. Las influencias en el ambiente pueden ir en diferentes escalas considerando la siembra del árbol como unidad o varias unidades sembradas, desde un parque hasta un área metropolitana. La Organización Mundial de la Salud (OMS) propone un estándar entre 9 y 11 m² de áreas verdes por habitante, sin embargo los cálculos para determinar el promedio en m² de área verde son complejos debido a que la distribución de áreas verdes en las ciudades no es homogénea lo cual conlleva a que en algunos sectores de ciudades importantes se sobreestime la cantidad de m² de área verde por habitante.

2 Las áreas verdes y su mantenimiento en la ciudad de Guayaquil

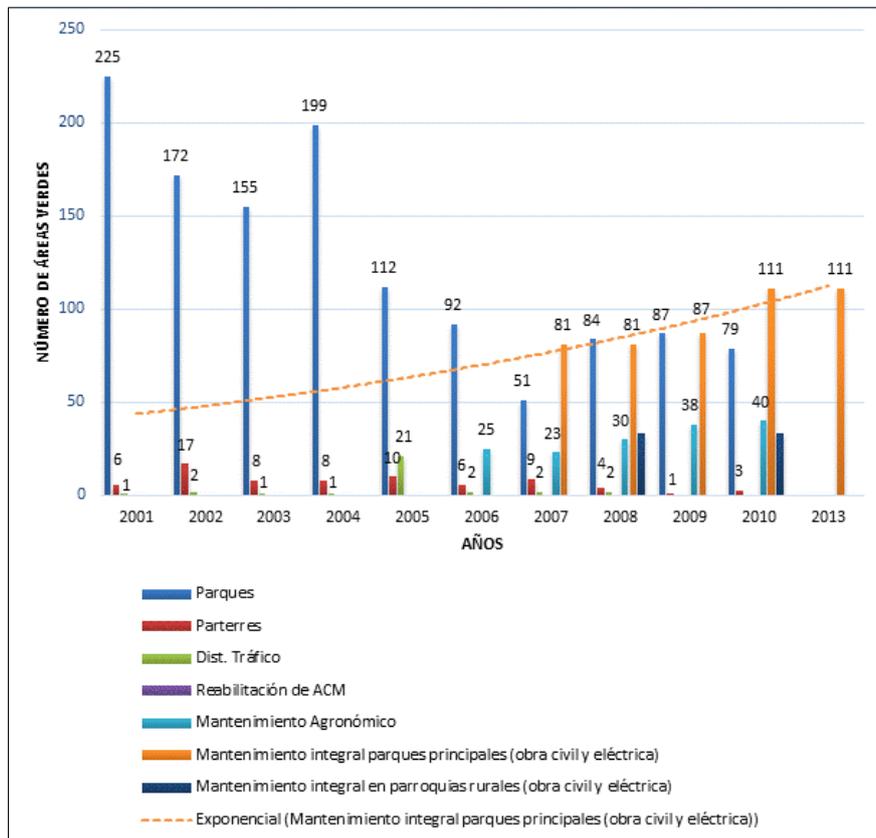
Los procesos de regeneración urbana realizados en los últimos años en la ciudad de Guayaquil comprenden además de los cambios en la obra civil, mejoras en las áreas verdes; y tanto, los trabajos de regeneración, como el mantenimiento de éstos, requieren de un servicio de supervisión eficiente; el cual demanda de la movilización de personal técnico a cada una de las áreas con el fin de verificar el cumplimiento de las actividades planificadas.

Actualmente son diez los contratos de mantenimiento que demandan la supervisión diaria de las actividades, cada uno de estos contratos comprenden en promedio diez áreas verdes (parques, avenidas, distribuidores de tráfico, etc.); sin embargo el diseño actual del plan de visitas requiere de un tratamiento adicional, con el fin de optimizarlo y establecer las rutas a seguir para visitar cada una de las áreas.

En el Gráfico 1 se muestra el número total de las áreas intervenidas en la ciudad de Guayaquil, en donde se resalta las que cuentan con un mantenimiento integral; llámese a esto; áreas que desde el año 2007 (81 áreas verdes) vienen siendo atendidas por contratistas de mantenimiento de áreas verdes, llegando al año 2013 un total de 115 áreas verdes atendidas bajo este sistema.

El incremento en número de áreas verdes atendidas, se complementa con los montos de inversión que la Muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil destina para dicha actividad, en el Gráfico 2 se puede apreciar que hasta el año 2006, los montos de inversión oscilaban aproximadamente en cuatrocientos mil dólares anuales, en promedio, y que, a partir del año 2007, el rubro anual destinado a la rehabilitación de áreas verdes complementarias ascendería a los tres millones de dólares, que representaría el 30% del presupuesto total de la Dirección de Áreas Verdes, según las fuentes consultadas en [3].

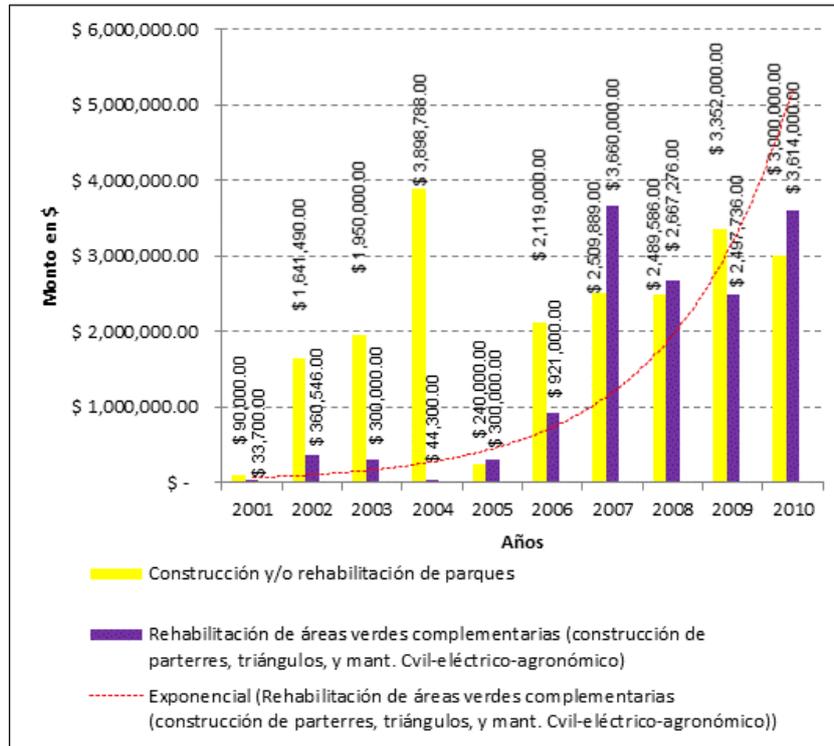
Gráfico 1. Resumen Áreas verdes intervenidas por periodo.



