

DISMINUCION DE CONTAMINACIÓN EN EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

Lorena Pradenas

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción
Casilla 160-C, Correo3, Concepción, Chile
lpradena@udec.cl

Boris Oportus

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción
Casilla 160-C, Correo3, Concepción, Chile
borisoportus@udec.cl

Víctor Parada

Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Santiago de Chile
Av. Ecuador 3659 Santiago, Chile
victor.parada@usach.cl

RESUMEN

Este estudio propone minimizar la emisión de CO₂, en el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y retiro de productos. Se utiliza la Metaheurística Scatter Search, el valor de Shapley de juegos cooperativos e instancias de la literatura. Los resultados indican que en general, los costos de transporte aumentan sin embargo, disminuye la cantidad de combustible y por ende la emisión de gases de efecto invernadero. La cantidad de vehículos, se mantiene o aumenta, ya que en algunos casos se logra una mejor solución con rutas más cortas y mejor distribuidas. Además, proponemos que diferentes empresas de transporte operen en conjunto para disminuir, tanto la emisión como los costos operacionales, distribuyendo así los ahorros.

PALABRAS CLAVES: Problema de ruteo de vehículos, gases de efecto invernadero, valor de Shapley.

L&T - Logística e Transportes, MH - Metaheurísticas

ABSTRACT

In this paper we propose to minimize the CO₂ emissions in the vehicle routing problem with backhauls and time windows. We used Scatter Search, the Shapley Value for cooperatives games and literature instances. The results indicates, in general, an increase of the cost for transportation, however, the quantity of fuel and the greenhouse gases emission are decreased. The number of vehicles is kept or increased, because in some cases it is better to separate long routes on smaller routes and better distributed. Also, we suggested that different companies work together, to reduce greenhouse gases emissions and cost, distributing the savings using the Shapley Value.

KEYWORDS: Vehicle routing problem, greenhouse gases, Shapley value.

L&T - Logistics and Transport, MH - Metaheuristics

1. Introducción

Es innegable el impacto negativo del transporte en el medio ambiente, ya sea por el efecto que provoca en: uso de suelo, consumo de recursos, daños a los ecosistemas y a los seres humanos. Sin embargo, además de estos problemas, está el daño que producen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que según datos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), son los causantes, muy probablemente, del aumento observado del promedio mundial de temperaturas, fenómeno conocido como Calentamiento Global. El transporte de carga es el causante del 13% del total de GEI antropógenos a nivel mundial (IPCC, 2007), sólo en Reino Unido, esta cifra es de un 21%, la que representa 33.7 millones de toneladas de CO_2 liberadas al ambiente (McKinnon, 2007). Tal vez, lo más preocupante es que este sector se encuentra en continuo crecimiento y en consecuencia las emisiones de GEI. Nuestro objetivo en este trabajo es proponer una nueva variante del ruteo de vehículos que minimice la emisión de GEI.

El problema de ruteo de vehículos (VRP), determina un conjunto de rutas, cada una realizada por un vehículo, que empiezan y terminan en un determinado depósito y que atienden a todos los clientes bajo ciertas restricciones. El problema más común, es el ruteo de vehículos restringido por capacidad (CVRP) donde, se debe cumplir la demanda de cada cliente sin sobrepasar la capacidad del vehículo. Otra variante es aquella que considera ventanas de tiempo (VRPTW), donde cada cliente tiene un intervalo de tiempo para recibir los productos. Una completa revisión del VRP y las variantes mencionadas, en: Toth y Vigo (2002), Golden et al. (2008), entre otros.

Una variante del VRPTW, que considera dos tipos de clientes: clientes de reparto (*linehaul*) y retiro (*backhaul*), es el VRPBTW. Los últimos (clientes tipo *backhaul*), pueden ser atendidos luego de que todos los clientes *linehaul* en la ruta, han sido visitados. En Ropke et al. (2006), se dispone de un extenso estudio sobre el problema y sus variantes. El VRPBTW, tiene una importante consideración en la disminución del impacto ambiental del transporte de carga, ya que involucra dos servicios comúnmente realizados por separado, en una misma ruta, aumentando así, el uso de los vehículos.

Por otro lado, en Kara et al. (2007), se propone una nueva función de costo que considera la minimización del producto entre la carga y la distancia recorrida por el vehículo, en el CVRP y lo denominan *Energy Minimizing Vehicle Routing Problem*. El modelo fue sometido a prueba utilizando dos instancias de la literatura y mostraron diferencias con la solución del problema clásico, debido a que, una menor distancia recorrida no implica menor energía necesaria, ya que ésta depende también de la carga del vehículo. Sin embargo, la carga entre dos nodos, es sólo una de las muchas variables que tienen relación con la energía requerida por un vehículo.

