

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA INFORMÁTICA

**OPTIMIZACIÓN GEOREFERENCIADA DE RUTAS DE  
LECTURA DE MEDIDORES**

**JAIME FERNANDO ACEVEDO SALINAS**

TESIS DE GRADO  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

(OCTUBRE 2011)

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Informática

**OPTIMIZACIÓN GEOREFERENCIADA DE RUTAS DE  
LECTURA DE MEDIDORES**

**JAIME FERNANDO ACEVEDO SALINAS**

Profesor Guía: **José Luis Martí Lara**

Programa: **Magíster en Ingeniería Informática**

(Octubre 2011)

## 1 Resumen Ejecutivo

Dentro de los procesos operativos más relevantes de una empresa de servicios básicos se encuentra la lectura de los consumos registrados en los medidores de cada domicilio. Este es el caso de las empresas de agua potable, energía eléctrica y gas natural. Un adecuado registro de los consumos permite un correcto cobro a los clientes, y de esa forma generar los ingresos que mantienen la rentabilidad esperada de la operación del negocio. Por lo anterior, cualquier mejora en el proceso de registro de consumos tendrá beneficios directos para la compañía, ya sea por reducción de costos, por mejoras en los cobros y/o mejoras en la satisfacción de sus clientes.

Para registrar los consumos de sus clientes, las empresas disponen de personas de terreno, ya sea propio o de contratistas, que recorren el territorio registrando los consumos desde los medidores ubicados en cada predio. Las personas que realizan este trabajo se denominan 'lectores de medidores' y la trayectoria que recorren durante una jornada laboral se conoce como 'ruta de lectura'.

En general, las rutas de lectura se agrupan en ciclos para efectos de facturar los consumos. Dependiendo del tamaño de la empresa, pueden existir ciclos mensuales, quincenales, semanales, o diarios. Para empresas de más de 100.000 clientes en general se utilizan ciclos diarios, es decir todos los días hábiles se realiza lectura y facturación de una porción de los consumos.

El presente trabajo se orienta a la reducción de costos mediante la Optimización de Rutas de Lectura de Medidores, maximizando la cantidad de medidores que un lector puede recorrer en una jornada de trabajo mediante la definición de la trayectoria de menor costo (distancia) entre todo el conjunto de medidores de la ruta.

Se utiliza la heurística del *vecino más cercano* como método base para implementar la solución. Como aporte de este trabajo, se introduce el concepto de *Matriz de Ponderación Tridimensional* para mejorar el método del vecino más cercano considerando particularidades del terreno en coordenadas  $(x,y,z)$  en vez de asumir que es un plano  $(x,y)$  perfecto.

El modelo fue aplicado en un conjunto de datos reales, previamente filtrados y clasificados, de modo de aislar los resultados de problemas de calidad de información. Los resultados son presentados finalmente sobre en Google Earth, potenciado de esa forma la componente geográfica como herramienta de representación de la ruta de lectura.

El modelo de optimización aplicado sobre el conjunto de datos reales, obtuvo una reducción de costo promedio de un 12%, lo que representa un ahorro de costo de US\$ 35.000 anual. Evaluado en un horizonte de 5 años, este ahorro representa importantes ganancias, parte de las cuales se pueden destinar a mejorar el método y herramienta desarrollados.

Como propuesta de trabajos futuros, se identifica la necesidad de desarrollar un método de resectorización de cliente, que optimice la segunda lectura que se realiza a los medidores que no se pudieron leer en una primera instancia.

Considerando el beneficio económico obtenido, se valida la eficacia y simpleza del método seleccionado (vecino más cercano).

Palabras claves: optimización, rutas de lectura, medidores, sistemas de información geográficos, vecino más cercano

## 2 Índice

1	Resumen Ejecutivo.....	2
2	Índice.....	3
3	Listado de Figuras.....	4
4	Listado de Tablas y Ecuaciones.....	4
5	Introducción.....	5
6	Definición del Problema.....	6
7	Diseño de la Solución.....	8
7.1	Análisis de Datos y Criterios de Simplificación.....	10
7.2	Modelo de Costo de la Ruta.....	17
7.3	Fuentes de Error en los Datos.....	20
7.4	Evaluación de Costo de la Situación Actual.....	21
7.5	Modelo de Reducción de Costo.....	26
7.6	Heurística de Solución del Modelo: vecino más cercano.....	27
7.7	Matriz de Particularidades Tridimensionales.....	29
8	Implementación de la Solución.....	30
8.1	Preparación de Datos.....	32
8.1.1	Sistema Comercial Rutas de Lectura.....	32
8.1.2	Sistema de Información Geográfico.....	32
8.1.3	Rutas de Lectura Georeferenciadas.....	32
8.2	Filtrado de Rutas.....	33
8.3	Clasificación de Rutas.....	34
8.4	Optimización.....	34
8.4.1	Matriz de Costos Tridimensional.....	34
8.4.2	Modelo de Optimización.....	35
8.5	Presentación de Resultados.....	36
8.5.1	Transformación a archivo KML.....	36
8.5.2	Presentación en Google Earth.....	36
9	Evaluación.....	38
9.1	Evaluación Técnica.....	38
9.2	Evaluación Económica.....	38
9.3	Evaluación del Modelo Reducción de Costo.....	39
9.4	Análisis de Resultados Teóricos.....	41
9.5	Análisis de Resultados Prácticos.....	43
9.6	Evaluación Técnica y Económica.....	47
10	Trabajos Futuros.....	48
11	Conclusiones.....	49
12	Bibliografía.....	50

### 3 Listado de Figuras

Figura N° 1: Mapa Conceptual del Problema de Rutas de Lectura  
Figura N° 2: Cantidad de medidores por sector  
Figura N° 3: Cantidad de lecturas por área.  
Figura N° 4: Cantidad de Lecturas por Sector - Área  
Figura N° 5: configuración de medidores de la zona de muestra  
Figura N° 6: Ejemplo de Ruta Coherente  
Figura N° 7: Ejemplo de Ruta de Alta Concentración  
Figura N° 8: Ejemplo de Ruta con Particularidades  
Figura N° 9: Ejemplo de Ruta con Pocos Puntos  
Figura N° 10: Ejemplo de Ruta con Muchos Puntos  
Figura N° 11: Distancia de Recorrido por Ruta  
Figura N° 12: Rutas por Distancia de Recorrido  
Figura N° 13: Rutas por Distancia de Recorrido – Grupo A (dist. < 30 kms)  
Figura N° 14: Diagrama de Flujo del Modelo Simplificado de Reducción de Costo  
Figura N° 15: Implementación de la solución  
Figura N° 16: Detalle de la implementación  
Figura N° 17: Geoferenciación de Medidores  
Figura N° 18: Ejemplo de rutas que requieren filtrado  
Figura N° 19: Sección de archivo KML  
Figura N° 20: Carga de archivo KML en Google Earth  
Figura N° 21: Ruta de lectura desplegada en Google Earth  
Figura N° 22: Ejemplos de validación del modelo propuesto  
Figura N° 23: Resultados del modelo propuesto para datos reales  
Figura N° 24: Distancia Original v/s Porcentaje de Optimización  
Figura N° 25: Cantidad de Medidores v/s Porcentaje de Optimización  
Figura N° 26: Ruta de Referencia  
Figura N° 27: Ruta de Referencia - primer día de lectura  
Figura N° 28: Ruta de Referencia - segundo día de lectura  
Figura N° 29: Distribución de Lecturas por Día  
Figura N° 30: Modelo de Optimización con Subrutas

### 4 Listado de Tablas y Ecuaciones

Tabla N° 1: Descripción de Componentes del Mapa Conceptual  
Tabla N° 2: Rutas de Lectura de la muestra seleccionada  
Tabla N° 3: Variables de Optimización del Modelo  
Tabla N° 4: Agrupación de rutas por longitud de recorrido  
Tabla N° 5: Detalle de las rutas del grupo A  
Tabla N° 6: Detalle de las rutas del grupo B  
Tabla N° 7: Estadísticas de la evaluación con datos reales

Ecuación 1: Función de Costo para 1 Medidor  
Ecuación 2: Función de Costo para 1 Ruta ‘r’  
Ecuación 3: Ponderación de factores de ajuste tridimensionales  
Ecuación 4: Modelo de Filtrado de Medidores por Distancia  
Ecuación 5: Modelo de Clasificación de Rutas  
Ecuación 6: Factor de Optimización  
Ecuación 7: Factor de Ahorro

## 5 Introducción

El problema que se trata en el presente trabajo pertenece al dominio de la optimización de procesos operacionales en empresas de servicios básicos (por ejemplo agua potable, gas o energía eléctrica). Particularmente trata sobre la reducción del costo de lectura de medidores, mediante la reducción de la distancia total necesaria para recorrer un conjunto de medidores equivalentes a una jornada de trabajo.

Mientras no sea rentable implementar la tele-lectura masiva a todos los clientes, se deberá mantener el proceso manual de acudir al predio a tomar el registro de consumo del medidor. Este proceso implica tomar decisiones respecto de la secuencia de recorrido de los medidores.

En general las empresas que presentan ciclos de lectura de medidores en terreno (por ejemplo agua potable, gas natural y electricidad), generan la secuencia de lectura (conocida como *ruta de lectura*) de forma manual y con datos tabulares provenientes de sus sistemas comerciales de atención y facturación de clientes. Esto es, dada una dirección de un nuevo cliente, se revisan las direcciones más cercanas anteriores y posteriores, y se ubica el nuevo medidor en forma intercalada según la numeración.

El método anterior no es eficiente cuando ocurren ciertas condiciones, como por ejemplo: división de predios, construcción de condominios, construcción de edificios, cambios de nombre de calle, pasajes, escalas, y en general cualquier situación en terreno que diste de una situación ideal de calle con numeración consecutiva.

Por lo anterior, se requiere de un método que esté continuamente revisando y reorganizando las rutas de lectura considerando la expansión de clientes y direcciones (medidores). Este método debe poseer una componente geográfica, tanto en sus cálculos como en su interfaz con el usuario, de modo que exista un apoyo visual en la definición de la ruta, lo que permite identificar de forma rápida cualquier particularidad, como errores de datos o de definición de la ruta, o algún cambio relevante en la configuración de medidores del sector (por ejemplo, una construcción de un condominio de edificios).

En el presente trabajo se implementa la heurística del ‘vecino más cercano’ como solución a la optimización de la ruta de lectura. Antes de aplicar la solución propuesta, se analizan los datos disponibles y se define el conjunto de muestra.

Los resultados son auspiciosos, pues permiten generar un ahorro de costo de un 12%, con lo que se da cumplimiento al objetivo del trabajo.

## 6 Definición del Problema

El problema que se trata en el presente trabajo pertenece al dominio de la optimización de procesos operacionales en empresas de servicios básicos (por ejemplo agua potable, gas o energía eléctrica). Particularmente se estudiará el caso del proceso operacional de lectura de medidores en una empresa de energía eléctrica. La optimización buscada es la reducción del costo de dicha lectura, que está determinado principalmente por el tiempo de recorrido entre medidores, de modo que a menor tiempo de recorrido se requieren menos lectores para completar la medida.

El proceso de lectura de medidores consiste en acudir hasta el medidor que registra el consumo del cliente, el cual se encuentra en el domicilio, y registrar en algún medio el valor del contador del medidor. El medio puede ser papel o algún dispositivo electrónico portátil. En el caso estudiado se utilizan equipos del tipo '*handheld computer*'. Una vez registrados los datos de los medidores, éstos son posteriormente cargados al sistema de facturación, el cual determina el valor del consumo del periodo mediante la diferencia con el valor registrado en el periodo anterior, y se procede a generar el documento de cobro al cliente a través de un pliego tarifario.

Históricamente el recorrido de los medidores, denominado 'ruta de lectura' se genera en forma administrativa desde una oficina de servicio al cliente, en la medida que se solicitan nuevos servicios. Si bien este procedimiento es sencillo y de bajo costo, tiene las siguientes desventajas:

- a) No considera las particularidades del terreno, como canales, escalas, pasarelas, etc.
- b) No considera cruces de calles y esquinas
- c) No considera la partición de terrenos en varios predios
- d) No considera el reemplazo de predios por condominios o edificios

En general, el procedimiento actual no considera las particularidades del terreno y no se actualiza cuando ocurren altas o bajas de medidores dentro de la ruta. Esto genera los siguientes problemas:

- a) Existencia de rutas sub o sobrepobladas de medidores
- b) Rutas con tramos en retroceso
- c) Rutas que no se pueden recorrer en terreno, o que se deben recorrer en un orden distinto

El aporte de este trabajo se basa en proponer un modelo de reducción de costo que permita a la empresa estudiada resolver los problemas recién mencionados, y de ese modo lograr reducir el costo de leer el parque de medidores de sus clientes.

La reducción de costo se logrará principalmente mediante:

- a) Una menor dotación de personal para realizar la lectura de medidores
- b) Un menor parque de equipos portátiles para realizar el registro en terreno

Por lo antes expuesto, se define el siguiente objetivo para este trabajo:

*“Optimizar la definición de rutas de lectura para reducir el tiempo de desplazamiento de un lector durante una jornada de trabajo, y consecuentemente reducir el costo de la actividad.”*

El aporte de este trabajo será el análisis y aplicación del modelo a un caso práctico, y la definición de reglas que permitan generar recomendaciones sobre cuándo y cómo aplicar el modelo propuesto.



## 7 Diseño de la Solución

La metodología a utilizar tiene dos líneas principales de acción: conceptual y práctica. En el ámbito conceptual, se seleccionarán los algoritmos de resolución de problemas de optimización de trayectorias entre un conjunto de puntos. En el ámbito práctico se analizarán datos reales existentes, clasificado y agrupando de modo de poder definir grupos de comportamiento típico entre distintas rutas de lectura. De este modo se logrará reducir la variedad de casos, y poder analizar y proponer soluciones estándares por tipo de ruta de lectura.

Como primer paso al análisis del problema, se propone el mapa conceptual mostrado en la Figura N° 1, donde cabe destacar que los principales componentes de la ruta de lectura son los suministros y los medidores. Este mapa conceptual permite conocer las principales entidades que intervienen en el proceso de lectura de medidores. También permite introducir y definir esos aspectos.

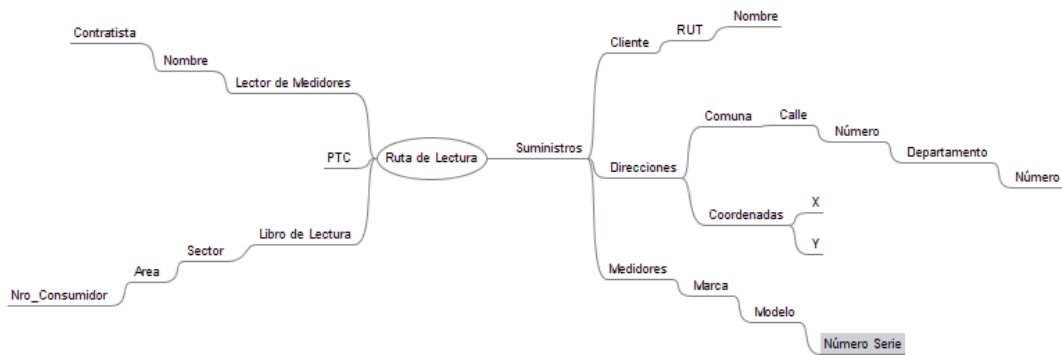


Figura N° 1 : Mapa Conceptual del Problema de Rutas de Lectura

La Tabla N° 1 muestra la descripción de cada una de las entidades que componen el mapa conceptual del problema modelado, indicando su nombre, descripción, nivel dentro de la jerarquía y su antecesor.