Fuente: Elaborado por la M.I. Municipalidad de Guayaquil.

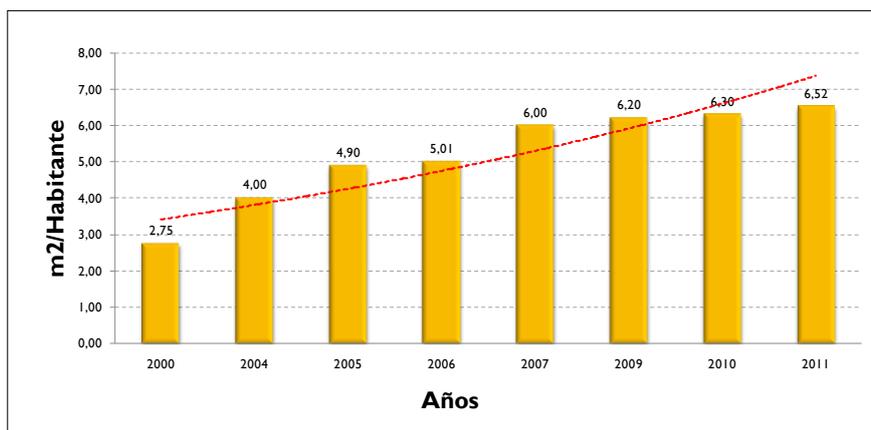
Los esfuerzos de las Autoridades Municipales en este tema, se reflejan en un aumento en la inversión en rehabilitación y mantenimiento de las áreas verdes, desde el año 2000 con 2,75 m² de área verde por habitante, alcanzando al año 2011, los 6,52 m² de densidad de área verde por habitante (davph), tal como se aprecia en el Gráfico 3. Cabe indicar que a la medición hecha en el 2011 de acuerdo a información disponible, se registró (6,52 m²dav/hab), que aún está por debajo de la recomendación dictada por la OMS (9 m²dav/hab).

Gráfico 2. Inversión en áreas verdes.



Fuente: Elaborado por la M.I. Municipalidad de Guayaquil.

Gráfico 3. Promedio área verde por habitante (en metros cuadrados) [3].



Fuente: M.I. Municipalidad de Guayaquil.

El manejo de las áreas verdes urbanas requiere un alto nivel de capacidad institucional para planificar, ejecutar y mantener las áreas verdes de una ciudad. En otras ciudades, como Quito y Cuenca, el mantenimiento de las áreas verdes no requiere una mayor demanda de recursos debido a sus condiciones climáticas, y el mantenimiento de las áreas verdes es realizado en su mayoría por personal municipal, mientras que en ciudades como Santo Domingo, Machala y Guayaquil donde las condiciones climáticas exigen una mayor demanda de recursos, el servicio de mantenimiento es parcialmente tercerizado, es decir realizado mediante contratos públicos de mantenimiento.

La municipalidad de Guayaquil tiene implementado un mecanismo para que una parte del mantenimiento de las áreas verdes de la ciudad se realice a través de contratos de mantenimiento. El proceso de contratación del mantenimiento comprende varias etapas para su consecución, con tiempos determinados por la entidad contratante, entre las cuales están: Preparación de los Términos de Referencia, Publicación del concurso a través del SERCOP, Evaluación y selección de las empresas concursantes y finalmente, la Adjudicación del concurso.

El servicio de mantenimiento de las áreas verdes en Guayaquil es administrado por la Dirección de Áreas Verdes del Municipio, la cual tiene como misión recuperar, rehabilitar y mantener los parques y áreas verdes complementarias del Cantón Guayaquil. Para su atención y mantenimiento, éstas áreas se encuentran agrupadas en 10 contratos distribuidos en toda la ciudad de Guayaquil; lo cual mejora considerablemente el proceso de mantenimiento; sin embargo, paralelo al servicio de mantenimiento se realiza un proceso de supervisión a éstas actividades, las cuales debe ser tan eficiente de forma que permita la verificación diaria de las actividades realizadas por los contratistas de mantenimiento. Para esta investigación se han considerado 52 unidades de áreas verdes, de las cuales se recopilará información relevante que permita modelar la situación real, mediante técnicas de optimización.

3 Características del problema

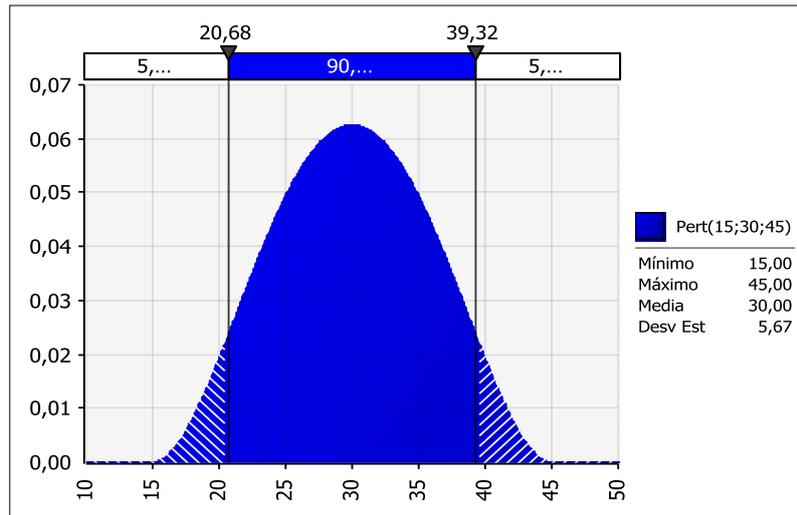
A septiembre de 2013, el municipio cuenta con varios recursos para el proceso de supervisión:

- 4 unidades de vehículos (camionetas doble cabina), que se usan diariamente para el recorrido. Cada vehículo tiene su chofer asignado.
- 10 Supervisores (Ing. Agrónomos y Biólogos).
- 1 Coordinador de Transporte, el cual elabora el plan de visitas semanal.