Por otro lado, Bektaş y Laporte (2011) presentan, un estudio de los distintos factores que afectan el requerimiento de energía y de los modelos matemáticos que existen a la fecha para predecir el consumo de combustible y emisiones. Proponen considerar: carga, distancia y velocidad, para determinar la energía requerida y así establecer en la función objetivo, los costos de: conductores, combustibles y ambientales. Los dos últimos dependen de la energía requerida en cada ruta. A su vez, presentan resultados para tres variantes de su problema: minimización de distancia, minimización del producto distancia-carga y minimización de energía.

A partir de los párrafos anteriores se establece, que existe la oportunidad de considerar en el VRPBTW, funciones que establezcan el cálculo de la energía requerida y utilizar ésta, para determinar las distintas rutas.

A nuestro conocimiento, existen estudios que consideran minimizar otros factores además de la distancia para el ruteo de vehículos, sin embargo, ninguno que busque minimizar la energía requerida considerando: carga, distancia y velocidad, para el cálculo de ésta, en el problema de VRPBTW.

Por lo tanto, las contribuciones de este trabajo se puede resumir como:

- Definir una nueva función objetivo que considere minimizar la energía requerida, en vez de la distancia recorrida en el VRPBTW, a partir del modelo propuesto por Bektaş y Laporte (2011), con el fin de mitigar la emisión de GEI.

- Mostrar que, considerar clientes *linehaul* y *backhaul* en la planificación de rutas de vehículos puede disminuir las emisiones de GEI, en relación a una planificación independiente de cada tipo de clientes.
- Resolver el VRPBTW para una instancia de la literatura de 100 clientes.
- Aplicar la teoría de juegos cooperativos para la instancia estudiada.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta la formulación propuesta para resolver el problema de VRPBTW con huella de carbono y el método utilizado. La sección 3 muestra los resultados experimentales, que son discutidos en la sección 4. La sección final contiene las conclusiones.

2. Materiales y métodos

En la propuesta de solución del VRPBTW, se consideraron cuatro elementos y son: determinación de la energía (para construir la función objetivo del modelo), un modelo matemático, uso de metaheurística Scatter Search y el uso de la Teoría de juegos. A continuación se detallan éstos elementos.

2.1. Cálculo de energía

El cálculo de la energía requerida en cada arco (i, j) de la red de transporte, se realiza considerando la ecuación (1), propuesta por Bektaş y Laporte (2011):

$$P_{ij} \approx \alpha_{ij}(w + f_{ij})d_{ij} + \beta v_{ij}^2 d_{ij} \quad (1)$$

Donde P_{ij} , representa la cantidad total de energía requerida para el arco (i, j) ; w , es la masa del vehículo sin carga en kg; f_{ij} , es la carga transportada en kg; d_{ij} , corresponde a la distancia en m y v_{ij}^2 , la velocidad del vehículo en el arco y en m/s. Siendo α_{ij} , una constante específica del arco y β , constante del vehículo, ambas obtenidas a partir de las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$\alpha_{ij} = a + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij} \quad (2)$$

$$\beta = 0.5 C_d A \rho \quad (3)$$

En ecuaciones (2) y (3), se tiene que, a corresponde a la aceleración del vehículo en m/s^2 ; g , es la aceleración de gravedad en m/s^2 ; θ_{ij} es el ángulo del arco (i, j) ; C_r , es el coeficiente de roce entre el vehículo y el camino; C_d , es el coeficiente de arrastre; A , es el área frontal del vehículo en m^2 y ρ , la densidad del aire en kg/m^3 .

2.2. Modelo Utilizado

Este estudio trata el VRPBTW de una manera distinta a la tradicional, ya que además de examinar los costos de transporte (en función de la distancia recorrida) y tipos de clientes (de entrega o de retiro) considera, el impacto medioambiental en la búsqueda de la solución. A continuación, se presenta el modelo matemático a ser utilizado para lograr este objetivo y que proviene desde Cho et al. (2005) e incorporando el impacto medioambiental propuesto por Bektaş y Laporte (2011).

Sea $G = (N, A)$, una red con un conjunto de N nodos (clientes) y un conjunto de A arcos, $A = \{(i, j) \mid i, j \in N\}$. El conjunto de nodos se encuentra separado en $N = \{0, L, B\}$, donde 0 es el depósito, $L = \{1, \dots, n\}$ es el conjunto de clientes *linehaults* y $B = \{n + 1, \dots, n + m\}$ es el conjunto de clientes *backhaults*. Cada nodo $i \in N$ está asociado a: Una cantidad no negativa a_i y b_i de productos para repartir o retirar (si un cliente es *linehaul* $b_i = 0$); una ventana de tiempo

$[e_i, l_i]$ donde e_i es la cota inferior y l_i la cota superior de la ventana de tiempo; y finalmente a un tiempo de servicio s_i que representa el tiempo de carga o descarga de productos. Finalmente se dispone de una matriz simétrica de tiempo de viaje $T = [t_{ij}]$ y una flota de vehículos idénticos, $V = \{1, \dots, v\}$, cada uno con una capacidad q .