<b>Concepto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Nivel</b>	<b>Antecesor</b>
Ruta de Lectura	Entidad base que representa una ruta de lectura, es decir, el conjunto de medidores que un lector debe recorrer durante una jornada de trabajo.	0	Raíz
Suministros	Representación de los servicios otorgados a los clientes. Está asociado a una propiedad o bien raíz.	1	Ruta de Lectura
Cliente	Persona natural o jurídica que hace uso del servicio.	2	Suministros
Direcciones	Dirección de la propiedad en que se hace uso del suministro.	2	Suministros
Medidores	Elemento que permite registrar el consumo de energía eléctrica del suministro en una propiedad. Es el elemento que posee el dato que se debe registrar en el proceso de lectura.	2	Suministros
Coordenadas	Ubicación georeferenciada de la propiedad en que se entrega el suministro. En rigor, son las coordenadas geográficas de la ubicación del medidor. Se pueden obtener con GPS con corrección diferencial o mediante georeferenciación sobre una cartografía o foto digital.	3	Direcciones
Lector de Medidores	Persona que recorre los medidores según la ruta de lectura, y toma registro del valor de energía consumida de cada medidor.	1	Ruta de Lectura
PTC	Equipo portátil para registrar el valor de la lectura del medidor. En él se carga la ruta de lectura y se descarga el valor de las lecturas de cada medidor de la ruta.	1	Ruta de Lectura
Libro de Lectura	Secuencia de medidores que deben ser leídos en una jornada de trabajo.	1	Ruta de Lectura

Tabla N° 1: Descripción de Componentes del Mapa Conceptual

## 7.1 Análisis de Datos y Criterios de Simplificación

Para poder resolver el problema de optimización de rutas sobre 500.000 puntos es necesario realizar simplificaciones. Esto se requiere para poder resolver el problema en tiempos computacionales razonables (ver Tabla N° 1: Tiempo requerido para resolver el TSP). Las simplificaciones se orientan a generar grupos homogéneos más reducidos de medidores para ser considerados dentro del universo a optimizar. Para ello es importante conocer los siguientes aspectos propios del negocio de la lectura de medidores.

Las rutas de lectura se encuentran particionadas según los siguientes conceptos:

**Sector:** correlativo del día del periodo mensual al cual corresponde la ruta. Es un número que toma valores entre 1 y 20, por lo que existen 20 sectores. El promedio de lecturas por sector es de 23.686, siendo 29.129 el valor máximo, y 19.665 el mínimo. Se aprecia una baja desviación estándar entre los 20 sectores existentes. Estos valores se muestran en la Figura N° 2.

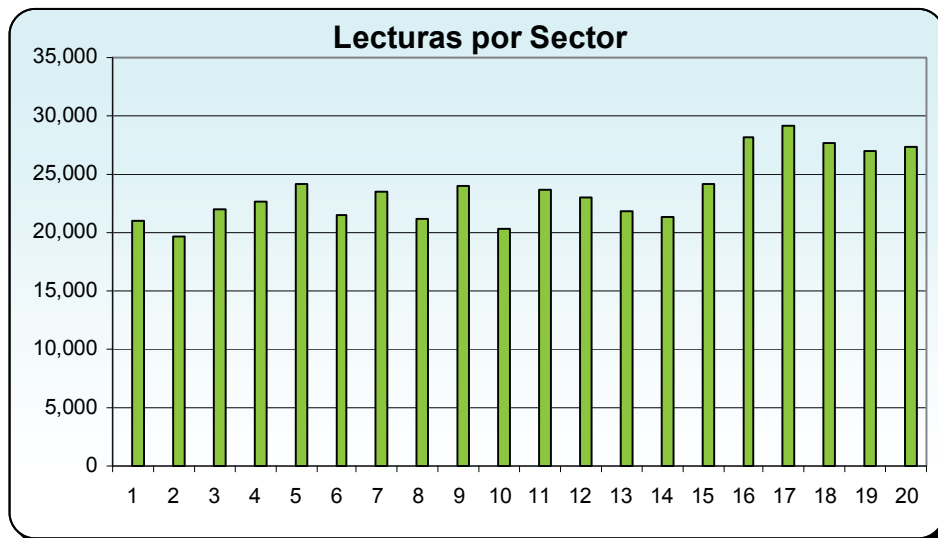


Figura N° 2: Cantidad de medidores por sector

**Área:** es un número que agrupa a todos los medidores de una zona geográfica común. Existen 223 áreas. A diferencia de los sectores, en las áreas existe una gran dispersión. Esto obedece a la ocurrencia de particularidades que hacen que la situación de terreno no sea homogénea. Por ejemplo, la existencia de baterías de medidores en edificios, o sectores rurales de baja densidad poblacional. El promedio de lecturas por área es de 2.124; siendo 7.495 el máximo, y 1 el mínimo. Estos valores se muestran en la Figura N° 3.

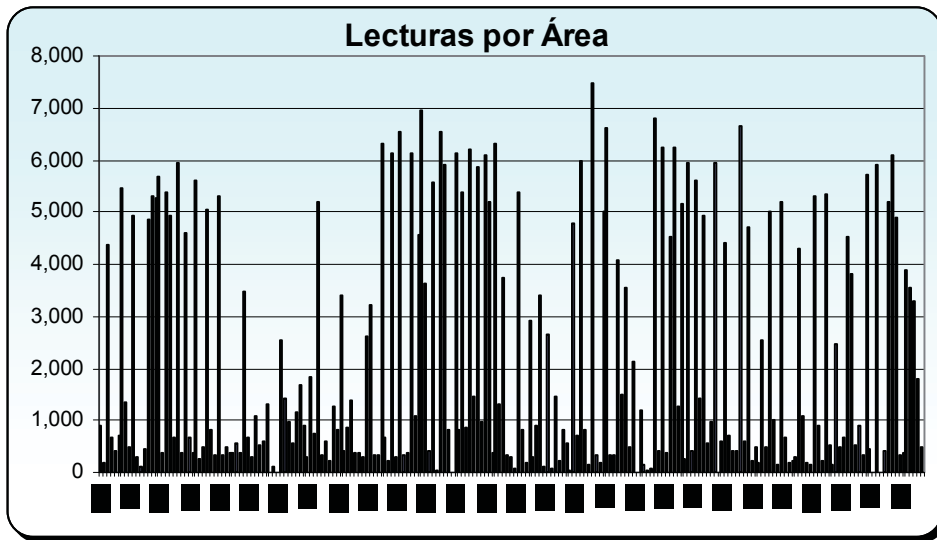


Figura N°3 : Cantidad de lecturas por área.

Sector-Área: agrupación de medidores que representa el trabajo de un lector en una jornada. La combinación de Sector-Área genera 2.062 rutas, es decir, 2.062 jornadas de trabajo que deben ser ejecutadas en 20 días. Esto implica un promedio de 103 lectores por día recorriendo el terreno. La cantidad máxima a leer en un día es de 1.341 medidores, siendo 1 medidor el mínimo. El promedio es de 230 medidores por lector por día. En la Figura N° 4 se aprecia una baja desviación estándar en la cantidad de lecturas por Sector-Área, salvo algunos puntos de mayor valor, que serán analizados posteriormente.

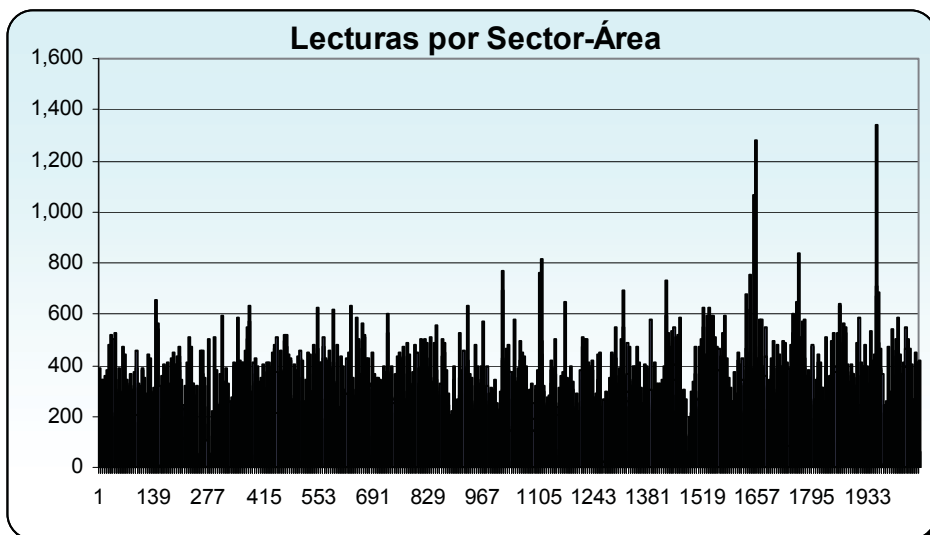


Figura N° 4: Cantidad de Lecturas por Sector - Área

Para poder realizar el análisis se utilizará como partida el universo total de 500.000 medidores, y se definirá un conjunto de muestra considerando los siguientes criterios de selección:

- Debe ser un conjunto completo de rutas de lectura
- Debe corresponder a un sector geográfico completamente contenido
- No debe tener medidores de rutas que no pertenezcan a la muestra
- Debe ser de un tamaño reducido, pero representativo
- Debe contener datos representativos de las particularidades, como sectores urbanos y rurales

Analizando los datos reales disponibles, se seleccionó una ubicación geográfica que tuviese las características anteriores, es decir una zona aislada, con componente urbana y rural, y que no tuviese medidores de otras rutas, junto con ser de un tamaño reducido.

La zona tiene la configuración de medidores en terreno indicada en la Figura N° 5, en la cual se aprecia lo indicado en los criterios de selección, es decir, existe una zona urbana de alta concentración, y una zona rural de una baja densidad poblacional. En los ejes del gráfico se representan las coordenadas de ubicación geográfica de cada medidor, en el sistema de referencia datum PSAD56 (nota: en geodesia un datum es un conjunto de puntos de referencia en la superficie terrestre en base a los cuales las medidas de la posición son tomadas y un modelo asociado de la forma de la tierra (elipsoide de referencia) para definir el sistema de coordenadas geográfico. El datum PSAD56 corresponde, dentro de otros, a la representación de Sudamérica).

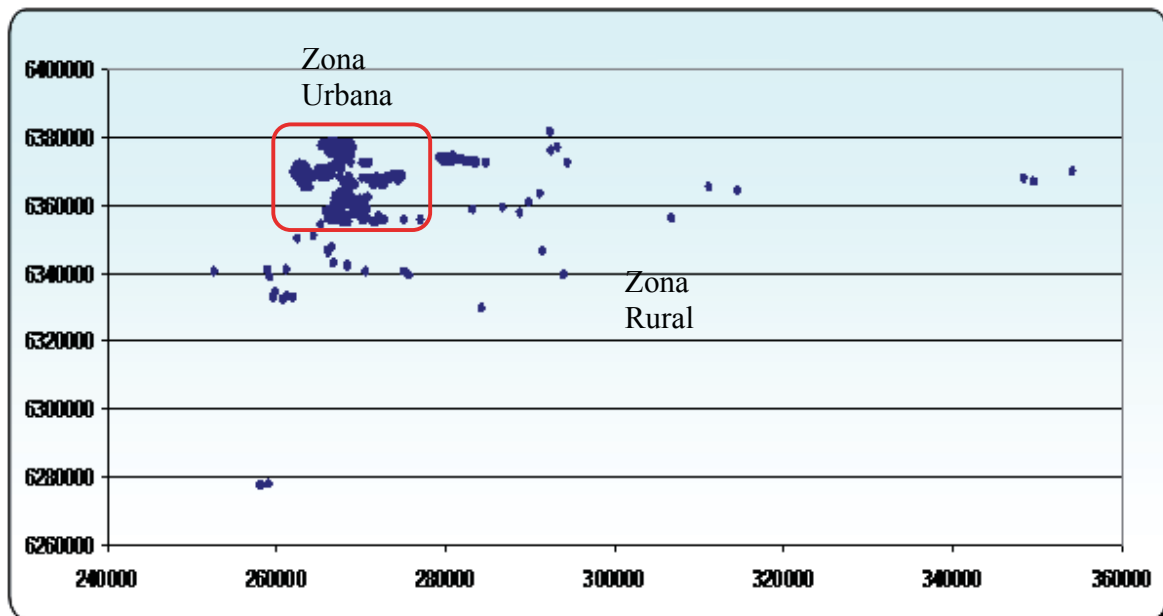


Figura N°5 : configuración de medidores de la zona de muestra

La cantidad de medidores de la muestra se resume en la Tabla N° 4, de la cual se puede extraer la siguiente información:

Cantidad de Medidores : 18.607  
 Cantidad de rutas (sector-área) : 65  
 Promedio de medidores por ruta : 286  
 Cantidad máxima de medidores por ruta : 629  
 Cantidad mínima de medidores por ruta : 1

Estos datos ratifican que la muestra es representativa del universo, correspondiendo además a un tamaño de un 4 % del total.

SECTOR	AREA						Total
	387	388	390	394	395	399	
1	278		267	252			797
2	193		227	254			674
3	49		242	220			511
4	198		231	238			667
5	209	29	225	248			711
6	217		331	244			792
7	41		218	207	202		668
8	251		222	201			674
9	427		481	261			1,169
10	2		629	415		1	1,047
11	248		251	303			802
12	293		309	170			772
13	305		232	402			939
14	350		256	56	297		959
15	321		307	338			966
16	327		287	597			1,211
17	303		266	425			994
18	398		573	365			1,336
19	525		545	313	306		1,689
20	539		358	332			1,229
<b>Total</b>	<b>5,474</b>	<b>29</b>	<b>6,457</b>	<b>5,841</b>	<b>805</b>	<b>1</b>	<b>18,607</b>

Tabla N° 2: Rutas de Lectura de la muestra seleccionada

Otro criterio de simplificación relevante es la existencia de tipo de ruta con comportamiento similar, lo que significa:

- Rutas coherentes: existen rutas cuyo comportamiento es el esperado. Es decir, no tienen particularidades.
- Rutas con alta concentración: son rutas que tienen muy poco desplazamiento, pero alta cantidad de medidores. Son representativas de la existencia de edificios.
- Rutas con particularidades: son rutas con alta coherencia geográfica, salvo por algunos pocos puntos. Se deberá analizar si estos puntos corresponden a particularidades del proceso, o si son errores.
- Rutas con pocos puntos: son rutas con una cantidad muy reducida de puntos. En general, menos de 10 puntos. Se deberá analizar si corresponden a particularidades o son errores.
- Rutas con muchos puntos: son rutas con una gran cantidad de medidores. En general, más de 500. Se deberá analizar si corresponden a particularidades de terreno, o son errores.

En las Figuras N° 6 a N°10 se entregan ejemplos reales de cada tipo de ruta. Lo relevante de esta clasificación es que para la validación del modelo se utilizarán rutas del tipo ‘coherentes’, es decir sin particularidades que puedan poner en duda la calidad de los datos.