En un análisis estadístico realizado en esta investigación sobre datos levantados mediante una encuesta a los supervisores, se logró determinar que el tiempo de servicio por cada supervisor para realizar las actividades planificadas en cada una de las áreas a cargo del contratista de mantenimiento integral se ajusta a una distribución de probabilidad Pert. Siendo quince minutos el tiempo mínimo utilizado, treinta minutos el tiempo más probable y cuarenta y cinco minutos el tiempo máximo en realizar sus actividades de supervisión por área, con un intervalo de 90% de confianza entre 21 y

39 minutos para cada servicio de mantenimiento. La distribución de este tiempo de servicio puede apreciarse en el Gráfico 4.

Gráfico 4. Distribución Pert para Tiempos de Servicio.



Fuente: Elaboración Propia

Así, considerando que el turno de trabajo de cada supervisor es de 4 horas diarias. En la situación actual verificaría con mayor frecuencia entre 1 a 2 áreas, y en muy pocos casos hasta 3 áreas, tal como se aprecia en la Tabla 1. Además notamos que en tres días de la semana, se concentra la mayor cantidad de áreas visitadas, esto es, un 73% del total de áreas. Los días lunes y miércoles se visitan 14 áreas, cada día, y los días jueves son visitadas 10 áreas, y los días restantes un número menor de áreas a ser visitadas.

En la Tabla 2, se muestra el número de supervisores que usan los vehículos semanalmente, en la actualidad de uno a dos supervisores usan en el día los vehículos para realizar las visitas a las áreas verdes. En cambio la distribución semanal de vehículos se muestra en la Tabla 3, donde se identifica a los vehículos en la primera columna del lado izquierdo con los números del 1 al 4, mientras que los datos dentro de la matriz con los números del 1 al 10 corresponden a los supervisores.

Tabla 1. Número de áreas visitadas por cada supervisor: Situación Actual.

Supervisor	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Total visitadas
1	2	2			1	5
2	2		2		2	6
3	2		2		1	5
4	2	2				4
5	2	1		2		5
6	2		2	1		5
7	2		3			5
8		1	2	3		6
9		2	1	1	2	6
10			2	3		5
Total	14	8	14	10	6	52

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2. Número de supervisores que usan los vehículos: Situación Actual.

Vehículo <i>i</i>	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
Vehículo 1	2	2	2	2	1	9
Vehículo 2	2	1	2	1	1	7
Vehículo 3	2	1	2	1	1	7
Vehículo 4	1	1	1	1	1	5
TOTAL	7	5	7	5	4	28

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3. Distribución semanal de vehículos a cada supervisor: Situación Actual.

Vehículo <i>i</i>	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes	
Vehículo 1	1	2	1	4	2	3	4	5	1	-
Vehículo 2	3	4	5	-	6	7	6	-	2	-
Vehículo 3	5	6	8	-	8	9	8	-	3	-
Vehículo 4	7	-	9	-	10	-	10	-	4	-

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, los supervisores cuentan con un tiempo determinado (20 horas semanales) por lo cual se requiere reestructurar el actual plan de visitas de tal forma que disminuya el número de días empleados en realizar las visitas a los grupos de áreas verdes, siendo una alternativa la implementación del sistema “pool car” mediante el cual se pretende incluir más de un supervisor dentro de cada uno de los vehículos

disponibles. En la Tabla 4 se muestra el Plan actual de visitas realizadas semanalmente. Tal como se muestra en Tabla 4, el Plan de Visitas Actual muestra que los días Lunes y Miércoles, salen siete supervisores a visitar las áreas verdes, los días Martes y Jueves salen cinco supervisores y el día viernes salen cuatro supervisores. La situación actual contempla que hay veintiocho salidas semanales realizadas por diez supervisores.

Tabla 4. Plan de Visitas Semanal: Situación Actual

Supervisor	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	# Áreas visitadas
1	1	1			1	5
2	1		1		1	6
3	1		1		1	5
4	1	1		1		4
5	1	1		1		5
6	1		1	1		5
7	1		1			5
8		1	1	1		6
9		1	1		1	6
10			1	1		5
Totales	7	5	7	5	4	52

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 5 se presentan los kilómetros recorridos asociados a cada vehículo, según el Plan de Visitas actual, se puede apreciar que tres vehículos concentran el 82% del total de kilómetros recorridos.

En la Tabla 6 se muestran el total de minutos recorridos por los vehículos semanalmente. Considerando que son cuatro, los vehículos disponibles y que en la semana se realizan veinte recorrido, entonces cada uno recorrería 2.88 horas diarias.

Tabla 5. Kilómetros recorridos por el vehículo i : Situación Actual

Vehículo i	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
Vehículo 1	82	93	108	52	35	370
Vehículo 2	86	50	56	91	40	323
Vehículo 3	78	32	73	50	40	273
Vehículo 4	43	28	45	40	45	201
	289	203	282	233	160	1167

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6. Minutos recorridos por el vehículo i : Situación Actual

Vehículo i	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
--------------	-------	--------	-----------	--------	---------	---------

Vehículo 1	261	279	305	179	90	1,114
Vehículo 2	223	116	246	186	129	899
Vehículo 3	214	85	215	176	99	788
Vehículo 4	112	108	137	159	137	652
	809	588	903	699	454	3,454

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente los costos totales asociados al Plan de Visitas actual, el cual se compone de costos fijos y costos variables. Los costos fijos suman un valor de \$23.50 por vehículo, que incluyen los siguientes rubros:

- Mantenimiento del vehículo por un valor de \$5.00
- Combustible, por un valor de \$10.00
- Pago diario al Conductor, por un valor de \$8.50.

Para los costos variables de utilización se consideró un valor de \$0.06 por cada minuto de espera, según la Ley de Transporte¹, que será asociado a los minutos de recorridos de cada vehículo. La suma de los costos fijos y variables, dan como resultado el costo total por utilización del vehículo.

Tabla 7. Costos Totales: Situación Actual

Vehículo <i>i</i>	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
Vehículo 1	39	40	42	34	29	184
Vehículo 2	37	30	38	35	31	171
Vehículo 3	36	29	36	34	29	165
Vehículo 4	30	30	32	33	32	157
	143	129	148	136	121	677

Fuente: Elaboración Propia

Para el Plan de visitas Actual, en la organización cada una de las áreas que conforman los 10 grupos y/o contratos han sido georeferenciadas y levantadas sobre una plataforma de Google Maps con el fin de identificar su ubicación en el espacio, una ilustración de este grupo de áreas verdes identificadas con diferentes colores se muestran en la **Figura 1**.

