Resolviendo problemas de recolección de residuos urbanos mediante programación lineal entera

Javier Marenco

Departamento de Computación, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, Argentina
Instituto de Ciencias, Universidad Nacional de General Sarmiento, Argentina

Trabajo conjunto con Flavia Bonomo, Guillermo Durán,
Federico Larumbe y Francisco Wesner

Recolección de residuos urbanos

- Recolección de residuos urbanos: un tema espinoso ...

Recolección de residuos urbanos

Los contenedores de basura, la nueva guerra entre vecinos

Nadie quiere tenerlos enfrente y los van cambiando de lugar; no se respeta lo que debe tirarse y lo que no y es común que se colmen y rebasen; pese a estar prohibido, los cartoneros se meten a rescatar lo reciclable; acusan a los encargados de discriminarlos

Por **Verónica Dema** | LA NACION

Ver comentarios | Tweet | Me gusta 313 | Share | g+1 | A+ A-

Contenedores colmados de residuos perjudican a transeúntes y ciclistas. Foto: LA NACION / Matías Aimar

Hace unos meses un hombre mató a golpes a otro después de varias peleas por la ubicación del contenedor de basura de la cuadra. Según se supo, el inmenso tacho molestaba al agresor porque le obstruía la visión a su madre, que vigilaba desde la casa cuando él estacionaba el auto; entonces, todos los días lo llevaba a la esquina, y su vecino lo devolvía a su lugar por la noche. Pero un día la discusión se les fue de las manos.

Recolección de residuos urbanos

- En este trabajo nos limitamos a la resolución de problemas de optimización combinatoria que surgen en el contexto de la logística de la recolección.

Recolección de residuos urbanos

- En este trabajo nos limitamos a la resolución de problemas de optimización combinatoria que surgen en el contexto de la logística de la recolección.
- Existen tres modalidades de recolección de residuos urbanos:

Recolección de residuos urbanos

- En este trabajo nos limitamos a la resolución de problemas de optimización combinatoria que surgen en el contexto de la logística de la recolección.
- Existen tres modalidades de recolección de residuos urbanos:
  1. Recolección de contenedores en puntos (casi) fijos.

Recolección de residuos urbanos

- En este trabajo nos limitamos a la resolución de problemas de optimización combinatoria que surgen en el contexto de la logística de la recolección.
- Existen tres modalidades de recolección de residuos urbanos:
  1. Recolección de contenedores en puntos (casi) fijos.
  2. Recolección de residuos en los frentes domiciliarios.

Recolección de residuos urbanos

- En este trabajo nos limitamos a la resolución de problemas de optimización combinatoria que surgen en el contexto de la logística de la recolección.

- Existen tres modalidades de recolección de residuos urbanos:

  1. Recolección de contenedores en puntos (casi) fijos.
  2. Recolección de residuos en los frentes domiciliarios.
  3. Recolección por demanda.

Problemas clásicos relacionados

- Dado un grafo dirigido $G = (N, A)$ y una función de distancia $w : A \to \mathbb{R}$ ...

Problemas clásicos relacionados

- Dado un grafo dirigido $G = (N, A)$ y una función de distancia $w : A \to \mathbb{R}$ ...

  1. El **problema del viajante de comercio** (TSP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los nodos de G y que vuelva al punto de partida con distancia total mínima,

Problemas clásicos relacionados

- Dado un grafo dirigido $G = (N, A)$ y una función de distancia $w : A \to \mathbb{R}$ ...
    1. El **problema del viajante de comercio** (TSP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los nodos de G y que vuelva al punto de partida con distancia total mínima,
    2. El **problema del cartero chino** (CPP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los arcos de G y que vuelva al punto de partida, con distancia total mínima.

Problemas clásicos relacionados

- Dado un grafo dirigido $G = (N, A)$ y una función de distancia $w : A \to \mathbb{R}$ ...

  1. El **problema del viajante de comercio** (TSP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los nodos de G y que vuelva al punto de partida con distancia total mínima,
  2. El **problema del cartero chino** (CPP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los arcos de G y que vuelva al punto de partida, con distancia total mínima.

- A pesar de ser similares, estos problemas tienen complejidades muy distintas.

Problemas clásicos relacionados

- Dado un grafo dirigido $G = (N, A)$ y una función de distancia $w : A \to \mathbb{R}$ ...
  1. El **problema del viajante de comercio** (TSP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los nodos de G y que vuelva al punto de partida con distancia total mínima,
  2. El **problema del cartero chino** (CPP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los arcos de G y que vuelva al punto de partida, con distancia total mínima.
- A pesar de ser similares, estos problemas tienen complejidades muy distintas.
  1. TSP es NP-hard (Karp, 1972).