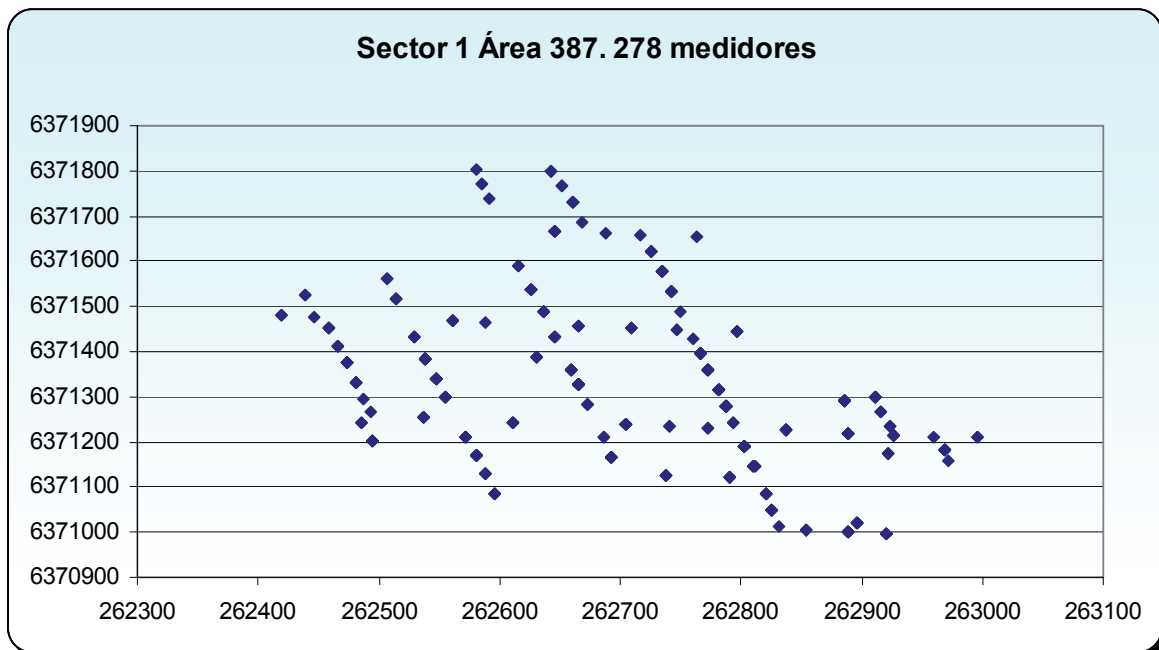


Figura N° 6: Ejemplo de Ruta Coherente

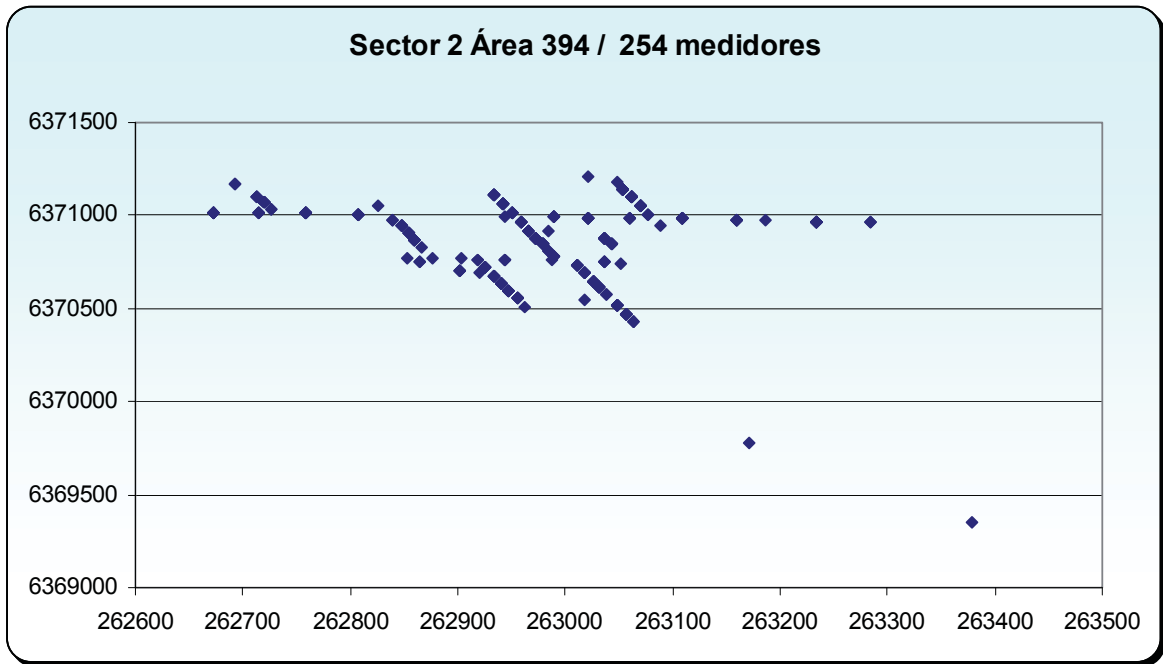


Figura N° 7: Ejemplo de Ruta de Alta Concentración

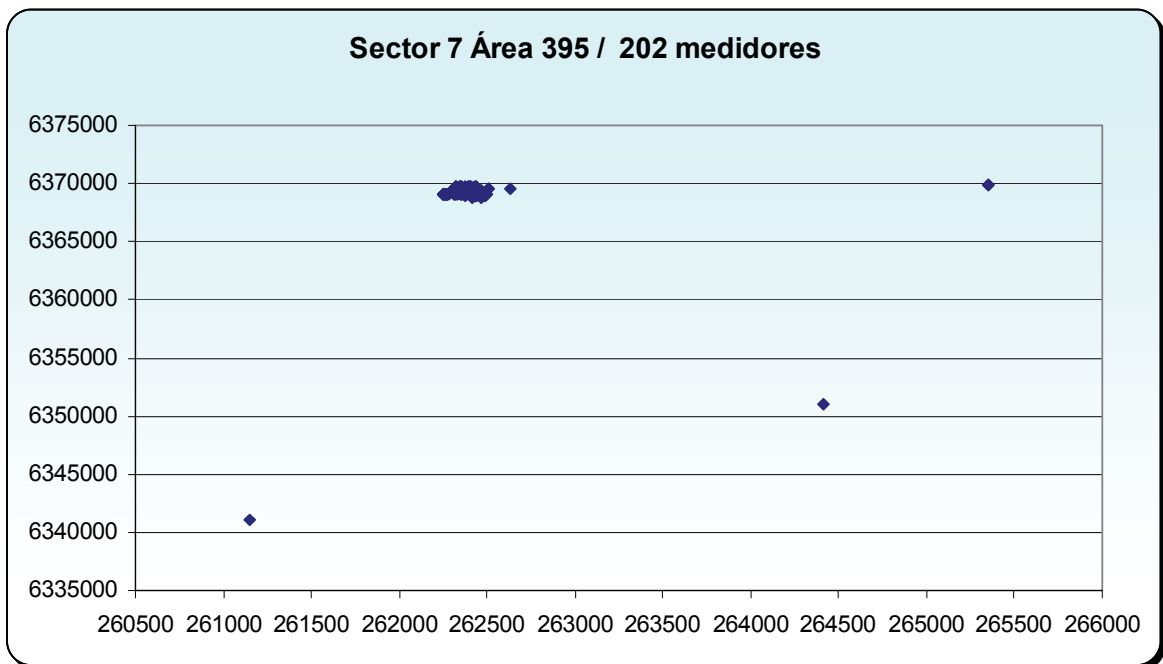


Figura N° 8: Ejemplo de Ruta con Particularidades



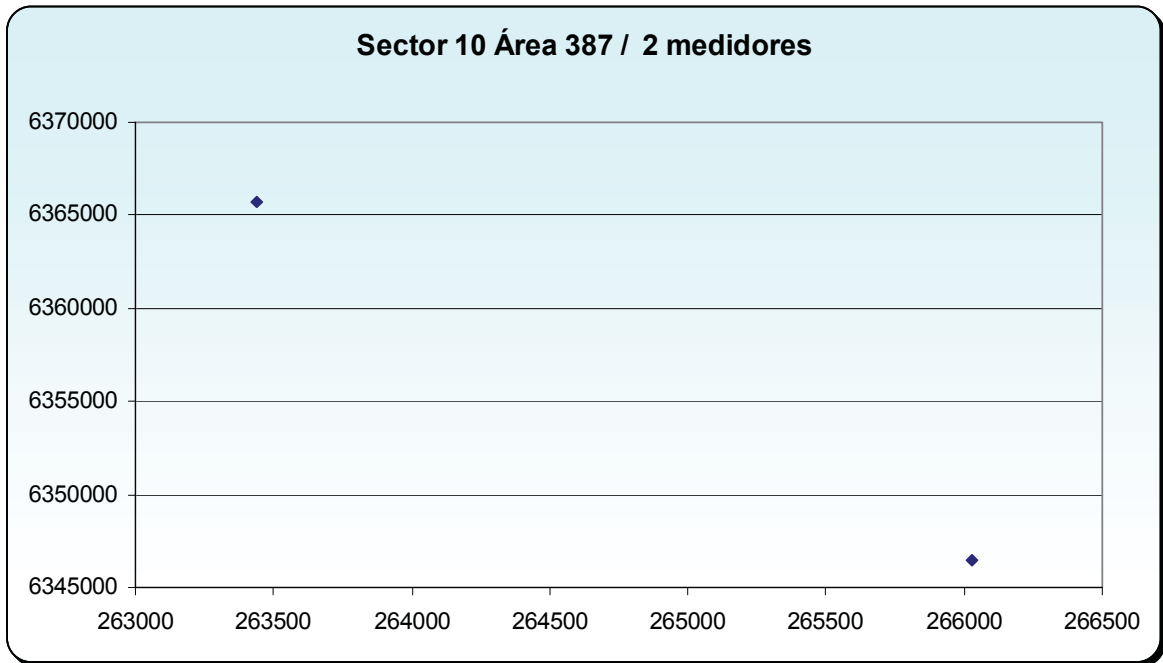


Figura N° 9: Ejemplo de Ruta con Pocos Puntos

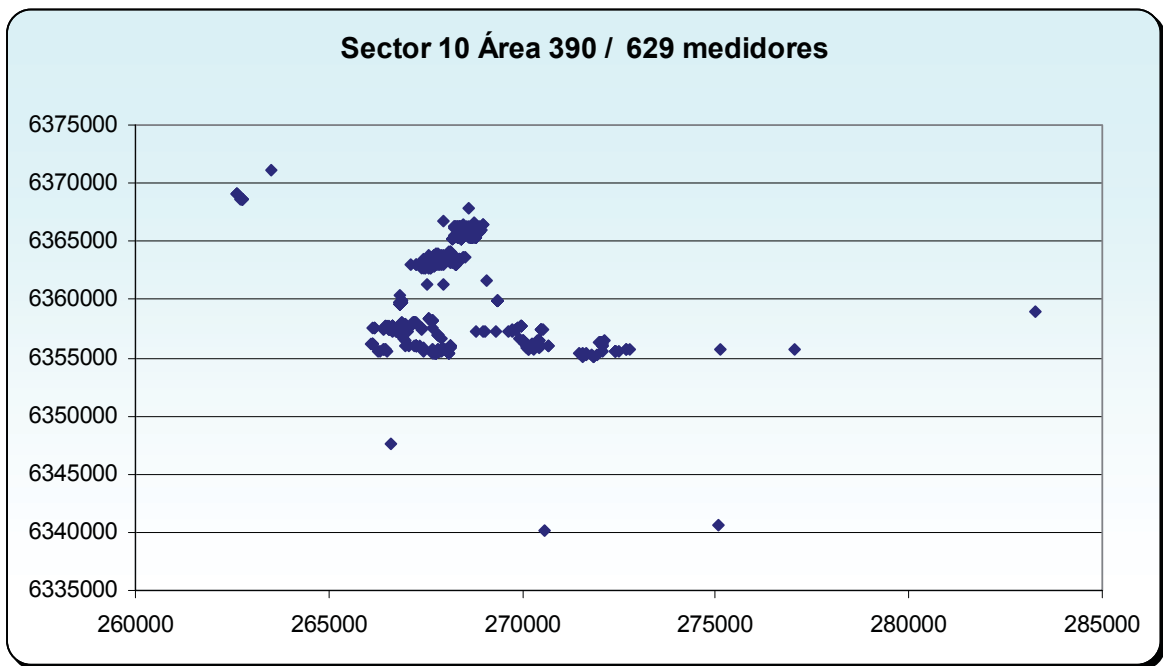


Figura N° 10: Ejemplo de Ruta con Muchos Puntos

## 7.2 Modelo de Costo de la Ruta

Para poder optimizar o proponer un modelo que mejore la situación actual, es necesario definir qué variable se desea controlar. Las posibles variables son cantidad de medidores, tiempo de lectura, tiempo de desplazamiento y distancia recorrida por ruta. La Tabla N° 3 muestra para cada variable su descripción, la mejora que se puede lograr, sus ventajas y desventajas.

Variable	Descripción	Mejora	Ventaja	Desventaja
Cantidad de Medidores	Cantidad de medidores que deben ser leídos en una ruta	Reducir la cantidad de medidores por ruta, de modo que correspondan a áreas geográficas contiguas	Se reduce el tiempo de desplazamiento por lector	Aumenta la cantidad de áreas, lo que implica que aumenta la cantidad de lectores, aumentando así el costo administrativo del proceso
Tiempo de Lectura	Tiempo que demora registrar una lectura, considerando el tiempo de espera de apertura de domicilio, el tiempo de acceso al medidor dentro del domicilio y el tiempo de saludo y despedida	Reducir el tiempo mediante personal más capacitado	Se reduce el tiempo necesario para realizar la tarea	La reducción del tiempo de registro puede generar errores en el registro, lo es una situación crítica. Reducir el tiempo dedicado al protocolo de saludo y despedida generará reacción adversa de los clientes
Tiempo de Desplazamiento	Tiempo que demora un lector en ir de un medidor al siguiente	Reducir el tiempo aumentando la velocidad de desplazamiento	Se reduce el tiempo necesario para realizar la tarea	Apuro excesivo en el desplazamiento aumenta la probabilidad de accidentes, lo cual es crítico
Distancia recorrida por Ruta	Distancia total de recorrido de una ruta	Reducir la distancia de la ruta, mediante la	Reduce el costo de la actividad, sin	Requiere modelo de optimización. Es sensible a la calidad de los datos

		definición de un nuevo recorrido de sus medidores	agregar riesgos en la calidad o en accidentes	
--	--	---	---	--

Tabla N° 3: Variables de Optimización del Modelo

Del análisis de ventajas y desventajas, y con el objetivo de lograr la mayor reducción de costo, de las cuatro variables relevantes del proceso se opta por definir la “Distancia Recorrida por Ruta” como la variable de interés para optimizar. Es decir, el costo de una ruta será medido por la distancia necesaria para recorrer todos los medidores de esa ruta. Esta elección supone que la velocidad de desplazamiento entre medidores es una constante, al igual que el tiempo de registro de la lectura.

Según lo anterior, la función de costo para 1 medidor está dada por la ecuación (1):

$$Dr_{jk} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \text{ [kms]}$$

Donde:

- $Dr_{jk}$  : distancia entre los medidores ‘j’ y ‘k’, de la ruta ‘r’ [kms]
- $x_i$  : coordenada georeferenciada ‘x’ del medidor ‘j’ [kms]
- $x_k$  : coordenada georeferenciada ‘x’ del medidor ‘k’ [kms]
- $y_i$  : coordenada georeferenciada ‘y’ del medidor ‘j’ [kms]
- $y_k$  : coordenada georeferenciada ‘y’ del medidor ‘k’ [kms]

Ecuación (1): Función de Costo para 1 Medidor

La ubicación de cada medidor se determina por sus coordenadas geodésicas (x,y) en datum PSAD 56.