Sea $x_{ijk} = 1$, si el arco (i, j) es recorrido por el vehículo k ó 0 en otro caso. Sea $u_{ik} = 1$, si el cliente *linehaul* es atendido por el vehículo k ó 0 en otro caso. Sea $v_{ik} = 1$ si el cliente *backhaul* es atendido por el vehículo k ó 0 en otro caso; t_i representa el tiempo en que se inicia el servicio y R es un valor muy grande; f_{ijk} representa la carga transportada por el vehículo en el arco (i, j) , entonces el modelo matemático propuesto es:

$$\text{Minimize } \sum_{i=0}^{n+m} \sum_{j=0}^{n+m} \sum_{k=1}^v [\alpha_{ij} d_{ij} \cdot (w x_{ijk} + f_{ijk}) + \beta v_{ij}^2 d_{ij}] \quad (4)$$

$$\text{Subject to } \sum_{k=1}^v u_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^v v_{ik} = 1 \quad i = n + 1, \dots, n + m \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot u_{ik} \leq q \quad k = 1, \dots, v \quad (7)$$

$$\sum_{i=n+1}^{n+m} b_i \cdot v_{ik} \leq q \quad k = 1, \dots, v \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^{n+m} x_{ijk} = \begin{cases} u_{jk} & \text{si } j = 1, \dots, n \\ v_{jk} & \text{si } j = 0, n + 1, \dots, n + m \end{cases} \quad k = 1, \dots, v \quad (9)$$

$$\sum_{j=0}^{n+m} x_{ijk} = \begin{cases} u_{ik} & \text{si } i = 0, \dots, n \\ v_{ik} & \text{si } i = n + 1, \dots, n + m \end{cases} \quad k = 1, \dots, v \quad (10)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, n+1}^{n+m} x_{ijk} = 1 \quad k = 1, \dots, v \quad (11)$$

$$t_j \geq t_i + s_i + t_{ij} - (1 - x_{ijk}) R \quad i, j = 1, \dots, n + m \quad (12)$$

$$e_i \leq t_i \leq l_i \quad i = 1, \dots, n + m \quad (13)$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+m} f_{jik} - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n+m} f_{ijk} = \begin{cases} a_i & \text{si } i = 1, \dots, n \\ b_i & \text{si } i = 0, n + 1, \dots, n + m \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, n + m \quad (14)$$

$$a_{i-1} x_{ijk} \leq f_{ijk} \leq (q - a_i) x_{ijk} \quad i, j = 1, \dots, n + m \quad (15)$$

$$b_{i-1} x_{ijk} \leq f_{ijk} \leq (q - b_i) x_{ijk} \quad i, j = 1, \dots, n + m \quad (16)$$

$$u_{0k} = 1; u_{ik} = 0 \text{ ó } 1 \quad i = 0, \dots, n \quad (17)$$

$$v_{0k} = 1; v_{ik} = 0 \text{ ó } 1 \quad i = 0, n + 1, \dots, n + m \quad (18)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ ó } 1; t_i \geq 0 \quad i, j = 0, \dots, n + m \quad (19)$$

$$f_{ijk} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad \begin{matrix} i, j = 0, \dots, n + m \\ k = 1, \dots, v \end{matrix} \quad (20)$$

La nueva función objetivo para el VRPBTW, presentada en la relación (4), minimiza la cantidad de energía requerida por la ruta y además de la distancia, considera la carga transportada en cada arco recorrido, la velocidad del vehículo y otras de sus características detalladas en (2) y (3). Las ecuaciones (5) y (6) expresan que cada cliente *linehaul* y *backhaul* debe ser atendido exactamente por un vehículo. Las ecuaciones (7) y (8) implican que el vehículo *k* no puede exceder su capacidad; ecuaciones (9) y (10) son las restricciones de conservación de flujo. La ecuación (11) representa la precedencia de los clientes *linehauls* por sobre los *backhauls* en cada vehículo *k*. Las ecuaciones (12) y (13) corresponden a las restricciones de las ventanas de tiempo. Las ecuaciones (14), (15) y (16) representan el balance de flujo que establece que el flujo aumenta (o disminuye) según la cantidad demandada por cada cliente. Mientras que las ecuaciones restantes definen a las variables de decisión.

2.3.- Scatter Search

Scatter Search (SS) o búsqueda dispersa, fue desarrollado por Glover en 1977 y se trata de un algoritmo metaheurístico que pertenece a la familia de los métodos basados en población y se utiliza para resolver problemas de optimización. Opera a partir de un conjunto de referencia para generar soluciones mejores a las anteriores. Utiliza la combinación ponderada, una búsqueda lineal entre dos soluciones (de calidad y/o dispersas), que establece ponderaciones para crear nuevas soluciones.