¹ El Consejo Nacional de Tránsito, en virtud de lo que dispone el Literal g) del Art. 27 de la Ley de Tránsito y Transporte Terrestre en concordancia con el Literal b) del Art. 113, del Reglamento de Aplicación a la Ley de Tránsito y Transporte Terrestre, determina el uso de los taxímetros de última tecnología en los vehículos de transporte público de pasajeros para el servicio de taxis, inicialmente en las ciudades de Quito, Guayaquil y Cuenca, el control lo efectuará la Dirección Nacional de Tránsito, Subjefaturas de Tránsito y la Jefatura de Tránsito de la Comisión de Tránsito de la Provincia del Guayas.

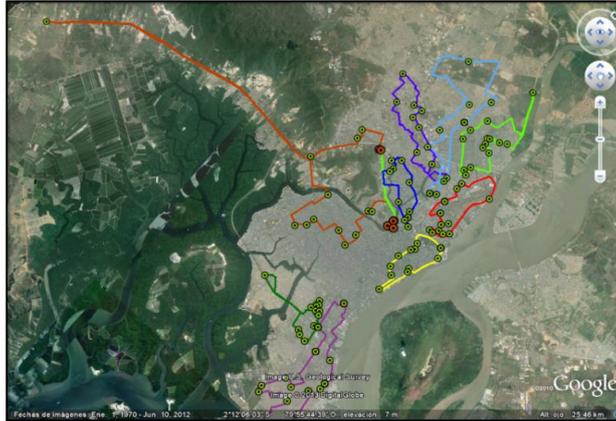


Figura 1. Distribución de áreas por contrato

4 Modelo matemático de optimización para el plan de mantenimiento

El éxito de la movilización desde un punto seleccionado como origen hacia otro punto seleccionado como destino final puede no ser un inconveniente al momento de planificar una ruta, pues se entiende que la misma conlleva una planificación simple. Sin embargo, el incluir nuevas variables dentro de la programación puede complicar seriamente la planificación de las rutas afectando con ello los costos de la operación y el uso inadecuado de los recursos. La probabilidad de reducir los costos y optimizar los recursos motiva la implementación de un modelo matemático de optimización, en particular por sus características, este problema es del tipo denominado en la literatura de investigación de operaciones como problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés).

4.1 El problema de Ruteo de vehículos VRP

A breves rasgos un problema de ruteo de vehículos (VRP) consiste en, dado un conjunto de nodos a visitar (clientes), uno o varios depósitos (bases) y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos y que den servicio a todos los clientes. En las últimas cuatro décadas se han presentado soluciones a través de diferentes formulaciones de este problema, que corresponde al área de investigación de la optimización combinatoria, tal es el caso de Dantzig y Ramser que en 1959 realizaron por primera vez una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible, luego de esto, dicha formulación fue mejorada por Clarke & Wright en los años sesenta mediante la aplicación de una heurística [4]. Estos modelos algorítmicos no han dejado de

evolucionar incorporando durante este proceso más características de la realidad y más precisión en los resultados.

El problema del VRP clásico, considera que la flota de vehículos es homogénea y está ubicada en un único depósito, los clientes pueden ser visitados en cualquier momento, el orden de visita no es importante y los vehículos solo entregan o reciben carga. También se ha considerado algunas variantes del VRP debido a las múltiples aplicaciones que estos tienen, dichas variantes son flotas heterogéneas (VRP con Backhauls), con varios depósitos (MDVRP), con ventanas de tiempo (VRPTW), con importancia en el orden de visitas (VRPP), con cargas y descargas (PDVRP), etc.

El Problema de Ruteo de Vehículos VRP y todas sus variantes, es un problema de optimización combinatoria duro; ver por ejemplo [5], y sólo pueden resolverse por medio de técnicas exactas en casos pequeños, en un tiempo prudencial, y para resolver casos reales se requiere de técnicas heurísticas o de algoritmos basados en metaheurísticas. En cuanto a métodos heurísticos se destaca la heurística de Clarke & Wright, mientras que entre los métodos basados en Metaheurísticas se destacan en la literatura procedimientos de solución basados en Colonia de hormigas, Búsqueda Tabú, Recocido simulado, algoritmos genéticos, GRASP, etc.

En particular nuestro problema es una variante del VRP en el que se busca obtener rutas óptimas en los recorridos para el mantenimiento de las áreas verdes, minimizando el tiempo total recorrido, lo cual implicará reducir los costos operativos y aumentar el número de visitas semanales para cubrir un potencial incremento del número de áreas verdes supervisadas.

4.2 Optimizadores de propósito general para resolver el VRP

Como se presenta en [6], existen procedimientos basados en metaheurísticas que pueden usarse para buscar en el espacio de soluciones a problemas de optimización. A éstos se les conoce como procedimientos de propósito general o independientes de contexto.

Al resolver un problema de optimización, una práctica común es desarrollar un método dependiente del contexto (es decir un procedimiento que explote explícitamente la estructura y propiedades del problema para conducir una búsqueda eficiente). Muchas implementaciones de heurísticas y metaheurísticas están basadas en este paradigma, es decir, desarrollan un método especializado para un problema específico. El propósito de algunas investigaciones es lo contrario; es decir, crear procedimientos generales que permitan encontrar soluciones de calidad razonable para una amplia clase de problemas de optimización basados en un paradigma independiente del contexto, y es, bajo esta filosofía que se han desarrollado programas de software comercial relevantes que se han popularizado en los últimos años en esta área, uno de los cuales es RISKOptimizer², que es su complemento para optimización con incertidumbre o estocástica.

² RiskOptimizer es una marca registrada de PALISADE Corporation.

4.3 Características del modelo matemático de optimización

El modelo matemático de optimización es la expresión del problema con simbolismo matemático. El modelo contiene un objetivo y un conjunto de restricciones que deben ser respetadas.

Para la estimación de los parámetros a ser utilizados en el modelo matemático se han considerado variables de Costos, Tiempos, Distancias, Asignación y Capacidad, las cuales deben ser determinadas de tal manera que expresen la problemática por sí mismas. Adicionalmente a esto; una correcta estimación y determinación de éstas, traerá consigo beneficios, como la aplicabilidad de la solución de forma práctica y en términos apropiados de acuerdo al giro del negocio al cual se le está dando la solución matemática.