En base al costo para 1 medidor, se puede obtener la función de costo para una ruta completa, la cual indicada por la ecuación (2).

$$D_r = \sum_{j=2}^{j=n} \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2} \text{ [kms]}$$

Donde:

- $D_r$  : distancia de recorrido de todos los medidores de la ruta 'r' [kms]
- $x_i$  : coordenada georeferenciada 'x' del medidor 'j' [kms]
- $x_{j-1}$  : coordenada georeferenciada 'x' del medidor 'j-1' [kms]
- $y_i$  : coordenada georeferenciada 'y' del medidor 'j' [kms]
- $y_{j-1}$  : coordenada georeferenciada 'y' del medidor 'j-1' [kms]
- $n$  : cantidad de medidores de la ruta 'r'

Ecuación 2: Función de Costo para 1 Ruta 'r'

Luego, dado un conjunto de 'n' coordenadas geodésicas (x,y) que representan la ubicación de cada medidor de la ruta 'r', el algoritmo de reducción de costo debe reordenar la secuencia de recorrido de estos puntos de modo que la distancia total recorrida  $D_r$  sea mínima, o menor que la actual.

### 7.3 Fuentes de Error en los Datos

Dentro del gran volumen de datos disponibles (500.000 rutas mensuales), muchos de ellos mantenidos en forma manual, no cabe duda alguna que existirán errores. La existencia de estos errores puede distorsionar de forma notoria los parámetros estadísticos de un conjunto de datos. Por lo anterior es importante identificar los tipos de errores, de modo de poder aislarlos en el análisis y validación del modelo.

Dentro de los tipos de errores identificados, están los siguientes:

- Error de Georeferenciación: corresponde a un medidor que tiene registradas unas coordenadas (x,y) distintas a las reales de terreno. Este error es de bastante recurrencia, y se identifica por la existencia de una gran distancia entre dos direcciones contiguas. El origen de este error se debe a la georeferenciación del dato, y/o al error de asociación a un punto de la red eléctrica (poste o cámara).
- Error de Definición de la Ruta: corresponde a una ruta definida en forma no ordenada, es decir que dos medidores geográficamente contiguos no se leen en forma consecutiva. El origen de este error se encuentra en la asignación manual de un suministro a una ruta, el momento de crear a un cliente en los sistemas de información. Esta actividad se realiza en forma manual frente a datos tabulares y no geográficos, lo que impide hacer una mejor asociación considerando la realidad de terreno.
- Error de Pertenencia a una Ruta: corresponde a medidores que forman parte de una ruta, pero que en terreno están claramente alejados, siendo razonable que pertenezcan a otra ruta. El origen de este error puede ser una asociación incorrecta, o la falta de actualización de las rutas respecto del crecimiento de las zonas geográficas y aparición de nuevas urbanizaciones, edificios y condominios.

Estos errores deberán ser tratados adecuadamente para que no distorsionen los resultados. El tratamiento tiene como requisito la detección de las situaciones anómalas, cuya solución puede ser el filtrado y eliminación, o la sustitución por un dato con mayor probabilidad de estar correcto. La definición dependerá de cada caso.

## 7.4 Evaluación de Costo de la Situación Actual

Tal como se indicó en el punto 3.2 Modelo de Costo de la Ruta, la función de costo queda determinada por la distancia total necesaria para recorrer la totalidad de los medidores de una ruta. Para poder validar el modelo de la ecuación (2) es importante seleccionar rutas que tengan la menor cantidad de errores, pues ellos pueden distorsionar los resultados. En base a la clasificación de errores indicado en el punto 7.3 Fuentes de Error en los Datos, y a los tipos de ruta ejemplificadas en las Figuras N°6 a N°10, se procederá a seleccionar la ruta de validación del modelo.

La Figura N°11 presenta la distancia total de recorrido por cada ruta. Se puede apreciar una gran dispersión de los recorridos por ruta, que estadísticamente se pueden resumir en lo siguiente:

Cantidad de Rutas	:	65 [rutas]
Distancia Total de todas las Rutas	:	8.051,5 [kms]
Distancia Promedio por Ruta	:	123,9 [kms]
Distancia Mínima por Ruta	:	0 [kms]
Distancia Máxima por Ruta	:	905,9 [kms]
Desviación Estándar de Distancia por Ruta	:	177 [kms]

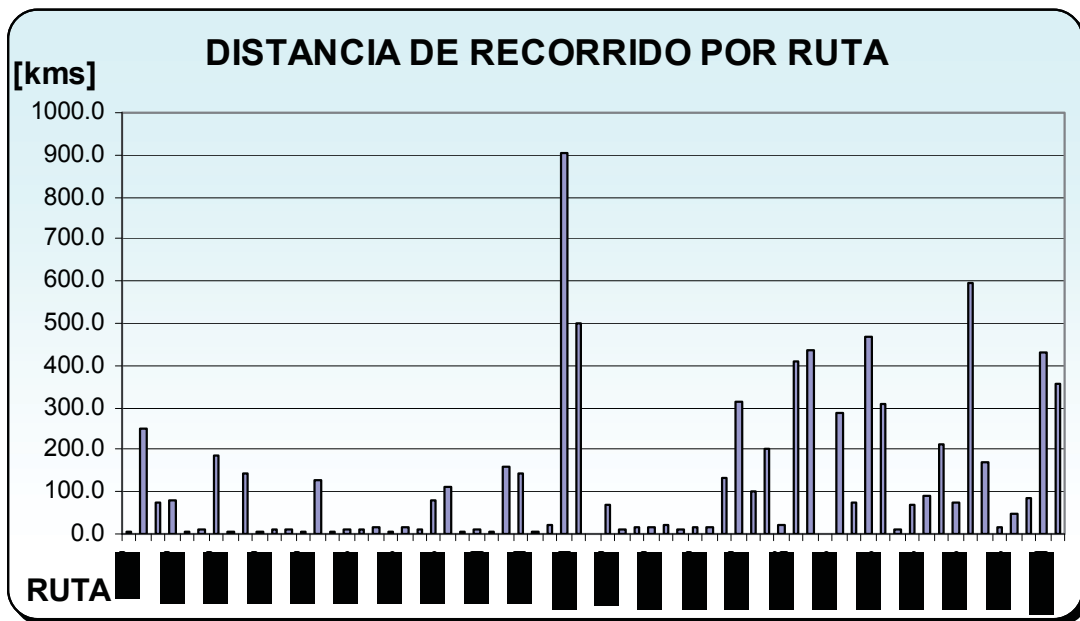


Figura 11 : Distancia de Recorrido por Ruta

La desviación estándar es mayor que el promedio, lo que indica que los datos están altamente dispersos. Dado que una ruta de lectura representa la cantidad de medidores que un lector puede registrar en un día, se espera

que las distancias entre rutas tengan una baja desviación estándar. Por otro lado, la distancia que puede recorrer un lector en un día está acotada. Por ejemplo, no es factible que un lector recorra más de 900 [kms] en una jornada de trabajo, siendo razonable no más de 30 [kms]. Debido a los errores existentes en los datos, se hace necesario definir criterios de filtrado de los mismos, para eliminar los errores de mayor relevancia para la función de costo.

Si se ordenan las rutas por distancia, se generan claramente 2 grupos de rutas. Esto se muestra en la Figura N°12, donde aproximadamente el 50% de las rutas tienen longitudes menores a 30 [kms], mientras que el 50% restante presenta valores mayores a 30 [kms] y hasta 900 [kms].

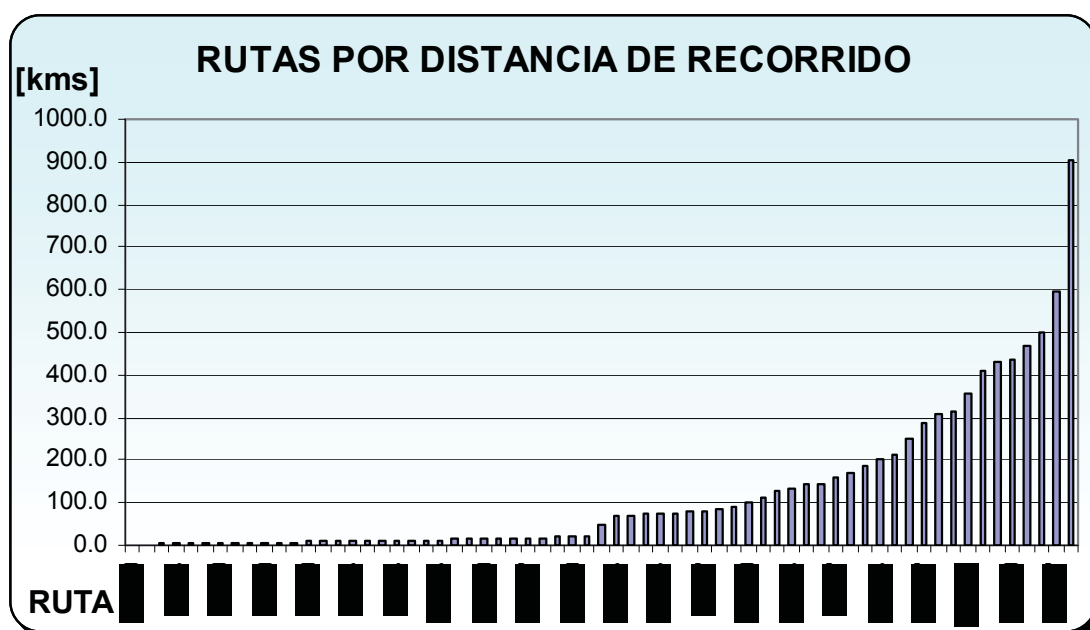


Figura 12 : Rutas por Distancia de Recorrido

GRUPO	A (dist. < 30 kms)	B (dist. >= 30 kms)
Cantidad de Rutas	32	33
Porcentaje de la Muestra	49.2%	50.8%
Distancia Total de todas las Rutas [kms]	344.5	7,706.9
Distancia Promedio por Ruta [kms]	10.8	233.5
Distancia Mínima por Ruta [kms]	0.0	49.1
Distancia Máxima por Ruta [kms]	23.6	905.9
Desviación Estándar de Distancia por Ruta [kms]	6.1	192.6

Tabla N° 4: Agrupación de rutas por longitud de recorrido

El detalle de las rutas del grupo A se muestra en la Tabla N° 5.

sector	area	sec_a	Distancia
10	399	10-399	0.0
15	394	15-394	1.3
5	387	5-387	3.4
8	394	8-394	3.7
9	394	9-394	4.9
8	387	8-387	5.0
3	390	3-390	5.3
5	390	5-390	5.6
4	387	4-387	5.7
2	390	2-390	6.6
1	387	1-387	7.0
6	394	6-394	7.9
7	390	7-390	8.2
6	387	6-387	8.4
4	394	4-394	9.5
5	394	5-394	9.7
11	390	11-390	10.1
4	390	4-390	10.9
2	394	2-394	12.2
17	390	17-390	12.5
8	390	8-390	12.5
12	394	12-394	13.2
6	390	6-390	14.6
12	387	12-387	15.6
13	390	13-390	16.1
11	394	11-394	16.9
7	387	7-387	17.0
13	387	13-387	17.8
19	394	19-394	17.8
10	387	10-387	19.4
12	390	12-390	22.1
14	395	14-395	23.6

Tabla N° 5: Detalle de las rutas del grupo A



El detalle de las rutas del grupo B se muestra en la Tabla N° 6.

sector	area	sec_a	Distancia
19	395	19-395	49.1
17	394	17-394	67.2
11	387	11-387	69.7
16	390	16-390	72.3
18	394	18-394	74.5
1	394	1-394	76.2
7	394	7-394	80.8
2	387	2-387	81.0
20	387	20-387	83.5
18	387	18-387	91.0
14	390	14-390	99.0
7	395	7-395	112.2
5	388	5-388	126.4
13	394	13-394	135.0
3	394	3-394	145.5
9	390	9-390	146.3
9	387	9-387	160.6
19	390	19-390	172.2
3	387	3-387	186.1
14	394	14-394	202.4
18	390	18-390	211.5
1	390	1-390	250.4
16	387	16-387	288.3
17	387	17-387	309.9
14	387	14-387	312.5
20	394	20-394	355.7
15	387	15-387	409.1
20	390	20-390	431.1
15	390	15-390	437.0
16	394	16-394	468.7
10	394	10-394	499.7
19	387	19-387	596.1
10	390	10-390	905.9

Tabla N° 6: Detalle de las rutas del grupo B

El grupo A, que equivale al 49,2% de la muestra, presenta valores esperables. Es decir, distancias diarias menores a 25 [kms], con un promedio de 10.8 [kms], y una desviación estándar de 6.1 [kms]. Por otra parte, el grupo B está conformado por rutas que escapan a los valores esperados. Por ejemplo, el 82% de este grupo tiene distancias diarias recorridas de más de 70 [kms], lo que escapa de la realidad de un lector de medidores.

Por lo anterior, se analizarán sólo las 32 rutas que componen el Grupo A. Las rutas del Grupo B se han eliminado de la muestra por presentar indicadores estadísticos que discrepan de la realidad de terreno.

Las distancias recorridas por ruta del Grupo A se muestra en la Figura N°13, donde se aprecian las distancias de recorrido menores a 25 [kms], que representan el costo de cada ruta.

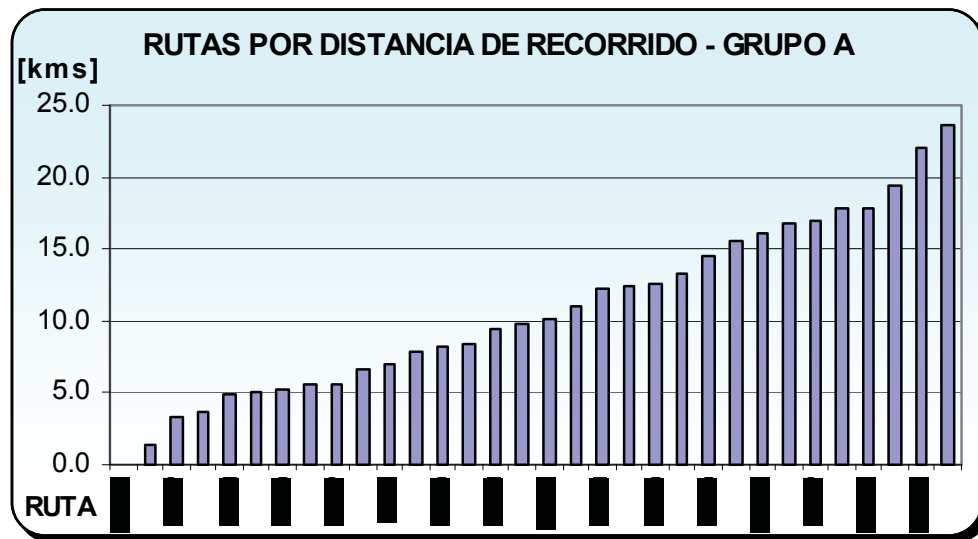


Figura 13 : Rutas por Distancia de Recorrido – Grupo A (dist. < 30 kms)

## 7.5 Modelo de Reducción de Costo

Dado que la función de costo es la distancia total recorrida por un lector para una ruta dada, el modelo de reducción de costo tendrá como objetivo determinar una secuencia de recorrido de los mismos medidores, tal que la distancia de recorrido total sea menor que la actual. El óptimo es encontrar la menor distancia posible para recorrer todos los medidores de la ruta.

El modelo opera en base a la evaluación de las múltiples opciones de recorrido de todos los medidores de una ruta, calculando el costo total de la ruta para cada caso, y luego seleccionando aquel recorrido que genere el mínimo costo.

El modelo incorpora las siguientes consideraciones que simplifican el algoritmo:

- a) El punto inicial de la ruta está dado, y es el actual primer medidor de cada ruta
- b) El punto siguiente a recorrer será aquel que esté a la menor distancia, dentro de todos los puntos restantes de la ruta

De acuerdo a lo anterior, se evaluarán sólo dos posibles recorridos, a saber:

- a) El recorrido actual
- b) El recorrido optimizado con el modelo propuesto

Posteriormente se evaluará si resultado del modelo efectivamente es una mejora respecto del recorrido actual.