SS consta básicamente de cinco etapas (Martí et al., 2003): método de generación diversificada; método de mejora; método de actualización del conjunto de referencia; método de generación de subconjunto y método de combinación de soluciones que se describirán a continuación, para el caso en estudio.

En primer lugar, cada solución se representa como un vector de números enteros donde cada cliente está asociado a un número distinto de 1, ya que este representa al depósito. Por ejemplo, en la solución $S = \{2, 4, 1, 1, 3, 5, 1, 6\}$, existen 5 clientes $\{2, 3, 4, 5, 6\}$, los cuales son visitados en 3 rutas: $\{1, 2, 4, 1\}$; $\{1, 3, 5, 1\}$ y $\{1, 6, 1\}$ (notar que cada ruta se inicia y termina con un 1). Además, si existen dos número 1 seguidos como en *S*, implica que ese vehículo no es asignado. Lo mismo ocurre si existe un 1 al término de *S*. Las etapas de la metaheurística se detallan a continuación:

Método de generación diversificada: Se genera una población de un tamaño determinado ($P = 100$), del que se extrae un subconjunto denominado “conjunto de referencia” de tamaño ($b = 10$). Para esto se usa una heurística de construcción, uno por uno, mediante la aplicación aleatoria de 3 distintos métodos de selección, que son: Aleatorio, el siguiente nodo en la ruta se selecciona aleatoriamente; Cercanía, se selecciona al nodo más cercano al último presente en la ruta; Criterio múltiple, se ordenan los nodos en base a la ecuación (21). Donde d_{0u} es la distancia entre el depósito y el cliente *u*, l_u representa la holgura de tiempo máximo restante para atender el cliente *u* y $angle_u$ representa al ángulo polar entre el cliente *u* y el depósito. Los valores de los parámetros (Thangiah, 1996), son: $\alpha = 0.7, \beta = 0.2$ y $\gamma = 0.1$, es decir, se privilegia la cercanía del cliente, luego la urgencia y finalmente el ángulo polar.

$$-\alpha d_{0u} + \beta l_u + \gamma angle_u \quad (21)$$

Método de mejora: Las soluciones factibles previamente generadas, son tratadas con algoritmos de búsqueda local para obtener nuevas soluciones de mejor calidad. Se utilizaron 3 métodos distintos y en este estudio son determinados por la propia heurística: *Swap* (intercambio dentro la

ruta), *Insertion* (intercambio de clientes entre rutas) y *Fusion* (unión de dos rutas distintas en una).

Método de actualización del conjunto de referencia: En esta etapa, se debe crear y actualizar el conjunto de referencia. El conjunto de referencia (b) se construye en base a las soluciones presentes en P para que contenga soluciones de calidad y diferentes entre sí. Es importante señalar que en este conjunto, las soluciones están ordenadas de mejor a peor, respecto a su calidad. Se consideran:

Método de generación de subconjunto: Scatter Search, se basa en una búsqueda exhaustiva de todas las combinaciones posibles del conjunto de referencia. En este estudio, basado en Rego (2001), se combinan todas las soluciones del conjunto de referencia en 2-elementos, 3-elementos, ..., (n-1)-elementos. A partir del conjunto de referencia ($b = 10$), se crea un subconjunto de 165 combinaciones, las que se utilizarán para aplicar el método de combinación.

Método de combinación de soluciones: SS se basa en examinar de manera exhaustiva todas las combinaciones del conjunto de referencia. Para esto, a los subconjuntos creados en las etapas anteriores se les aplica algún método de combinación. Este estudio, se basa en el propuesto por Corberán (2002), donde se combinan distintas rutas de dos soluciones considerando el número de elementos en común en cada una para construir dos nuevas soluciones completamente diferentes a las originales.

2.4. Teoría de Juegos

En este estudio, se propone la operación conjunta de distintas empresas de transporte para suplir el aumento en los costos que supone la implementación de la minimización de energía. Se utiliza el valor de Shapley (Shapley, 1953), presentada en la ecuación (22), para determinar el precio a cancelar por cada empresa para participar de la coalición (Serrano, 2007).

$$Sh_i(C, F) = \sum_{S, i \in S} \frac{|S|! (|C| - |S| - 1)!}{|C|!} [F(S \cup \{i\}) - F(S)] \quad (22)$$

En ecuación (22), se define a $C = \{1, \dots, c\}$ como el conjunto finito de jugadores que pueden elegir distintas estrategias para recibir un pago determinado según la combinación de éstas, cada subconjunto no vacío de C es una Coalición (que será denotada por S). Para este caso, sólo existirá una estrategia: “pertenecer a la coalición” o “no pertenecer a la coalición”, en nuestro caso, coalición se refiere al hecho de trabajar en conjunto para disminuir costos de transportes y emisiones de GEI.