Problemas clásicos relacionados

- Dado un grafo dirigido $G = (N, A)$ y una función de distancia $w : A \to \mathbb{R}$ ...
    1. El **problema del viajante de comercio** (TSP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los nodos de G y que vuelva al punto de partida con distancia total mínima,
    2. El **problema del cartero chino** (CPP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los arcos de G y que vuelva al punto de partida, con distancia total mínima.
- A pesar de ser similares, estos problemas tienen complejidades muy distintas.
    1. TSP es NP-hard (Karp, 1972).
    2. CPP es resoluble en tiempo polinomial para grafos dirigidos y para grafos no dirigidos (Edmonds y Johnson, 1973).

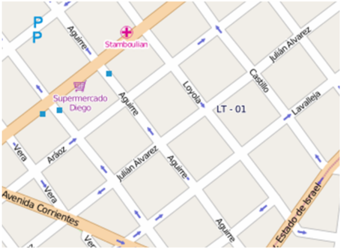
Problemas clásicos relacionados

- Dado un grafo dirigido $G = (N, A)$ y una función de distancia $w : A \to \mathbb{R}$ ...
  1. El **problema del viajante de comercio** (TSP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los nodos de G y que vuelva al punto de partida con distancia total mínima,
  2. El **problema del cartero chino** (CPP) consiste en encontrar un recorrido que pase por todos los arcos de G y que vuelva al punto de partida, con distancia total mínima.

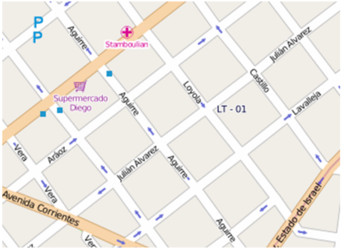
- A pesar de ser similares, estos problemas tienen complejidades muy distintas.
  1. TSP es NP-hard (Karp, 1972).
  2. CPP es resoluble en tiempo polinomial para grafos dirigidos y para grafos no dirigidos (Edmonds y Johnson, 1973).
  3. CPP es NP-hard para grafos mixtos (Papadimitriou, 1976).

Problemas clásicos relacionados

- Distintos tipos de problemas ...



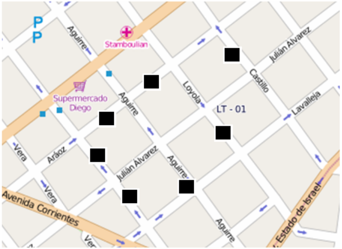
Pasar por lugares puntuales: TSP



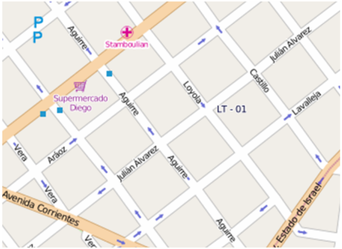
Pasar por todas las cuadras: CPP

Problemas clásicos relacionados

- Distintos tipos de problemas ...



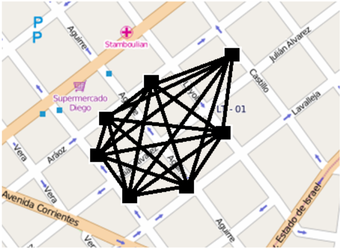
Pasar por lugares puntuales: TSP



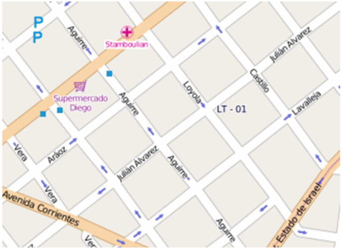
Pasar por todas las cuadras: CPP

Problemas clásicos relacionados

- Distintos tipos de problemas ...



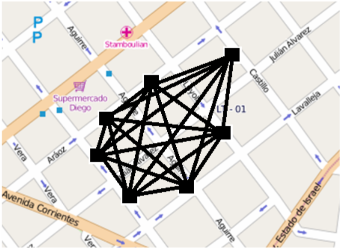
Pasar por lugares puntuales: TSP



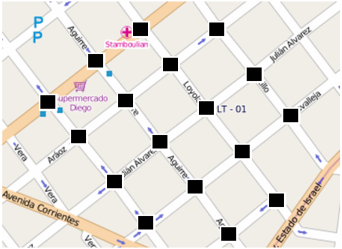
Pasar por todas las cuadras: CPP

Problemas clásicos relacionados

- Distintos tipos de problemas ...