## 7.6 Heurística de Solución del Modelo: vecino más cercano

Si bien la situación representada no es exactamente igual al problema del vendedor viajero (TSP), sí se puede hacer una buena analogía con éste. Las principales diferencias son las siguientes:

- En el TSP existe la restricción de finalizar el recorrido en el mismo punto de partida. Esta restricción no existe en el caso de estudio de ruta de lectura de medidores.
- En el TSP los puntos a recorrer están dispersos, ya que en su concepción inicial representan ciudades que se deben recorrer. En el caso de la ruta de lectura de medidores los puntos están muy cercanos, pues representan a casas contiguas.

Dado que este trabajo tiene una aplicación práctica real, y que la situación actual dista de esta optimizada, se ha priorizado en la simplicidad del modelo de modo de poder someter rápidamente a validación los datos y evaluar los resultados y beneficios prácticos.

Por lo anterior, y dentro de la revisión bibliográfica realizada, se ha optado por implementar la heurística denominada ‘vecino más cercano’, la cual se expone en el trabajo “Investigación de operaciones en acción: Heurísticas para la solución del TSP”, de los autores Roger Z. Ríos Mercado y José Luis González Velarde, publicado en ‘Ingenierías’ Octubre-Diciembre 2000, Vol. III, N° 9.

La heurística del vecino más cercano permite resolver problemas de optimización de recorridos mediante la búsqueda de óptimos locales, y no globales. Esta situación que podría parecer una desventaja, se transforma en ventaja por la simplicidad del algoritmo, su bajo costo computacional, y su buen desempeño respecto del óptimo global conceptual del problema del vendedor viajero. Por otra parte, la cercanía de los puntos en el problema de la ruta de lectura de medidores permite eliminar unos de los riesgos de esta heurística, que es la de ir incrementando las distancias en la medida que van quedando menos puntos disponibles en la muestra.

El algoritmo del ‘vecino más cercano’ opera de la siguiente manera.

- a) Selección de la ruta
- b) Cálculo del costo del actual recorrido
- c) Optimización del recorrido:
  - I. Obtiene coordenadas del punto actual
  - II. Calcula distancia a todos los otros puntos disponibles
  - III. Selecciona el punto a la menor distancia
- d) Retorna a c) hasta completar todos los puntos disponibles
- e) La distancia optimizada es la suma de las distancias seleccionadas en c).III.

En términos de diagrama de flujo, el modelo propuesto se muestra en la Figura N°14.

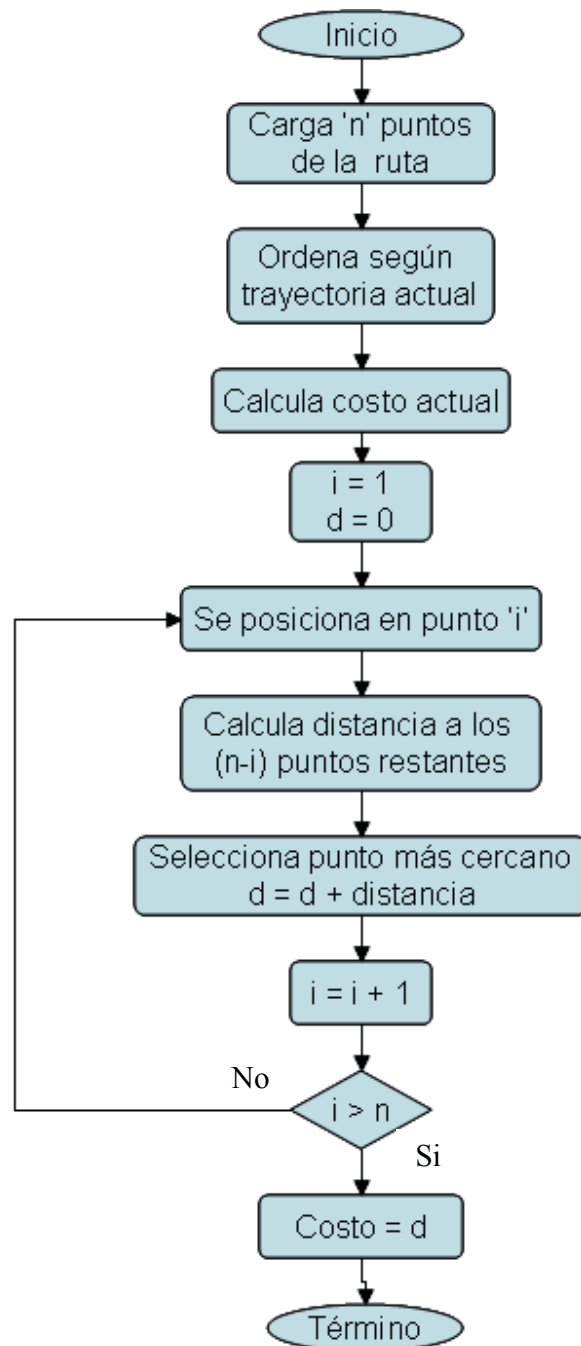


Figura 14: Diagrama de Flujo del Modelo Simplificado de Reducción de Costo

## 7.7 Matriz de Particularidades Tridimensionales

La heurística del ‘vecino más cercano’ está basada en encontrar el punto más cercano a la posición actual. Para determinar la cercanía, se calcula la distancia euclidiana indicada en la ecuación (2). Si bien este método de solución es de una gran simpleza y eficiencia computacional, presenta las siguientes desventajas:

- a) No considera la topografía del terreno, particularmente las cotas de elevación, o coordenada ‘z’. Es decir, el modelo asume que los puntos se encuentran en un plano perfecto  $(x,y)$ , siendo que en la realidad el terreno es irregular y tiene elevaciones, por lo que su representación más rigurosa es  $(x,y,z)$ .
- b) No considera las particularidades del terreno, como zanjas, canales, riachuelos, avenidas, semáforos, plazas, ferias, rejas, accesos, y en general, situaciones que impidan el libre desplazamiento en línea recta entre un punto y otro.

Para aumentar la fidelidad del modelo, sin aumentar su complejidad, se ha implementado el concepto de Matriz de Particularidades Tridimensionales (P3D) que permite considerar las dos situaciones recién descritas.

Sea :

$D_{ij}$  : Matriz de distancias entre puntos  $(i,j)$

$P3D_{ij}$  : Matriz de particularidades tridimensionales entre los puntos  $(i,j)$

$DP_{ij}$  : Matriz de distancias ponderadas por las particularidades tridimensionales

De modo que:

$$DP = D * P3D$$

Ecuación (3) : Ponderación de factores de ajuste tridimensionales

La matriz P3D está completa sólo de ‘1’ en el caso que no existan particularidades tridimensionales entre todos los puntos de la ruta. En caso que sí existan particularidades para algún grupo de puntos, entonces el elemento  $P3D(i,j)$  tendrá valores mayores a ‘1’, y crecientes en la medida que aumente el costo de traslado de ‘i’ a ‘j’.

Conceptualmente la matriz P3D modula las distancias de la matriz D, en función de las particularidades tridimensionales de la realidad del terreno. De este modo la resolución de la heurística del ‘vecino más cercano’ se realiza con mayor acercamiento a la realidad, y sin aumentar la complejidad ni el costo computacional de resolución.

Para efectos de optimización de los algoritmos, es importante mencionar que las matrices D y P3D con simétricas, ya que los lectores recorren a pie el terreno. Si se quisiera llevar este modelo a trayectorias recorridas por un móvil, la matriz P3D no sería simétrica pues debería considerar el sentido del tránsito de cada calle.

## 8 Implementación de la Solución

Para la implementación de la solución se consideraron los siguientes aspectos relevantes:

- a) Flexibilidad: existencia de parámetros que permitan afinar el comportamiento del modelo.
- b) Modularidad: solución modular que permite reemplazar sus componentes por otros, respetando los formatos de entrada y salida. De esta forma el modelo puede seguir siendo desarrollado y perfeccionado reutilizando el trabajo ya realizado.
- c) Escalabilidad: solución que permita procesar mayores volúmenes de datos sin necesidad de realizar ajustes a nivel de modelo o código fuente.
- d) Bajo costo: simplicidad en los algoritmos, estructuras de datos y tiempo de ejecución.

Para la implementación de la solución se utilizó el modelo resumido que se muestra en la Figura N°15.

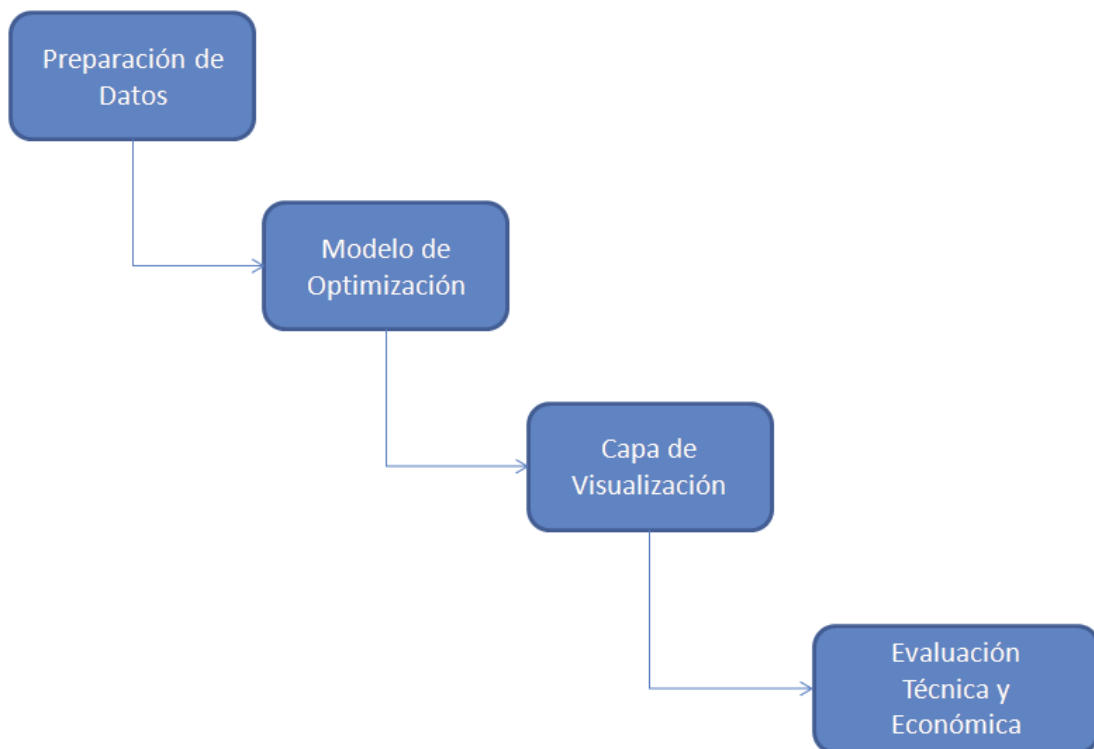


Figura 15: Implementación de la solución

El modelo detallado de la solución implementada se presenta en la Figura N°16.

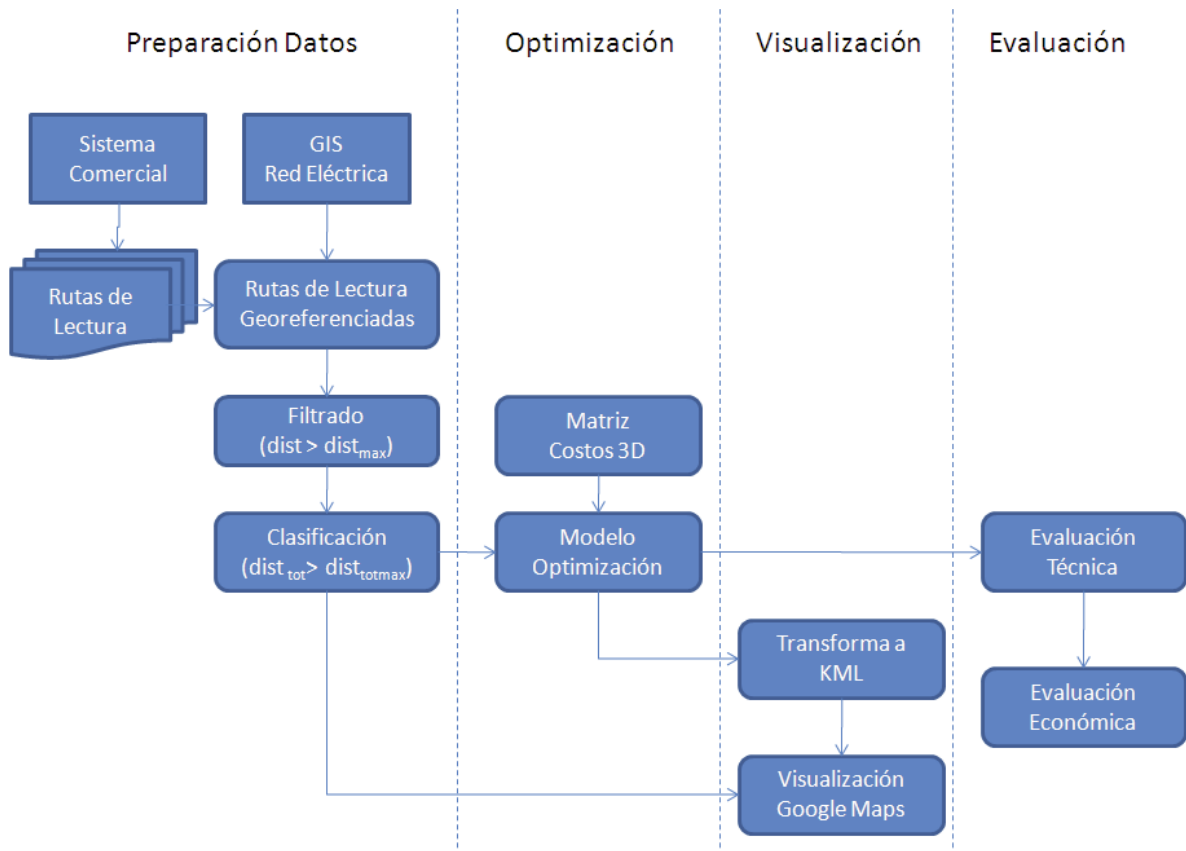


Figura 16: Detalle de la implementación

A continuación se detalla cada uno de los pasos considerados en la implementación de la solución a la optimización de rutas de lectura de medidores.



## 8.1 Preparación de Datos

### 8.1.1 Sistema Comercial Rutas de Lectura

El Sistema Comercial contiene todos los datos y funcionalidades de soporte al proceso comercial de la empresa. Esto incluye la información de los clientes, sus servicios, cobros y pagos, solicitudes, incidentes, crédito y cobranza, entre otros. Dentro de este sistema residen las *Rutas de Lectura*, que corresponden a un ordenamiento geográfico-temporal de los medidores de los servicios a clientes que un lector puede recorrer en una jornada laboral. La ruta de lectura se identifica por una triada única: sector-área-número de consumidor. El número de consumidor indica la secuencia del recorrido de lectura para un sector-área.

### 8.1.2 Sistema de Información Geográfico

El Sistema de Información Geográfico (llamado también SIG o GIS) contiene todos los datos de la red eléctrica y la planimetría asociada. Cada objeto ingresado al Sistema de Información Geográfico tiene coordenadas (x,y,z) que lo ubican espacialmente. El sistema de coordenadas del SIG es PSAD 56.