3. Resultados

La implementación propuesta del VRPBTW, se realizó utilizando la instancia BHR103B de Gélinas et al. (1995). En una primera etapa se considera que los 100 clientes son atendidos por una empresa y se compara la solución para el problema tradicional (minimización de distancia) con la implementación propuesta (minimización de energía). En una segunda etapa, los 100 clientes se distribuyen en cuatro empresas (cuatro redes con 25 clientes cada una) y nuevamente se compara la solución tradicional con la propuesta. Finalmente se realiza un análisis de coalición para evaluar la posibilidad de que las cuatro empresas actúen en conjunto para mitigar el aumento en los costos que supone privilegiar la disminución de las emisiones de CO_2 .

Para el cálculo energético, se utiliza la ecuación (1), suponiendo que la velocidad del vehículo es de 90 km/h (constante). También se supone que: $\theta_{ij} = 0^\circ$ para todos los arcos (i, j), $C_r = 0,01$; $C_d = 0,70$; $A = 6 \text{ m}^2$; $a = 0 \text{ m/s}^2$; $w = 7 \text{ ton}$ y $\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$.

La ecuación (23), presenta el cálculo del costo total. Para determinar los litros de combustible, se considera que: Un kWh equivale a $3,6 \times 10^6$ J, 32% de eficiencia de motor y que 1 litro de combustible proporciona 8.8 kWh (Bektaş y Laporte, 2011). El costo de combustible se establece en US\$ 1, el costo de asignación de vehículo en US\$ 100 y el costo por tonelada de CO_2 emitida de US\$ 43,5 (DEFRA, 2007).

$$\text{Costo Total} = C_c \cdot \text{Litros} + C_e \cdot \text{Litros} + C_a \tag{23}$$

En la ecuación (23), C_c es el costo del combustible, C_e es el costo de las emisiones de GEI, considerando que cada litro de combustible produce 2,32 kg CO_2 y C_a es el costo de asignación.

La figura (1), muestra el resultado para el caso en que los 100 clientes son atendidos por una sola empresa. La tabla (1), muestra las mejores soluciones encontradas al resolver el problema minimizando distancia y minimizando la energía (con un promedio de ejecución de 10 corridas en cada caso).

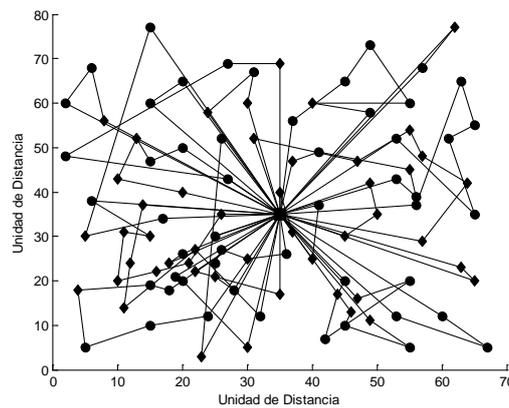


Figura 1: Mejor solución encontrada para el problema BHR103B.
■ Depósito; ◆ Clientes Backhauls; ● Clientes Linehauls.

Tabla 1: Resultados para el escenario 1 (100 clientes).

Minimización en la función objetivo	Distancia [km]	Número de Vehículos	Energía Requerida [kWh]	Costo Operacional [US\$]	Costo Ambiental [US\$]	Costo Total [US\$]
Energía	2065,35	27	238,67	2.785	9	2.793
Distancia	1664,17	23	1.050,35	2.673	38	2.711

A continuación, el problema BHR103B es dividido en cuatro proveedores (E1, E2, E3 y E4) con 25 proveedores cada una. Se muestran los resultados para cada proveedor por separado, ver figuras: 2(a), 2(b), 2(c), 2(d), respectivamente. El detalle de los resultados se presenta en la tabla 2.