La resolución del modelo de optimización no solo nos permite determinar el valor de las variables de decisión, sino también otra información de utilidad práctica en torno a la solución óptima. Por ejemplo:

- La comparación de la situación actual y la situación deseada óptima.
- Análisis de la capacidad instalada en contraste con la capacidad máxima a ser utilizada para optimizar los recursos.
- Ahorros en tiempos que permitirán utilizar el tiempo sobrante en nuevas actividades que agreguen valor a la organización.

Para la función objetivo se consideraron los siguientes componentes:

- El precio del combustible, el cual ha sido tomado como referencia de los precios oficiales de la gasolina a la fecha, asociados al consumo diario de cada vehículo. Para el modelo se ha considerado un valor de \$10.00 (diez dólares) como costo fijo del consumo diario de gasolina para cada vehículo (camioneta en la que es transportado el supervisor). De existir una disminución de días en que se realicen la totalidad de las visitas a los grupos de áreas verdes, se podría determinar el ahorro en el consumo de combustibles.

Una cifra expresada en semanas, facilitaría el desembolso administrativo programado por los supervisores, y expresado en meses sería de utilidad para el manejo del flujo de gastos por parte del área Financiera.

- Los costos incurridos en eventualidades menores y/o mantenimiento, es otro rubro que se ha considerado en el modelo, dado que éstos se encuentran asociados al uso diario de los vehículos. De darse una solución que disminuya el número de días en que estos vehículos son utilizados semanalmente, se verá reflejado en el ahorro en este rubro de eventualidades menores. En el modelo se ha contemplado un valor de \$5 diarios.
- Mediante la recopilación de datos se encontró una particularidad en los costos generados por el pago al conductor y al coordinador de transporte, que en primera instancia son declarados como costos fijos, dado que son rubros considerados en la nómina de la compañía; sin embargo con la solución óptima, que permitiría minimizar los costos asociados al plan de visitas de las áreas verdes; por ejemplo utilizar menos días de la semana para visitar la totalidad de áreas, puede verse reflejado en el tiempo que éstos dedican a sus actividades; para el caso del primero, conducir el vehículo que va a realizar una visita a un área determinada y para el segundo, el tiempo destinado para

el seguimiento y monitoreo del Plan de visitas semanal y que pudiera ser reasignado a otras actividades.

Referente a los tiempos, el modelo considera lo siguiente:

- Tiempo en que debe efectuar el recorrido o de ocupación del vehículo, máximo de cuatro horas, tiempo en el cual el supervisor puede utilizar el vehículo diariamente; esto debido a que las actividades del Supervisor se dividen en cuatro horas de supervisión o trabajo de campo y cuatro horas de tareas administrativas o trabajo en oficina, en donde se elaboran informes de actividades y aprobación de planillas (documentos que incluye labores realizadas por los contratistas), para posterior pago.
- Distancias de traslado (en minutos), estos datos se refieren al tiempo entre dos puntos o minutos que toma recorrer entre un área y otra. Para esta medición se consideró una velocidad promedio de 35km/h. Los datos se resumen en una matriz de tiempos de trayecto que contiene 52 grupos de áreas o 52 nodos, más el depósito u oficina de donde parten los supervisores en los vehículos asignados.
- Tiempo de servicio, el cual fue estimado luego de haber levantado datos mediante una encuesta realizada a los supervisores de áreas, a los que se le preguntaba el menor tiempo que hayan utilizado para efectuar la supervisión, el tiempo más frecuente y el tiempo máximo que le ha tomado realizar su labor de supervisión en un área verde. Luego de la recopilación de datos, se realizó el análisis para determinar el ajuste de distribución de probabilidad, de manera que sea posible adicionar estos tiempos de servicio a los tiempos de recorrido, resultando así la matriz de distancias que será utilizada en el modelo.

Otros datos de interés en el modelo son los siguientes: La capacidad del vehículo, que es de 3 ocupantes; Número de áreas a ser visitadas en la semana: 52 áreas; Número mínimo de salidas del supervisor en la semana: 2 salidas y Número máximo de salidas del supervisor en la semana: 4 salidas.

4.4 Matriz de distancias y tiempos de servicio

Para la obtención de la matriz de tiempos de trayecto o matriz de distancias, se incluyeron 52 puntos o nodos (cada área verde a ser visitada), y un punto o nodo que corresponde al depósito u oficina de donde salen los supervisores. Así la matriz de distancias, expresadas en minutos de recorrido de punto i a un punto j , corresponde a una Matriz 53×53 ($M_{53 \times 53}$)

En la mencionada matriz de tiempos de trayecto se añadieron los tiempos servicio, que hace referencia al total de minutos empleados en realizar la actividad de supervisión en cada área verde. Dado que, en la práctica los tiempos de las actividades tienen asociada una variabilidad aleatoria, la estimación se la hizo mediante el levantamiento de datos a partir de la realización de una encuesta a los supervisores, y se determinó que se ajustan a una distribución Pert. La distribución Pert, es usualmente empleada en problemas de simulación cuando se requiere encontrar solución a problemas reales,

pero con poca información; permitiendo, mayor tolerancia en la estimación del valor más probable, lo que mejora la robustez del modelo utilizado.

Luego del levantamiento de datos mediante la encuesta se obtuvieron los siguientes valores, que corresponden a las estimaciones de los parámetros de la distribución Pert:

- Tiempo mínimo de supervisión por área. (15 minutos)
- Tiempo máximo de supervisión por área. (30 minutos)
- Tiempo promedio de supervisión por área. (45 minutos)

4.5 Formulación matemática del modelo de optimización

Restricciones:

- Capacidad del vehículo: Se refiere al número de supervisores que pueden ir en el vehículo. Para el modelo se ha colocado que a lo mucho deben viajar 3 supervisores en un vehículo.
- Jornada laboral/Tiempo de recorrido: Se refiere al número de horas destinadas por los supervisores para realizar las visitas a las áreas. Considerando el escenario actual, éstos deben emplear cuatro horas para visitas y cuatro horas en oficina para elaboración de reportes de novedades. Para el modelo fue expresado en minutos, es decir 240 minutos.
- Visitas semanales: Se refiere al rango de días en que los supervisores deben cumplir con las visitas a las áreas semanalmente. Este rango será de dos a cuatro veces por semana.
- Área-Vehículo: Esta restricción significa que cada área debe ser visitada por un vehículo, esto con la finalidad de que una misma área no sea visitada por más de un vehículo.
- Demás que involucren el cumplimiento de las anteriores.