### 8.1.3 Rutas de Lectura Georeferenciadas

En el Sistema Comercial se encuentran las rutas de lectura; pero no están georeferenciadas. Para lograr georeferenciarlas se deben asociar con la información del GIS mediante la relación descrita en la Figura N° 17.

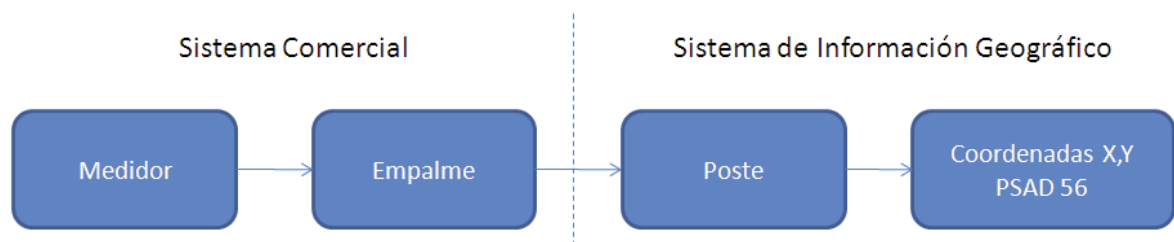


Figura 17: Georeferenciación de Medidores

En el SIG se encuentra la relación servicio-poste, mediante el empalme que conecta el medidor con la red eléctrica. Cada poste posee coordenadas georeferenciadas, por lo que el modelo finalmente es de medidor-poste de

conexión. Esto permite reducir la diversidad de puntos a analizar por el modelo, ya que en general un poste tiene conectados varios servicios (medidores).

## 8.2 Filtrado de Rutas

Una vez que se dispone de las rutas de lectura georeferenciadas, se procede a realizar un filtrado para eliminar los datos erróneos. Este filtrado se realiza identificando aquellos medidores georeferenciados que se encuentran a una distancia mayor que un umbral dado. A modo de ejemplo se entregan los casos de la Figura N° 18, en la cual los puntos encerrados en rojo deben ser filtrados.

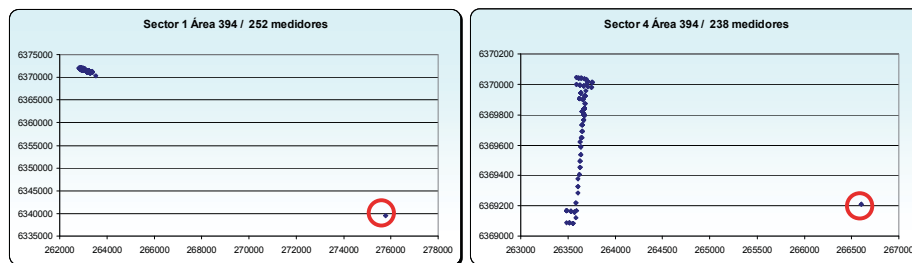


Figura 18: Ejemplo de rutas que requieren filtrado

En ambos casos se observan puntos claramente desviados del centroide de la ruta. Estos puntos no corresponden a la realidad de terreno de la ruta, y obedecen a problemas o errores de datos y /o administrativos. Por lo anterior, y para no contaminar los resultados, estos puntos son filtrados (eliminados) de la ruta que se analizará.

La función de filtrado se muestra en la ecuación (4).

$$\text{Si } dist(Med_x, \text{centroide\_ruta}) > F_d * \sum_{k=1}^{n-1, k < x} dist(Med_k, Med_{k+1}) \Rightarrow \text{eliminar}(Med_x)$$

Donde:

- $F_d$  es un factor de distancia que regula el porcentaje del recorrido total de la ruta que se definirá como umbral de filtrado. En general  $F_d < 10\%$ .
- $\text{centroide\_ruta}$  es el punto promedio de todos los puntos de la ruta, es decir  $(x,y)$  tal que  $x = \text{promedio de } x\text{'s de los puntos de la ruta}$ ; y  $y = \text{promedio de } y\text{'s de los puntos de la ruta}$ ;

Ecuación 4: Modelo de Filtrado de Medidores por Distancia

### 8.3 Clasificación de Rutas

Dado que el parámetro de filtrado de medidores es la distancia de la ruta completa y la distancia de cada punto al centroide de la ruta, es un método exitoso para detectar y eliminar puntos aislados manifiestamente erróneos, tal como se muestra en la Figura 19. Sin embargo, no es un método efectivo para detectar situaciones donde el error no es una excepción, sino que es la regla general. Para poder detectar estos casos, se utilizó el concepto de clasificación de las rutas mostrado en la ecuación (5).

$$\begin{aligned} \text{Si } \sum_{k=1}^{n-1} \text{dist}(\text{Med}_k, \text{Med}_{k+1}) < \text{Dist}_{\max} &\Rightarrow \text{GrupoA} \\ \text{Si } \sum_{k=1}^{n-1} \text{dist}(\text{Med}_k, \text{Med}_{k+1}) \geq \text{Dist}_{\max} &\Rightarrow \text{GrupoB} \end{aligned}$$

Ecuación 5: Modelo de Clasificación de Rutas

Donde  $\text{Dist}_{\max}$  es la máxima distancia que se espera tenga una ruta, considerando que es la distancia que un lector puede recorrer en una jornada de trabajo. Para efectos de este estudio, se utilizó  $\text{Dist}_{\max} = 30$  [km]. Sin embargo es un parámetro que se puede ajustar en estudios futuros.

Sólo fueron consideradas en el estudio las rutas filtradas y clasificadas en el Grupo A. Se asume que las rutas clasificadas en el Grupo B tienen una mayor existencia de errores de datos y administrativos.

### 8.4 Optimización

#### 8.4.1 Matriz de Costos Tridimensional

La matriz de costos tridimensional pondera las distancias euclidianas entre medidores, de modo que a mayor dificultad de desplazamiento entre dos puntos (i,j), mayor es el valor del elemento (i,j) de la matriz. Por defecto la matriz es unitaria, y por excepción se modifican sólo los elementos en que ocurren particularidades en terreno que dificultan el desplazamiento desde el punto 'i' al 'j'. De esta forma el modelo puede considerar el real costo de traslado entre dos puntos, reconociendo que puede existir otra pareja de datos cuya distancia sea igual, o incluso mayor, pero cuyo costo de traslado pueda ser menor.

La matriz de costo tridimensional es una consideración conceptual que ayuda a representar de mejor modo la realidad, manteniendo la simplicidad del modelo. No obstante lo anterior, ajustar los elementos de la matriz puede

resultar complejo, pues en la gran mayoría de los casos se deberá disponer de datos referenciales de recorridos reales en terreno.

#### 8.4.2 Modelo de Optimización

El modelo de optimización está basado en la heurística de óptimo local denominada “vecino más cercano”. Este modelo destaca por su simpleza y efectividad para determinar recorridos óptimos. En rigor logra generar un recorrido mejorado respecto del original, considerando que la mejor ruta es aquella que une un punto con el más cercano. La simplicidad queda demostrada por la cantidad de cálculos de distancia que este algoritmo realiza, a saber:

Vecino Más Cercano:  $\sum_{i=1}^n i$  cálculos de distancia (es decir, sumatoria);

Donde:

‘n’: cantidad de puntos de la ruta a optimizar;

‘i’: distancia entre el punto ‘n’ y el ‘n-1’

La solución exhaustiva implica  $i!$  cálculos de distancia (es decir, factorial). Sin embargo mediante la heurística de vecino más cercano, se logra reducir de  $i!$  a sólo  $\sum_{i=1}^{n-1} i$  cálculos de distancia, lo que representa un gran beneficio dada la simplicidad del modelo.

## 8.5 Presentación de Resultados

### 8.5.1 Transformación a archivo KML

Es relevante indicar que la capa de visualización en Google Earth utiliza el sistema de coordenadas WGS84, por lo que es necesario previamente realizar la transformación de las coordenadas desde PSAD56 a WGS84. Esta función se realizó utilizando el programa ‘Franson CoordTrans v2.3’.

Para la capa de presentación se eligió una plataforma flexible y masiva, para así facilitar el desarrollo de futuras aplicaciones del modelo propuesto, como también para reducir el costo evitando desarrollar sistemas de despliegue geográfico de datos. La plataforma seleccionada fue Google Earth, que es de distribución libre, masiva y está documentada para los desarrolladores.

La forma que tiene Google Earth de expandir sus funcionalidades e incorporar datos externos es mediante archivos XML específicos, denominados KML (Keyhole Markup Language). Estos archivos utilizan directivas documentadas que Google Earth transforma en información georreferenciada y atributiva.