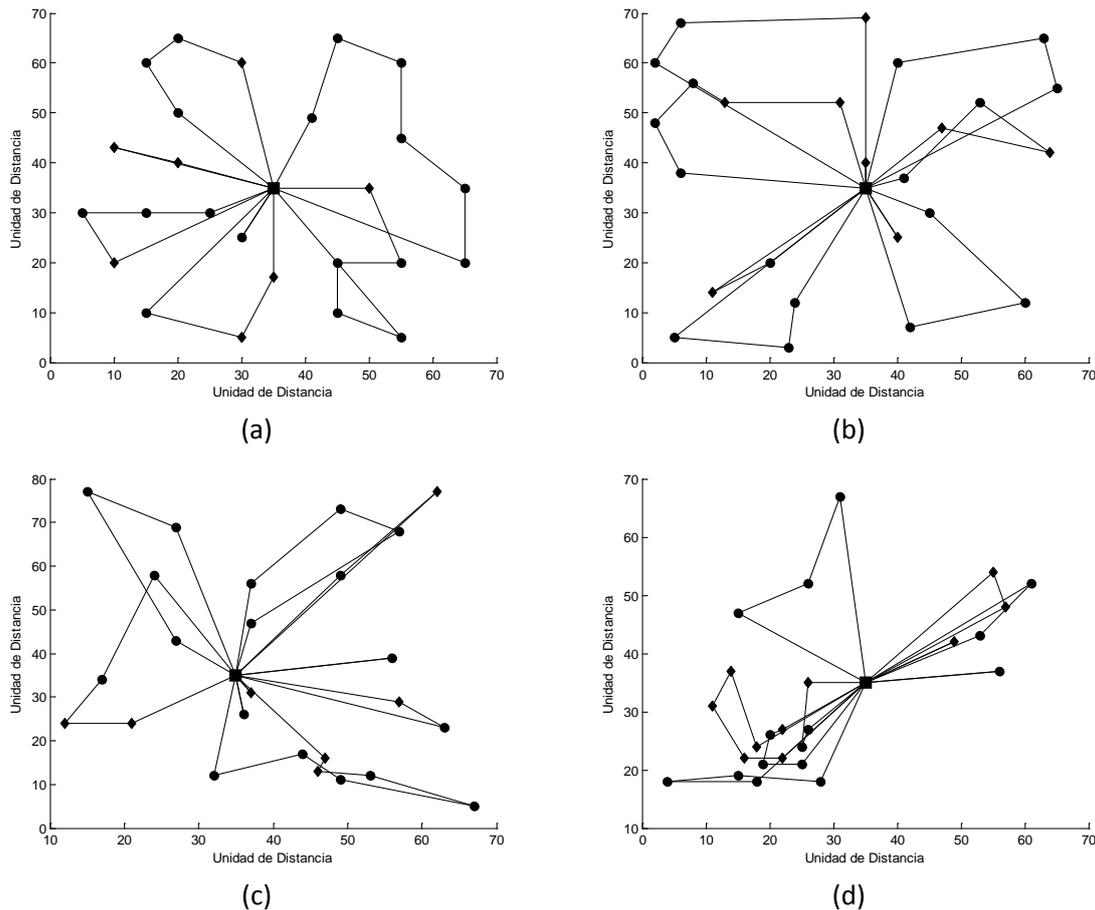


Figura 2: Mejor solución encontrada para: (a) E1, (a) E2, (a) E3, (a) E4.
■ Deposito; ◆ Clientes *Backhauls*; ● Clientes *Linehauls*.

Tabla 2: Resultados para el escenario 2 (25 clientes).

Empresa	Minimización en la función objetivo	Distancia [km]	Número de Vehículos	Energía Requerida [kWh]	Costo Operacional [US\$]	Costo Ambiental [US\$]	Costo Total [US\$]
E1	Energía	519,98	7	265,55	794	10	804
	Distancia	508,31	7	300,36	807	11	817
E2	Energía	649,05	9	328,09	1.017	12	1.028
	Distancia	602,01	7	386,38	837	14	851
E3	Energía	620,48	9	313,07	1.011	11	1.022
	Distancia	569,05	7	348,37	824	12	836
E4	Energía	516,03	9	100,66	1.001	10	1.011
	Distancia	455,50	7	105,47	805	11	816

La planificación de rutas de vehículos considerando clientes *linehaul* y *backhaul* disminuye las emisiones de GEI, en relación a una planificación independiente de cada tipo. Para el caso E1, se muestra la importancia de utilizar el problema con *backhauling*: Un problema de VRPBTW puede ser dividido en dos problemas de VRPTW, uno para los clientes *backhauls* y otro para *linehauls*; la ventaja se establece en la utilización del retorno del vehículo descargado para pasar a retirar productos y no para realizar ambas tareas por separado. Para ejemplificar lo señalado se muestran los resultados del modelo aplicando sólo minimización de la distancia.

En la figura (3), se muestra la separación de los 25 clientes del problema BHR103C, según su tipo, donde (a) representa los 13 clientes *linehauls* y (b) los 12 clientes *backhauls*.