Función Objetivo:

- Para la función objetivo se consideró un costo fijo por utilización de un vehículo, más el costo de combustible por el consumo promedio del recorrido a cumplir por cada vehículo en su ruta.

Índices:

- Sea i el área a ser supervisada para el mantenimiento integral de las áreas verdes, la cual representa a cualquier punto de origen o destino. i varía de 1 a 52
- El índice k identifica el vehículo motorizado a ser utilizado. i varía de 1 a 20
- Sea f el fiscalizador, quien supervisará el mantenimiento de las áreas verdes. i varía de 1 a 10
- Sea Lu vehículos destinados para el día lunes.
- Sea Ma vehículos destinados para el día martes.
- Sea Mi vehículos destinados para el día miércoles.
- Sea Ju vehículos destinados para el día jueves.
- Sea Vi vehículos destinados para el día viernes.

Datos de entrada (Parámetros):

- $TMax$, Tiempo máximo de ocupación o tiempo de recorrido del vehículo durante el día.(240 minutos)
- T_{ij} Tiempo de viaje + tiempo de servicio desde la área i hacia la área j .(Matriz de Distancias-Matriz de tiempos de trayecto)
- $Areas_{if}$ Área que debe ser visitada por el fiscalizador f .
- Cap Número máximo de fiscalizadores en un vehículo.
- a y b Número mínimo y máximo de salidas de cada fiscalizador durante la semana.
- $Cost_k$ Costo asociado por utilizar el vehículo k .

Variables de decisión:

- $X_i^k \begin{cases} 1 & \text{Si la área } i \text{ es seleccionada para ser servida por el vehículo } k \\ 0 & \text{Si no} \end{cases}$

Variables de estado:

- $Comb_i^k$ Costo de combustible consumido por el vehículo k por visitar el área i .
- $F_f^k \begin{cases} 1 & \text{Si el fiscalizador } f \text{ va en el vehículo } k \\ 0 & \text{Sino} \end{cases}$
- $A_i^k \begin{cases} 1 & \text{Si el área } i \text{ es visitada por vehículo } k \\ 0 & \text{Sino} \end{cases}$
- T_i^k Tiempo tomado por visitar el área i en el vehículo k .

Modelo de Optimización:

El modelo propuesto es un modelo de programación estocástica³ y su formulación matemática es como sigue:

$$\mathbf{Min} z = \sum_{i,k} X_i^k * Comb_i^k + \sum_k Cost_k . \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

Tiempo máximo para efectuar las fiscalizaciones por vehículo.

³Por la consideración aleatoria en las variables de demanda de viajes

$$\sum_i X_i^k * T_i \leq T_{Max} \quad ; \quad \forall_k. \quad (2)$$

Número de fiscalizadores que van dentro de un vehículo.

$$\sum_{i \in f} F_f^k \leq Cap \quad ; \quad \forall_k. \quad (3)$$

Número de salidas por cada fiscalizador.

$$a \leq \sum_k X_i^k * F_f^k \leq b \quad ; \quad \forall_f. \quad (4)$$

Un fiscalizador en un día debe de ir en un solo vehículo.

$$\sum_{k \in T_1} F_f^k \leq 1 \quad ; \quad \forall_f. \quad (5)$$

$$\sum_{k \in M_a} F_f^k \leq 1 \quad ; \quad \forall_f. \quad (6)$$

$$\sum_{k \in M_i} F_f^k \leq 1 \quad ; \quad \forall_f. \quad (7)$$

$$\sum_{k \in T_2} F_f^k \leq 1 \quad ; \quad \forall_f. \quad (8)$$

$$\sum_{k \in V_i} F_f^k \leq 1 \quad ; \quad \forall_f. \quad (9)$$

Cada área debe ser visitada por un solo vehículo.

$$\sum A_i^k \leq 1 \quad ; \quad \forall_i. \quad (10)$$

5 Resultados obtenidos

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos a partir de la aplicación de técnicas de optimización y simulación; de manera que se encuentre una mejor solución al problema objeto de estudio; que es el Plan de Visitas de Inspección en el servicio de mantenimiento de áreas verdes de la ciudad de Guayaquil, al que están sujeto los supervisores para fiscalizar las labores realizadas por los contratistas del mantenimiento integral de las áreas verdes.

En la Tabla 8 podemos apreciar el número propuesto de áreas visitadas por cada supervisor, que muestra una mejora en el número de visitas diarias actual de la Tabla 1, muestra una mejora en el número de visitadas redistribuidas diariamente. Además hay un balanceo en los días de la semana y no se concentran en unos pocos.

La Tabla 9, muestra los resultados referentes al número de supervisores que usan los vehículos. Como se observa, existe un incremento de los supervisores por vehículo, esto principalmente, debido a que en un vehículo puede transportar más de un supervisor, lo cual comparado con el número de supervisores que actualmente usan los vehículos de la Tabla 2.

Tabla 8. Número de áreas visitadas por cada supervisor: Solución propuesta.

Supervisor	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Total visitadas
1	1		3	1		5
2	1	1			4	6
3	1	1		2	1	5
4		1			3	4
5	2	1		1	1	5
6	1	1	3			5
7	1		1	3		5
8	2	3		1		6
9		3		1	2	6
10	2		3			5
Total	11	11	10	9	11	52

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9. Número de supervisores que usan los vehículos: Solución propuesta

Vehículo i	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
Vehículo 1	2	2	1	1		6
Vehículo 2	3	2	2	3	2	12
Vehículo 3	1	2		1	1	5
Vehículo 4	2	1		2	2	7
TOTAL	8	7	3	7	5	30

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 10 se puede observar el Plan de Visitas Semanal: Solución propuesta. El Supervisor 1 realizará recorridos los días lunes, miércoles y jueves, visitando cinco áreas. Para el caso del Supervisor 10, el modelo sugiere realizar dos salidas en la

semana, con las cuales abarcaría visitar cinco áreas. La solución propuesta contempla treinta salidas semanales realizadas por diez supervisores.

Tabla 10. Plan de Visitas Semanal: Solución propuesta

Supervisor	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	# Áreas visitadas
1	1		1	1		5
2	1	1			1	6
3	1	1		1	1	5
4		1			1	4
5	1	1		1	1	5
6	1	1	1			5
7	1		1	1		5
8	1	1		1		6
9		1		1	1	6
10	1		1			5
Total	8	7	4	6	5	52

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestran, en la Tabla 11, los kilómetros recorridos asociados a cada vehículo según el modelo propuesto, se puede apreciar que de los veinte recorridos que se contemplaban en el Plan de Visitas Actual, Tabla 5, el modelo propone realizar diecisiete recorridos, lo cual sumado a la optimización de las rutas, los kilómetros recorridos al final de la semana se reducen sustancialmente, esto se encuentra ligado directamente a la reducción de costos (ver Tabla 13).