Un ejemplo de archivo KML se muestra en la Figura N° 19, donde se presenta una sección del archivo.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2">
  <Placemark>
    <name>Medidor 1</name>
    <description>Cliente 12345</description>
    <Point>
      <coordinates>-35.843868,43.360758,0</coordinates>
    </Point>
  </Placemark>
</kml>
```

Figura N° 19: Sección de archivo KML

### 8.5.2 Presentación en Google Earth

Para poder utilizar Google Earth como capa de presentación de los resultados, se debe proceder a cargar en él los archivos KML antes generados. Esta operación se realiza mediante la opción ‘Abrir’ de Google Earth, tal como se muestra en la Figura N° 20.

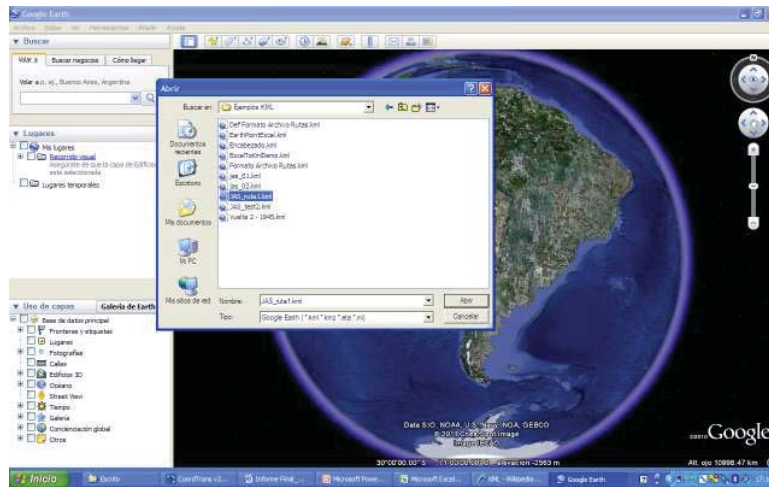


Figura 20: Carga de archivo KML en Google Earth

Al cargar el archivo KML, Google Earth realiza una completa revisión de sintaxis, formato y completitud. Si todas las validaciones son exitosas, entonces se despliega en forma automática la ubicación e identificación de los medidores y la trayectoria de la ruta de lectura, tal como se representa en la Figura N° 21, mediante línea roja y también en la sección de lugares, donde cada medidor es un lugar.

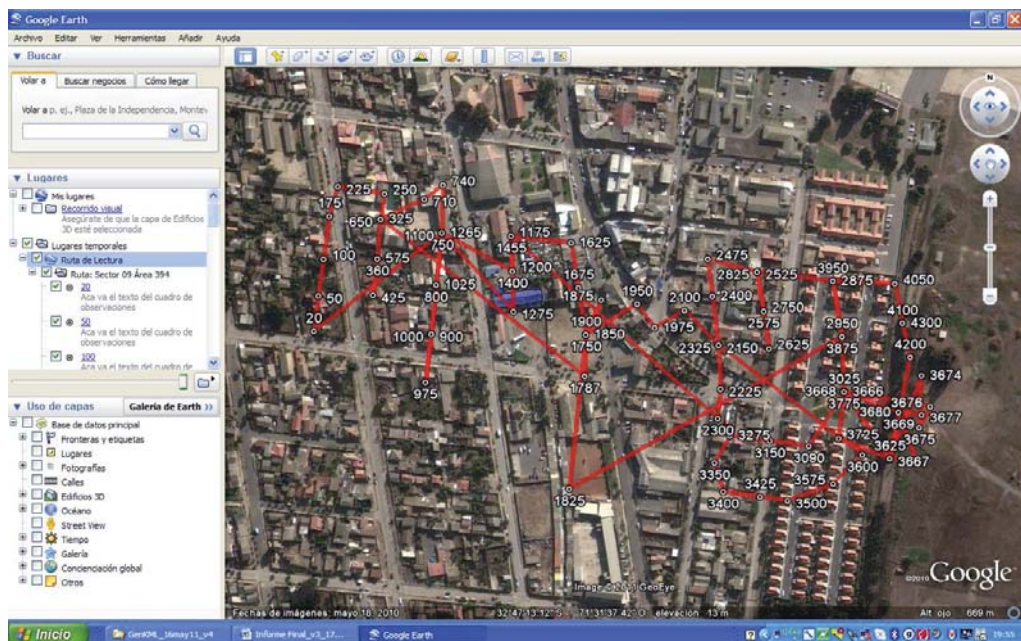


Figura 21: Ruta de lectura desplegada en Google Earth

## 9 Evaluación

### 9.1 Evaluación Técnica

La evaluación técnica de la optimización está dada por la comparación entre las distancias totales recorridas por la ruta pre y pos optimización. Si no hay optimización, el factor de evaluación técnica es 1. A menor distancia resultante (mayor optimización), el factor de evaluación técnica es mayor a 1. Es decir se tiene la relación de la ecuación (6).

$$Factor\_Optimización = \frac{Dis\ tan\ cia\_Total\_Ruta\_Original[km]}{Dis\ tan\ cia\_Total\_Ruta\_Optimizada[km]}$$

Ecuación 6: Factor de Optimización

El Factor\_Optimización tiene un impacto directo en la Evaluación Económica, por cuanto determina la cantidad de horas-hombre requeridas para recorrer la nueva ruta.

### 9.2 Evaluación Económica

La evaluación económica se basa en cuantificar el costo económico inicial de la ruta, y compararlo con el costo de la ruta optimizada. El Factor\_Optimización aplica en forma directa sobre los costos, obteniendo la relación de la ecuación (7).

$$Factor\_Ahorro = \frac{Costo\_Total\_Ruta\_Optimizada[\$]}{Costo\_Total\_Ruta\_Original[\$]}$$

Ecuación 7: Factor de Ahorro

Como objetivo de proyecto, se debe lograr factores de ahorro que justifiquen el costo de inversión de la implementación comercial del modelo propuesto. Por lo tanto, se espera obtener un conjunto de Factor\_Ahorro menores a 1.

### 9.3 Evaluación del Modelo Reducción de Costo

El Modelo del Vecino Más Cercano ponderado con la Matriz de Particularidades Tridimensionales (VMCP3D) fue implementado en Delphi. La visualización de los resultados inicialmente se realizó con Microsoft Excel, y posteriormente en Google Earth. Se evaluó el modelo en varias rutas del seleccionado Grupo A. Previo a lo anterior, y a modo de validación, se sometió el modelo a datos de prueba con 4, 10 y 20 puntos.

Los resultados se muestran en la Figura N° 22. En la columna izquierda está la situación inicial, y en la columna de la derecha la trayectoria resultante del modelo de optimización propuesto.

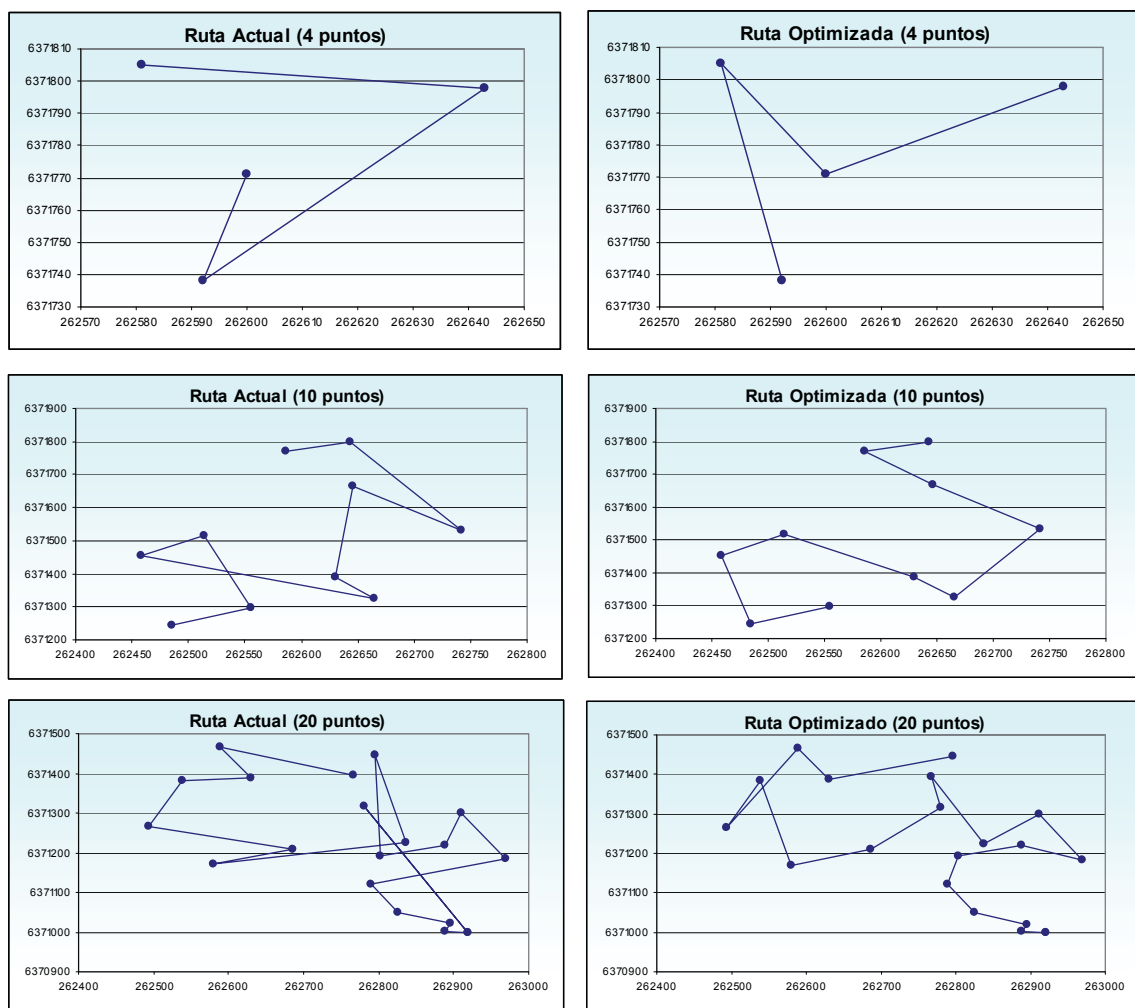


Figura 22: Ejemplos de validación del modelo propuesto

Se aprecia de los gráficos anteriores la optimización de la distancia, o reducción del costo de recorrer la ruta, lo que se puede notar mediante la eliminación de cruces del modelo optimizado. En promedio, reducción de costo



obtenida es de un 30%. Sin embargo, la muestra de datos de prueba no es estadísticamente representativa, por lo que este porcentaje de mejora no se puede extrapolar al resto de rutas reales. El mismo modelo anterior se sometió a algunas rutas reales seleccionadas dentro del Grupo A. A continuación se muestran algunos resultados obtenidos.

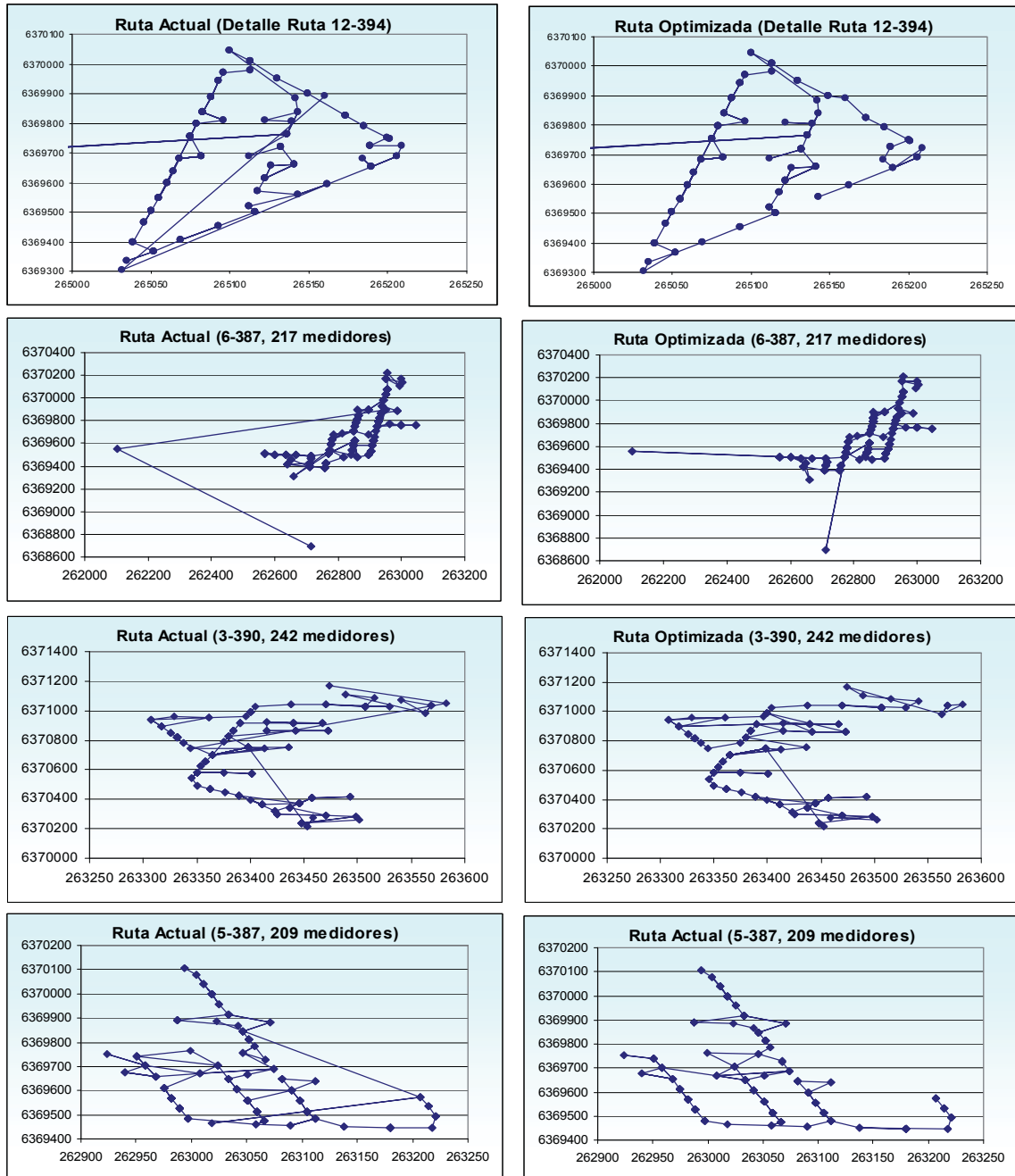


Figura 23: Resultados del modelo propuesto para datos reales

## 9.4 Análisis de Resultados Teóricos

Se sometió a las rutas del Grupo A al modelo del ‘Vecino Más Cercano con Ponderación 3D’. El resumen de los resultados de la aplicación del modelo se entrega en la tabla N° 7:

RUTA	DISTANCIA [km]		OPTIMIZACIÓN [%]
	ORIGINAL	OPTIMIZADA	
10-387	19.4	15.7	18.8%
10-399	0.0	0.0	-
11-390	10.1	8.6	14.7%
11-394	16.9	14.0	16.8%
12-387	15.6	14.9	4.9%
12-390	22.1	20.2	8.8%
12-394	13.2	12.3	7.4%
13-387	17.8	16.7	6.0%
13-390	16.1	13.7	14.8%
1-387	7.0	6.3	9.9%
14-395	23.6	20.0	15.5%
15-394	1.3	1.1	15.2%
17-390	12.5	10.1	19.2%
19-394	17.8	17.7	0.6%
2-390	6.6	6.4	4.2%
2-394	12.2	9.8	19.3%
3-390	5.3	4.7	11.9%
4-387	5.7	4.6	19.1%
4-390	10.9	10.7	2.6%
4-394	9.5	7.8	18.0%
5-387	3.4	2.9	13.0%
5-390	5.6	5.2	7.7%
5-394	9.7	7.9	19.2%
6-387	8.4	7.8	7.8%
6-390	14.6	12.0	17.4%
6-394	7.9	7.0	11.4%
7-387	17.0	16.3	4.0%
7-390	8.2	8.0	1.8%
8-387	5.0	4.8	3.1%
8-390	12.5	10.5	16.0%
8-394	3.7	3.5	7.0%
9-394	4.9	4.5	7.1%

Tabla N° 7: Estadísticas de la evaluación con datos reales

La ruta 10-399 tiene Distancia = 0 porque está compuesta sólo por 1 medidor. Para todo el resto de rutas, las mejoras que genera el Modelo van desde un 0,6% a un 19,3%. La mejora global del universo de muestra es de un 11.1%, lo que se considera exitoso dada la simplicidad del modelo.

En el figura N° 24 se presenta un gráfico de Distancia de la Ruta v/s Porcentaje de Optimización resultante del modelo. Se aprecia en la figura que no existe una tendencia o relación clara entre ambas variables. Es decir, el porcentaje de optimización no depende de la distancia original de la ruta.

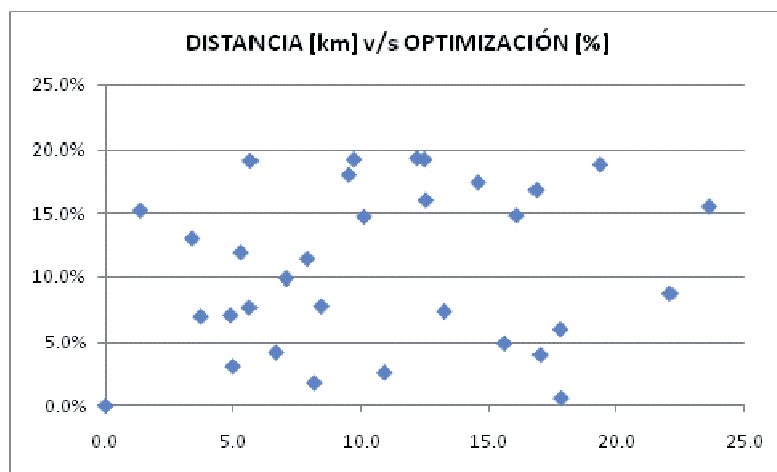


Figura 24: Distancia Original v/s Porcentaje de Optimización

En la Figura N° 25 se entrega el gráfico de Cantidad de Medidores v/s Porcentaje de Optimización, concluyendo que no existe una relación entre la cantidad de medidores de una ruta y el porcentaje de optimización logrado.

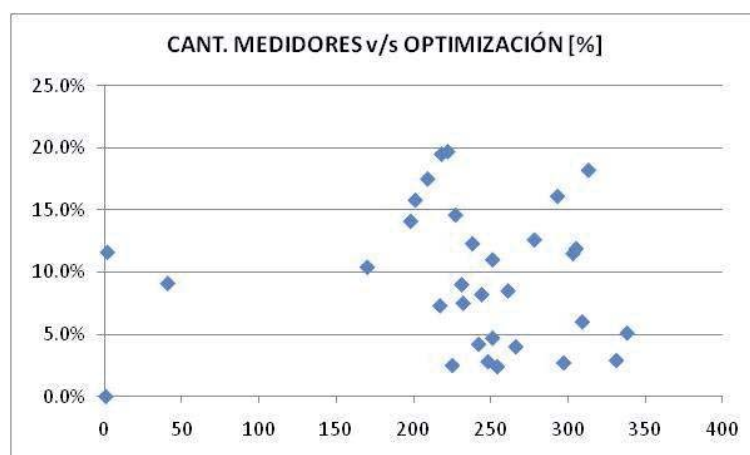


Figura 25: Cantidad de Medidores v/s Porcentaje de Optimización

## 9.5 Análisis de Resultados Prácticos

Para ser consistente con el carácter práctico del trabajo y del beneficio buscado, se realizó un recorrido completo de una ruta optimizada por el modelo propuesto. Para seleccionar la Ruta de Referencia se consideraron los siguientes aspectos:

- Que perteneciera a la zona de muestra
- Que perteneciera al grupo denominado 'A', es decir, rutas de extensión menor o igual a 30 kms.
- Que tuviese alta dispersión de medidores, para así evitar las rutas con concentración de edificios y/o baterías de medidores

Dentro del conjunto de rutas que cumplen con las restricciones anteriores, se seleccionó como Ruta de Referencia la 13-387, compuesta por 216 medidores, y cuya cobertura se presenta en la Figura N° 26.

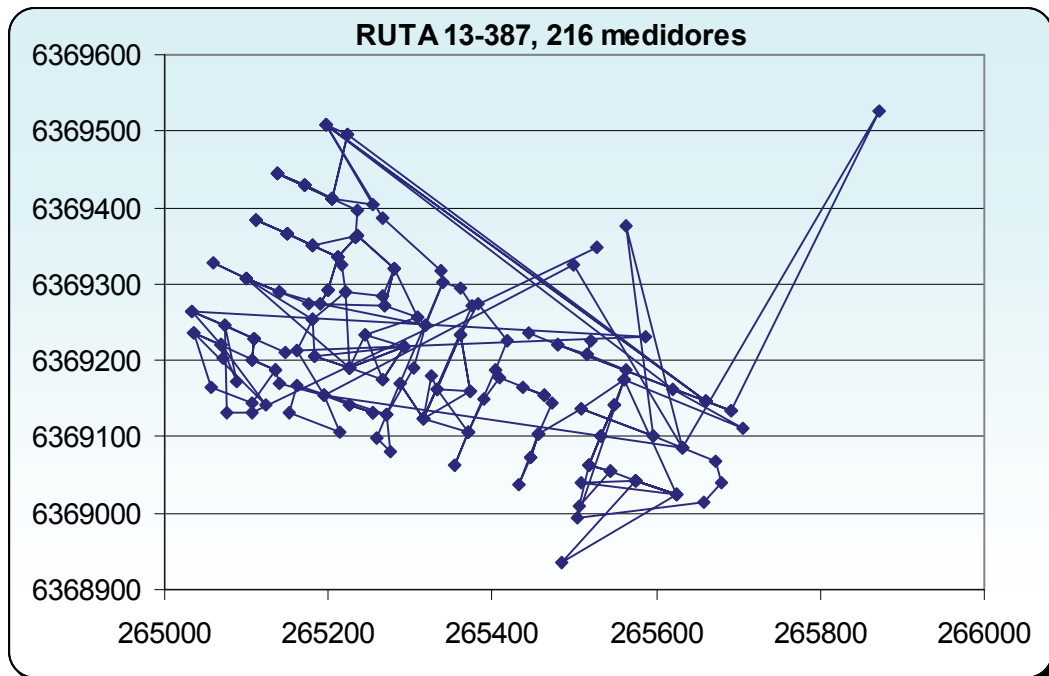


Figura N° 26: Ruta de Referencia

Los parámetros característicos de esta Ruta de Referencia son:

Cantidad de Medidores	:	216
Distancias:		
Total	:	17.786 [mts]
Mínimo tramo	:	2.23 [mts]
Máximo tramo	:	587 [mts]
Tramo promedio	:	82 [mts]
Desv. Estándar	:	107 [mts]

Del trabajo en terreno se identifica que la Ruta de Referencia no es completamente leída en un día, lo que se contrapone a la definición de Ruta de Lectura. Esta particularidad no recogida por el modelo se origina principalmente en la dificultad para acceder al 100% de los medidores de una ruta.

Para el caso de la Ruta de Referencia, las lecturas finales se realizaron de la siguiente forma:

Día 1	:	189 medidores	(87 %)
Día 2	:	27 medidores	(13 %)

La ruta descrita para el Día 1 se presenta en la Figura N° 27, mientras que la ruta del Día 2 se entrega en la Figura N° 28.

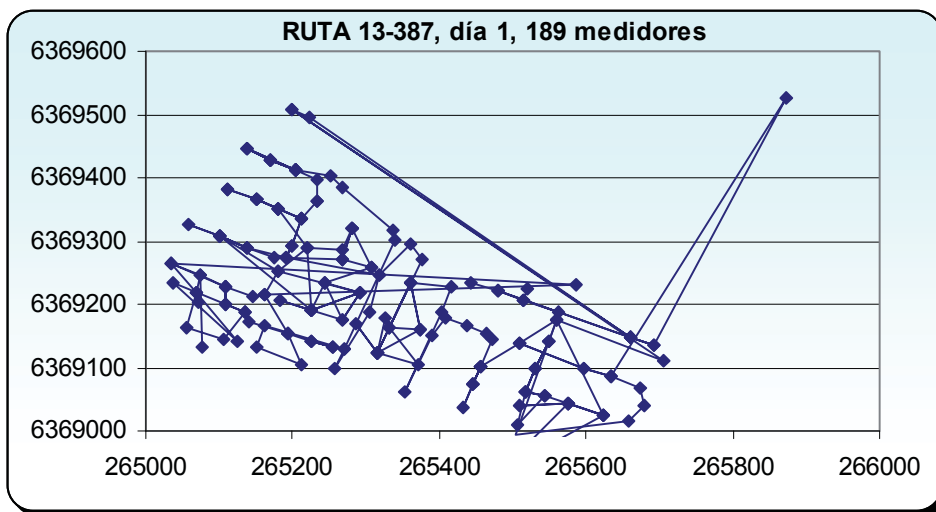


Figura N° 27: Ruta de Referencia - primer día de lectura

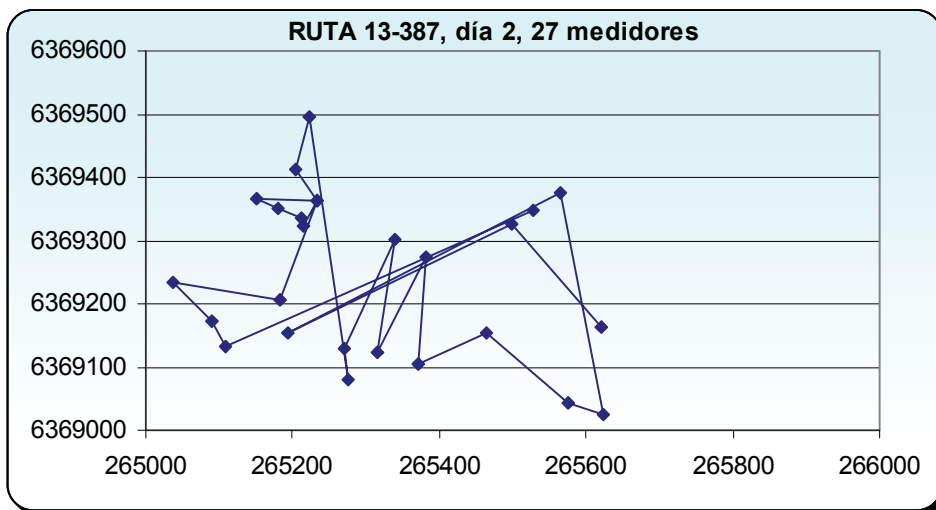


Figura N° 28: Ruta de Referencia - segundo día de lectura

Para aislar el análisis de aspectos operativos de terreno, se tomará el recorrido del día 1 como una nueva ruta completa, la cual será optimizada por el modelo propuesto. Los datos de esta ruta son los siguientes:

Cantidad de Medidores	:	188
Hora de inicio	:	09:20 [hrs]