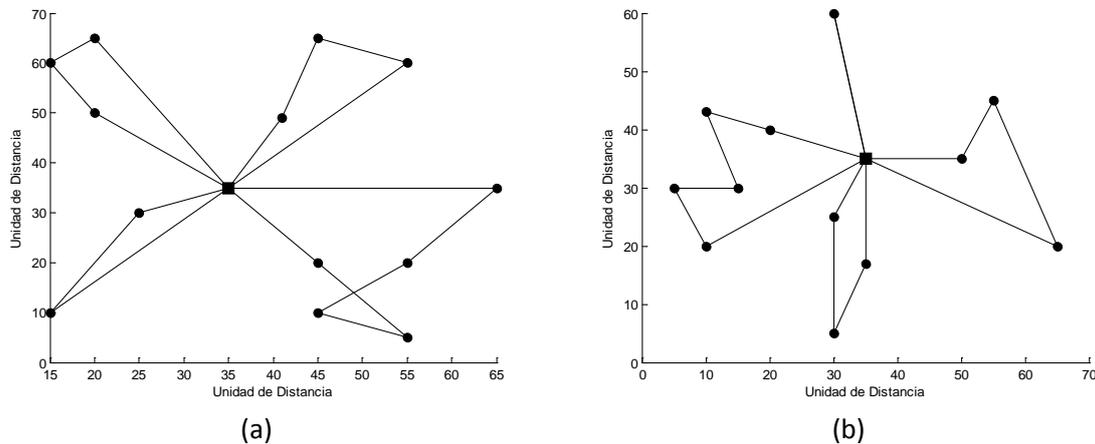


Figura 3: (a) Clientes *linehauls* del problema BHR103C y (b) Clientes *backhauls* del problema BHR103C.
■ Deposito; ◆ Clientes *Backhauls*; ● Clientes *Linehauls*.

En la figura 3(a), se observan los 13 clientes de reparto y la figura 3(b) los 12 clientes de retiro. En el primer caso se necesitan 4 vehículos y se recorre un total de 322,89 unidades; en el segundo caso se requieren también 4 vehículos y se recorren 290,33 unidades. Si unimos estos dos problemas en uno (VRPBTW), sólo se requieren 5 vehículos y se recorre una distancia total de 485,53 unidades, es decir 3 vehículos y 127,69 unidades menos.

3.1. Análisis de Coalición

Debido al aumento en los costos totales, al considerar la disminución en las emisiones de CO₂ y como una extensión del estudio, se propone la existencia de una coalición entre proveedores.

Con el fin de motivar a las empresas para participar de la coalición, se estima el valor de Shapley (Shapley, 1953) o sea, el punto de equilibrio donde todas las empresas estarían dispuestas a participar. Dado que existen, cuatro proveedores $C = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$, es necesario evaluar todas las combinaciones posibles de la coalición. Este “juego” será representado por el par (C, F) , donde F es una función $(F: \Omega \rightarrow \mathbb{R})$ que asigna a cada coalición un número real, donde $F(\emptyset) = 0$. Los resultados para las distintas combinaciones se presentan en la tabla 3, ordenados por la cantidad de empresas participantes en la combinación (1, 2, 3 y 4 respectivamente).

Tabla 3: Costos de cada coalición.

	E1	E2	E3	E4		
Costo Total [US\$]	804	1.028	1.022	1.011		
	E1 - E2	E1 - E3	E1 - E4	E2 - E3	E2 - E4	E3 - E4
Costo Total [US\$]	1.751	1.745	1.747	1.985	1.784	1.867
	E1 - E2 - E3	E1 - E2 - E4	E1 - E3 - E4	E2 - E3 - E4		
Costo Total [US\$]	2.457	2.775	2.357	2.775		
	E1 - E2 - E3 - E4					
Costo Total [US\$]	2.793					

A partir de los datos anteriormente mostrados es posible determinar el punto de equilibrio, que establece el dinero ahorrado por cada proveedor al participar de la coalición. Para esto, en primer lugar se determina el ahorro global de trabajar en conjunto, el cual en este caso es

de US\$ 1.072 (se obtiene al sumar los costos de las cuatro empresas al trabajar independientemente y restarle el costo al trabajar en conjunto). Luego utilizando la ecuación (22) es posible determinar cuánto de ese ahorro le corresponde a cada proveedor, es así como E1 ahorra US\$ 264, E2 ahorra US\$ 211, E3 ahorra US\$ 330 y E4 ahorra US\$267.

4. Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos y mostrados en la sección 3, la implementación de las componentes energéticas en la función objetivo y el cálculo de las emisiones de GEI permiten señalar que:

El costo medioambiental, actualmente, no es un factor, preponderante en los costos de transporte, ya que el costo de emitir una tonelada de CO_2 es muy inferior a los costos operacionales.

La distancia recorrida es mayor en los casos que buscan disminuir las emisiones de CO_2 , ya que en el cálculo se considera la carga que traslada cada vehículo durante el trayecto, por lo que en algunos casos es preferible dividir rutas en situaciones donde el vehículo va muy cargado.

Al minimizar la energía requerida se genera un aumento en los costos totales, principalmente porque se requiere un mayor número de vehículos.

Los resultados muestran que para todos los casos se logró encontrar un conjunto de rutas que disminuye la emisión de GEI en cerca de un 2%, pero que aumenta los costos totales de operación entre un 2 y 8%, principalmente debido al aumento en el número de vehículos utilizados. Sin embargo, se demostró que al trabajar en conjunto las empresas logran una solución ecológica y económicamente rentable para todas, disminuyendo en cerca de un 30% las emisiones de GEI y costos totales.