La Tabla 12 presenta un total de 2,709 minutos de recorrido, correspondiente a las rutas totales de los vehículos, que representaría 45 horas semanales. Considerando que la solución propuesta disminuye el número de recorridos a un total de diecisiete, por tanto cada vehículo recorrería aproximadamente 2.66 horas diarias de recorrido.

Tabla 11. Kilómetros recorridos por el vehículo *i*: Solución propuesta.

Vehículo <i>i</i>	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
Vehículo 1	30	17	17	12	0	76
Vehículo 2	74	12	37	19	26	168
Vehículo 3	8	53	0	25	20	105
Vehículo 4	15	25	0	26	23	89
	126	107	54	82	69	439

Fuente: Elaboración Propia

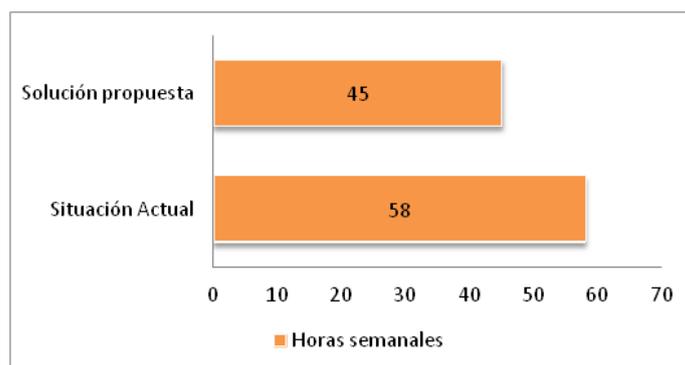
Tabla 12. Minutos recorridos por el vehículo *i*: Solución propuesta.

Vehículo <i>i</i>	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
Vehículo 1	170	116	136	144	0	566
Vehículo 2	202	111	189	188	193	883
Vehículo 3	74	218	0	165	182	639
Vehículo 4	157	168	0	139	157	621
	603	613	325	636	532	2,709

Fuente: Elaboración Propia

Debido a que los vehículos utilizados para esta actividad son de las mismas características, si observamos en forma gráfica podemos determinar que la exposición total de horas de estos vehículos cambia de 58 horas en la situación actual a 45 horas en la solución óptima o solución propuesta, tal como se aprecia en el Gráfico 5.

Gráfico 5. Comparativo horas semanales.



Fuente: Elaboración Propia

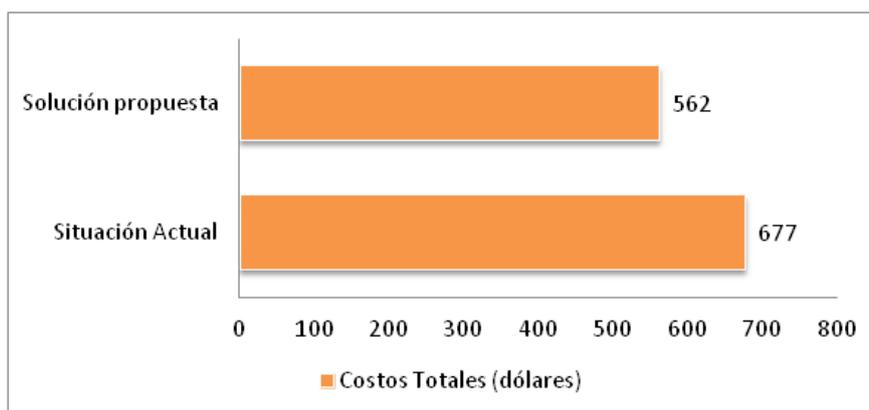
En la Tabla 13, se aprecian los costos totales asociados a la solución propuesta, que por considerar menos kilómetros recorridos, disminuyen los costos totales.

Tabla 13. Costos totales: Solución propuesta.

Vehículo i	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Totales
Vehículo 1	34	30	32	32	-	128
Vehículo 2	36	30	35	35	35	170
Vehículo 3	28	37	-	33	34	132
Vehículo 4	33	34	-	32	33	131
	130	131	67	132	102	562

Fuente: Elaboración Propia

Tal como se observa en las Tabla 7 y Tabla 13, la reducción en costos por la implementación del modelo es de \$ 115.00 por semana, lo cual muestra la optimización del modelo y el alcance del objetivo, reducción de costos operativos., lo anterior se ilustra en el Gráfico 6.

Gráfico 6. Comparativo costos totales.

Fuente: Elaboración Propia

Resumiendo, se tienen los resultados que se muestran en la Tabla 14, los recursos utilizados para el diseño del Plan de visitas actual, requiere *cuatro vehículos* que son usados durante *cinco días* de la semana; diez supervisores para realizar las tareas de verificación de los trabajos realizados por los contratistas y un coordinador de transporte. La alternativa de solución propuesta luego de ejecutar el modelo, sugiere únicamente usar *cuatro vehículos* durante *cuatro días* a la semana. Maximizando así el uso de los recursos y minimizando los costos asociados al uso del vehículo y al costo total de la operación.

Tabla 14. Comparativo Situación Actual versus Solución propuesta.

Comparativo	Situación Actual	Solución Propuesta
Distancia (en Kilómetros)	1,167	439
Tiempo de recorrido (en minutos)	3,454	2,709
Número de recorridos (vehículos)	20	17
Costos Fijos	470	400
Costos Variables	207	163
Costos Totales	677	563
Salidas de supervisores	28	30
Supervisores por vehículo (en promedio)	1.4	1.7

Fuente: Elaboración Propia

El modelo fue implementado con éxito desde finales de 2013, constatándose ahorros significativos en los costos de operación de las Instituciones involucradas en el mantenimiento de las áreas verdes.

6. Conclusiones y recomendaciones

En la resolución de problemas prácticos que involucran procesos logísticos, existe una gran discusión sobre la aplicabilidad de técnicas aproximadas, como es el caso de metaheurísticas en general y los métodos genéticos en particular. En cuanto a los resultados la versatilidad de la aplicación de los algoritmos genéticos en los problemas de ruteo, se observó que permitieron alcanzar buenas soluciones a los problemas de enrutamiento, de tal manera que se logró la reducción del número de vehículos en 3 unidades durante la semana de operaciones, en relación a la planificación actual donde se necesitaban 20 unidades de vehículos durante los cinco días de la semana para cumplir con la ruta planificada.