Hora de término	:	16:51 [hrs]
Duración	:	07:31 [hrs]
Distancia:		
Total	:	14.539 [mts]
Mínimo tramo	:	2 [mts]
Máximo tramo	:	643 [mts]
Tramo promedio	:	77 [mts]
Desv. Estándar	:	105 [mts]
Velocidad promedio	:	1.94 [km/hr]

Tal como se indicó en el punto anterior, en la práctica se identificó que una Ruta de Lectura se recorre en más de un día. Los principales motivos por los cuales una Ruta de Lectura se lee en más de un día, son los siguientes:

- Falta de tiempo : por diversos motivos, el lector no logra completar la ruta dentro del primer día.
- Casas cerradas : se intenta leer el medidor, pero no es posible porque la casa se encuentra sin moradores
- Repasos : se logra leer el primer día, pero los algoritmos posteriores de sensibilización rechazan la lectura por estar fuera del rango del valor proyectado
- Falla de equipos : cualquier tipo de falla en el equipo que registra las lecturas
- Eventos de fuerza mayor : eventos de fuerza mayor, como accidentes en la vía pública, mordeduras de perro, actos vandálicos, agresión de vecinos, y otros.

Por los motivos recién indicados, existe una alta probabilidad de leer una Ruta completa en más de un día. De hecho, ninguna de las 71 rutas de la zona de de interés fue leída completamente el primer día. La distribución de lecturas por día se presenta en la Figura N° 29. Se observa que, en promedio, sólo el 57% de los medidores son leídos en el primer día de lectura de la ruta.

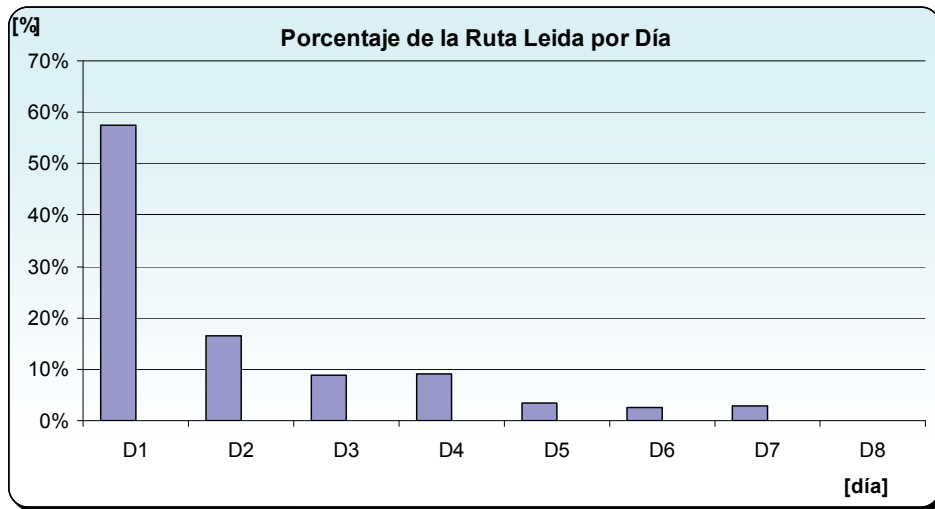


Figura N° 29: Distribución de Lecturas por Día

Este hecho genera un nuevo espacio de optimización, que es la resectorización de rutas, que será tratada como tema propuesto para mejoras futuras.

## 9.6 Evaluación Técnica y Económica

En capítulos anteriores se desarrolló el modelo del ‘Vecino Más Cercano con Ponderadores 3D’, y posteriormente se implementó y probó con datos reales. Los resultados demuestran que el algoritmo optimiza o reduce de costo las actuales rutas de lectura.

El cálculo de los factores de evaluación para el grupo de muestra es el siguiente:

$$\text{Factor\_Optimización} = (344.5 / 305.6) = 1.13 [-]$$

En promedio, la mejora obtenida es de un 13%, lo que se considera un indicador exitoso ya que tiene una incidencia directa en la reducción de costo.

Tal como se indica en el punto 7.1, se requieren 103 lectores para recorrer todos los medidores con frecuencia mensual, lo que equivale a 1.236 meses-hombre/año. Dado que el algoritmo VCMP3D permite reducir en un 13% el costo, resulta en un ahorro de 161 meses-hombre/año. Estos 161 meses-hombre/año se pueden valorizar económicamente utilizando como referencia conservadora el valor de un sueldo mínimo, el cual por Ley es de alrededor de \$ 182.000, es decir, US\$ 320. Por lo tanto, el beneficio directo de este modelo optimizado es de US\$ 51.418 / año.

Con un retorno de US\$ 205.672 en un plazo de 4 años se puede utilizar parte de este ahorro para invertir en herramientas de apoyo tecnológico y optimización, como es el software de simulación, análisis de datos y despliegue geográfico.



## 10 Trabajos Futuros

Debido a que las Rutas de Lectura se recorren en más de un día, se genera un nuevo espacio de posible optimización en lo referente a la confección de las rutas compuestas por medidores que no se han podido leer el primer día.

Conceptualmente el modelo de optimización puede operar bajo los siguientes preceptos:

- Se genera un nuevo universo con todos los medidores que no se han podido leer el primer día
- Se ejecuta un modelo de asignación óptima de medidores por subruta. Una subruta es una ruta compuesta únicamente por medidores no leídos el primer día
- Una vez definidas las subrutas, se ejecuta el modelo de optimización propuesto (vecino más cercano)

A nivel gráfico, el modelo se presenta en la siguiente Figura N° 30.

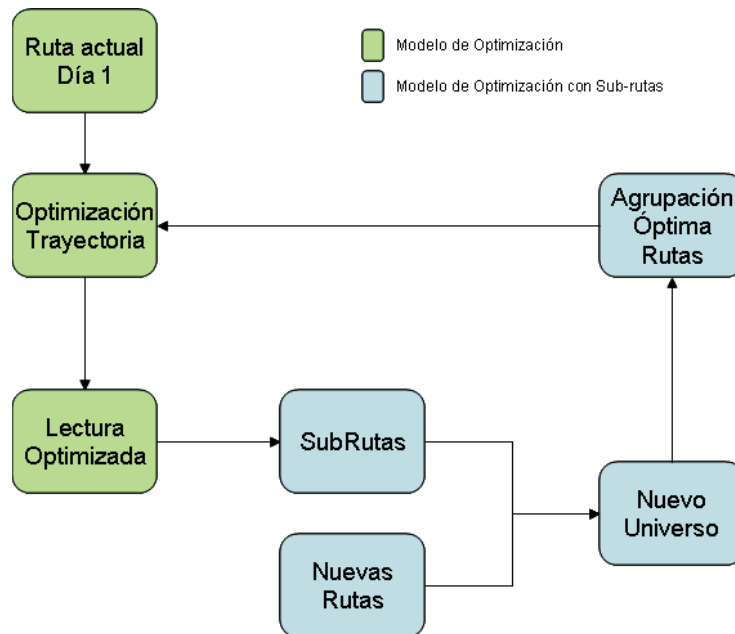


Figura N° 30: Modelo de Optimización con Subrutas

El nuevo modelo propuesto, incorpora las sub-rutas a las rutas ya definidas del día, generando un nuevo Universo. Este grupo de rutas y sub-rutas es sometido a un algoritmo de determinación óptima de rutas, el cual debe considerar que las nuevas rutas deben representar el trabajo de un lector en una jornada

La agrupación óptima de rutas escapa al alcance de este trabajo, y por eso se deja planteado como una posible mejora a futuro.

## 11 Conclusiones

Se ha desarrollado el trabajo Optimización Georeferenciada de Rutas de Lectura de Medidores, para lo cual se ha utilizado la heurística del vecino más cercano, complementada con un nuevo concepto denominado Matriz de Ponderación Tridimensional, que recoge las particularidades reales de las situaciones en terreno.

Se seleccionó la heurística del vecino más cercano como solución al problema planteado, principalmente por su simplicidad, bajo costo de desarrollo, aceptables tiempos de respuesta para los volúmenes de datos procesados, y por la necesidad de disponer de mejoras con beneficio económico en plazos muy breves. Esta heurística permitió lograr optimizaciones hasta de un 19%, con un 13% global sobre el universo de datos utilizado. Este 13% tiene un impacto directo en la reducción de costos, con un beneficio estimado de US\$ 51.000 anuales.

El análisis y la calidad de los datos fue un aspecto fundamental. De hecho el universo se redujo a un 50%, ya que el restante 50% presentaba comportamiento que permitían presumir que contenían errores relevantes para efectos del modelo de optimización propuesto.

Respecto de la implementación, el algoritmo fue desarrollado en Delphi con entradas y salidas en archivos planos y la visualización inicial se realizó con Excel y posteriormente con Google Earth, lo que facilita de gran manera la identificación de puntos singulares que permiten definir de mejor modo los elementos de la Matriz de Ponderadores Tridimensionales.

No obstante los resultados indican el logro del objetivo, se proponen las siguientes mejoras para etapas posteriores de desarrollo de este trabajo:

- Migrar los datos desde los actuales archivos de texto a una base de datos relacional
- Dotar a la aplicación de una interfaz interactiva y usable
- Incorporar las subrutinas
- Incorporar la agrupación óptima de rutas
- Definir recomendaciones empíricas para calibrar la Matriz de Ponderadores Tridimensionales

## 12 Bibliografía

- “Optimización en la asignación de tareas en un sistema de guardería forestal”, Lorena Pradenas Rojas, Leandro Azocar García, Universidad de Concepción, Chile, 2005  
[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002005000200003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002005000200003&script=sci_arttext)
  - “Algoritmos Heurísticas y Algoritmos Aproximados”, Juan Manuel Ussher, Universidad de Los Andes, Venezuela  
<http://www.ing.ula.ve/~ibc/ayda/c28heurísticas.pdf>
  - “Aproximación con Dificultad NP”, Luis Gerardo Peña Camacho, Universidad de Los Andes, Venezuela  
<http://www.ing.ula.ve/~ibc/ayda/c28AproxNP.pdf>
  - “Avances numéricos en la solución del problema del vendedor viajero con el uso de la red neuronal Elastic Net con implementación semi paralela”, Ricardo Corbinaud, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile  
[http://www.frecu.utn.edu.ar/deptos/depto\\_3/33JAIIO/33JAIIO/asai2004/07-35-Corbinaud.pdf](http://www.frecu.utn.edu.ar/deptos/depto_3/33JAIIO/33JAIIO/asai2004/07-35-Corbinaud.pdf)
  - “Un Algoritmo ACS con Selección Dinámica de Movimiento y Operador 2-Opt”, Alejandro Pavez Salazar, Héctor Acevedo Almonacid, Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile  
<http://www.inf.udec.cl/revista/ediciones/edicion8/Acs.pdf>
  - “Un Problema Logístico De Ruteo De Vehículos Y Una Solución Con. Solver De Excel: Un Caso De Estudio”, Eduardo Cruz, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2007  
<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/193428369-372.pdf>
- “Investigación de operaciones en acción: Heurísticas para la solución del TSP”, de los autores Roger Z. Ríos Mercado y José Luis González Velarde, publicado en ‘Ingenierías’ Octubre-Diciembre 2000, Vol. III, N° 9.  
<http://yalma.fime.uanl.mx/~roger/work/Papers/article/article-inge-2000.pdf>