El uso del valor de Shapley es una alternativa a la distribución de los ahorros entre las empresas, repartiendo de manera adecuada según el aporte de cada una a la coalición; es así como E1, E2, E3 y E4 reciben, respectivamente, el 24%, 20%, 31% y 25% de estos.

5. Conclusiones

En este estudio se plantea un modelamiento matemático para el rutamiento de vehículos con ventanas de tiempo y backhauling. Se diseña e implementa un algoritmo que minimiza la emisión de gases de efecto invernadero con flota homogénea. Para estudiar el desempeño computacional se realiza un experimento considerando instancias provenientes de la literatura con hasta 100 clientes. Además, basándose en un esquema de juego cooperativo se estudia las ventajas de la cooperación entre empresas que atienden a clientes independientes.

Se encontró que el número de vehículos se mantiene o incrementa en todos los casos estudiados en relación con el problema de minimización de distancia. Este comportamiento es debido a que existen rutas en que la energía requerida para recorrerlas es menor, si las rutas son particionadas, sobretodo en los casos de distancias pequeñas con bastante carga a transportar. La división de rutas, conduce a un aumento en los costos totales de la solución, sin embargo, si se considera flota heterogénea, sería posible hacer algunas rutas con otro tipo de vehículos, logrando mejor relación entre la carga máxima, con respecto a la que realmente se traslada, disminuyendo así los costos totales y también las emisiones.

Al estudiar la conveniencia de la cooperación entre las empresas, se encontró que para disminuir el costo de cada empresa de transporte, éstas deben trabajar en conjunto. Se encontró que ésta es una manera adecuada para repartir los ahorros y que también, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero.

A partir de este, es posible señalar, que el impacto medioambiental y los costos en el ruteo de vehículos se encuentran relacionados con la tasa de utilización del vehículo, las cargas que se transportan entre los clientes y las distancias entre éstos, pero que encontrando una buena manera de equilibrar el problema (considerando clientes y proveedores en la misma ruta, empleando el vehículo adecuado a la carga y la distancia, entre otros), es posible cumplir con los requerimientos de los clientes disminuyendo el impacto medioambiental.

Referencias

Bektaş, T., Laporte, G. (2011): “The Pollution-Routing Problem”. *Transportation Research Part B*, vol 45, pp. 1232-1250.

Cho, Y., Wang, S. (2005): “A Threshold Accepting Meta-heuristic fo the Vehicle Routing Problem with *Backhauls* and Time Windows”. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol 6, pp. 3022-3037.

Corberán, A., Fernández, E., Laguna, M., Martí, R. (2002): “Heuristic Solutions to the Problem of Routing School Buses with Multiple Objectives”. *Journal of the Operational Research Society*, vol 53, pp. 427-435.

Department for Environment Food and Rural Affairs (2007): “The social cost of carbon and the shadow price of cabon: What they are, and how to use them in economic appraisal in the UK”

Gélinas, S., Desrochers, M., Desrosiers, J., Solomon, M. (1995): “A new branching strategy for time constrained routing problems with application to backhauling”. *Annals of Operations Research*, vol 61, pp. 91-109.

Golden, B., Raghavan, S., Wasil, E. (2008): “The Vehicle Routing Problem: Latest advances and Recent Challenges”. *Operations Research Computer Science Interfaces*. Springer. New York.

IPCC (2007): “Cambio climático 2007: Informe de síntesis”. IPCC, Ginebra, Suiza.

Kara, I., Kara, B., Yetis, M. (2007): “Energy Minimizing Vehicle Routing Problem”. *Computer Science*, vol 4616, pp. 62-71.

Martí, R., Laguna, M. (2003): “Scatter Search: Diseño Básico y Estrategias Avanzadas”. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, España.

McKinnon, A.: “Emissions from freight transport in the UK”. *Tech. rep., Prepared for the Climate Change Working Group of the Commissions for Integrated Transport*, London, UK.

Rego, C., Leao P. (2001): “A Scatter Search tutorial for graphed based permutation problem”.

Ropke, S., Pisinger, D. (2006): “A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls”. *European Journal of Operational Research*, vol 171, pp. 750-755.

Serrano, R. (2007): “Cooperative Games: Core and Shapley Value”. CEMFI Working Paper 0709.

Shapley, L. (1953): “A value for n-person games. In Contributions to the Theory of Games II”. *Princeton University Press*, 307-317.

Thangiah, S., Potvin, J., Sun, T. (1996): “Heuristic approaches to vehicle routing problem with backhauls and time windows”. *Computers and Operations Research*, vol 23, pp. 1043-1057.

Toth, P., Vigo, D. (2002): “*The Vehicle Routing Problem*”. Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 376.