Esta reducción en el número de vehículos derivó en una reducción en los costos por uso semanal de los vehículos en \$ 115.00 en relación a los costos semanales de la situación actual misma que asciende a \$ 677.

Otra ventaja que se logró es que a través del modelo planteado el equipo técnico al igual que los vehículos también optimizan su tiempo, al transportarse en un mismo vehículo más de un supervisor, con lo cual el supervisor dispondrá de una mayor cantidad de tiempo para realizar sus actividades administrativas y atender situaciones puntuales de los contratos tal como se muestra en la Tabla 9.

Es posible una alternativa económica adicional para los vehículos que se dejarán de usar por temas de optimización. Éstos podrían ser utilizados en la supervisión de nuevas áreas, aumentando con ello el alcance del proyecto sin invertir en nuevos vehículos.

Una extensión importante a partir de los resultados observados es que en el ámbito público de gestión, existen muchos problemas que comparten características similares con el abordado en este estudio, así la Institución beneficiaria del modelo podrá replicarlo en nuevos proyectos de visitas, supervisión de áreas verdes, obras municipales, obras civiles, entre otros.

En cuanto a las mejoras que se podrían establecer en el sistema a partir del modelo generado en este estudio, se sugiere la modificación de los procedimientos existentes en la organización, como parte de la mejora continua que permita ejecutar la solución propuesta; entre las actividades a considerarse están:

- Registrar en la bitácora de vehículos los datos informativos acorde a las visitas realizadas con las respectivas variables que se deben incluir.
- Maximizar el uso de los vehículos, implementando el sistema Car Pool, que permite que el vehículo transporte más de un supervisor.

7. Referencias

- [1] Unit, Economist Intelligence, «SIEMENS,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.siemens.com/press/pool/de/events/corporate/2010-11-lam/result-presentation.pdf>. [Último acceso: Junio 2013].
- [2] L. Krishnamurthy y N. R. Jose, Areas Verdes Urbanas en Latinoamérica y El Caribe, Ciudad de México, 1998.
- [3] M.I. Municipalidad de Guayaquil, «Rendición de Cuentas 2010-2011,» Wong & Wong Consultores Asociados, Cía Ltda., Guayaquil, 2011.
- [4] T. Paolo y V. Daniele, "The Vehicle routing problem", Bologna: Universita degli Studi di Bologna, 2000.
- [5] F., Sandoya, «Instituto de Ciencias Matemáticas,» [En línea]. Available: <http://goo.gl/B9nndW>.
- [6] Sandoya F., UNAM, «UN MODELO PARA EL PROBLEMA DE LA DIVERSIDAD MÁXIMA UN ESTUDIO PARA LA SELECCIÓN DE LO MEJOR Y LO MÁS DIVERSO,» MÉXICO, 2013.
- [7] S. Palomo, La Planificación Verde de las Ciudades, Barcelona: 2da edicion, 2005.
- [8] B. Francisco, «El Reeditor,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.reeditor.com/columna/303/2/arquitectura/areas/verdes/densidad/habitacional>.
- [9] A. Oliveira, «Facultad de Ingenieria Universidad de Uruguay,» 2004. [En línea]. Available: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>. [Último acceso: 2013].

- [10] G. LAPORTE, «The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms.,» 1992.
- [11] G. W. L. Nemhauser, *Integer and Combinatorial Optimization*.
- [12] J. Holland, *Adaptation in Natural and artificial systems: An Introduction Analysis with Applications To Biology, Control and Artificial Intelligence*, The University of Michigan Press, 1975.
- [13] CIRRELT, «Interuniversity Research Centre on Enterprise Network, Logistic and Transportation,» Department of Computer Science and Operations Research of the Université de Motreal, August 2007. [En línea]. Available: 8. CIRRELT. CIRRELT. Metaheuristic for the vehicle routing problhttps://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2007-27.pdf..
- [14] Palisade Corporation, «Guía para el uso de EVOLVER,» Ithaca, 2010.
- [15] Palisade Corporation, «Palisade Corporation,» [En línea]. Available: <http://www.palisade-lta.com/>. [Último acceso: Julio 2013].
- [16] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, «Perspectivas del Medio Ambiente América Latina y el Caribe».
- [17] Diagnóstico Técnico Participativo del Plan Regional de Desarrollo Concertado de Lima 2012 – 2025, «Plan Lima,» 2011. [En línea]. Available: http://www.planlima.gob.pe/pdf/diagnostico_cap5.pdf. [Último acceso: 2013].
- [18] J. L. Lu y M. Xie, «INTECHOPEN,» 2010. [En línea].
- [19] Y. Chang y C. Lin, «AIMSciences,» University of North Carolina at Wilmington, 2007. [En línea]. Available: <http://www.aimsciences.org/journals/pdfs.jsp?paperID=2806&mode=full>.
- [20] F. Dwyer, G. McPherson, W. Schroeder y R. Rowntree, «ASSESSING THE BENEFITS AND COSTS OF THE URBAN FOREST,» 1992.
- [21] «sci2s,» Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, E.T.S. Ingeniería Informática, C/ Periodista Daniel Saucedo Aranda s/n, 18071 Granada (España), [En línea]. Available: [http://sci2s.ugr.es/publications/ficheros/OCH%20Modelos%20y%20Nuevos%20Enfoques%20\(Chapter\).pdf](http://sci2s.ugr.es/publications/ficheros/OCH%20Modelos%20y%20Nuevos%20Enfoques%20(Chapter).pdf).
- [22] F. Hillier y G. Lieberman, *Introducción a la Investigación de Operaciones*, Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [23] Y.-J. Potvin, «GENETIC ALGORITHMS FOR THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM,» CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS UNIVERSITE DE MONTREAL, [En línea]. Available: <http://goo.gl/foIGy4>.
- [24] M. Vázquez, «CSIC,» Dpto. de Estructuras de Edificación de la UPM de Madrid-España, 1995. [En línea]. Available: <http://goo.gl/ooJwQF>.
- [25] B. M. Batista y F. Glover, «University of Colorado at Boulder,» [En línea]. Available: <http://goo.gl/nba8Ng>.