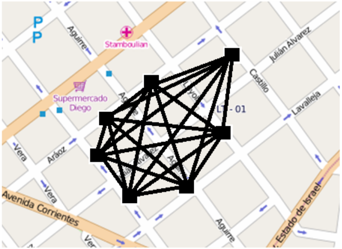
Pasar por lugares puntuales: TSP



Pasar por todas las cuadras: CPP

Problemas clásicos relacionados

- Distintos tipos de problemas ...



Pasar por lugares puntuales: TSP

Pasar por todas las cuadras: CPP

TSP

- A pesar de ser NP-hard, TSP está razonablemente bien resuelto en la práctica.

TSP

- A pesar de ser NP-hard, TSP está razonablemente bien resuelto en la práctica.

Año	Equipo	Ciudades
1954	G. Dantzig, R. Fulkerson y S. Johnson	49
1971	M. Held y R.M. Karp	64
1975	P. M. Camerini, L. Fratta y F. Maffioli	100
1977	M. Grötschel	120
1980	H. Crowder y M. W. Padberg	318
1987	M. Padberg y G. Rinaldi	532
1987	M. Grötschel y O. Holland	666
1987	M. Padberg y G. Rinaldi	2,392
1994	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	7,397
1998	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	13,509
2001	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	15,112
2004	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	24,978
2006	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	85,900

TSP

- A pesar de ser NP-hard, TSP está razonablemente bien resuelto en la práctica.

Año	Equipo	Ciudades
1954	G. Dantzig, R. Fulkerson y S. Johnson	49
1971	M. Held y R.M. Karp	64
1975	P. M. Camerini, L. Fratta y F. Maffioli	100
1977	M. Grötschel	120
1980	H. Crowder y M. W. Padberg	318
1987	M. Padberg y G. Rinaldi	532
1987	M. Grötschel y O. Holland	666
1987	M. Padberg y G. Rinaldi	2,392
1994	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	7,397
1998	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	13,509
2001	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	15,112
2004	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	24,978
2006	D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal y W. Cook	85,900

- El mejor software en la actualidad es **Concorde** (Applegate, Bixby, Chvátal, y Cook, 2006), basado en técnicas de programación lineal entera.

CPP

- En un grafo no dirigido, el CPP consiste en replicar aristas hasta obtener un grafo euleriano, de modo tal que las aristas replicadas tengan costo mínimo posible.

CPP

- En un grafo no dirigido, el CPP consiste en replicar aristas hasta obtener un grafo euleriano, de modo tal que las aristas replicadas tengan costo mínimo posible.

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{e \in E} w_e x_e \\
\sum_{e \in \delta(i)} x_e - 2w_i \quad &= \quad d_i \bmod 2 \qquad \forall\, i \in V \\
x_e \quad &\in \quad \mathbb{Z}_+ \qquad \forall\, e \in E \\
w_i \quad &\in \quad \mathbb{Z}_+ \qquad \forall\, i \in V
\end{aligned}
$$

CPP

- En un grafo no dirigido, el CPP consiste en replicar aristas hasta obtener un grafo euleriano, de modo tal que las aristas replicadas tengan costo mínimo posible.

$$
\begin{array}{rcll}
\min & & \displaystyle\sum_{e \in E} w_e x_e & \\
\displaystyle\sum_{e \in \delta(i)} x_e - 2w_i & = & d_i \bmod 2 & \forall\ i \in V \\
x_e & \in & \mathbb{Z}_+ & \forall\ e \in E \\
w_i & \in & \mathbb{Z}_+ & \forall\ i \in V
\end{array}
$$

- **Teorema.** (Edmonds y Johnson, 1973) La relajación lineal de este modelo es un poliedro entero.

CPP

- En un grafo dirigido, la formulación del CPP es más sencilla:

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{ij \in A} w_{ij} x_{ij} \\
\sum_{j \in N^+(i)} 1 + x_{ij} &= \sum_{j \in N^-(i)} 1 + x_{ji} \qquad \forall\ i \in V \\
x_{ij} &\in \mathbb{Z}_+ \qquad \forall\ ij \in A
\end{aligned}
$$

CPP

- En un grafo dirigido, la formulación del CPP es más sencilla:

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{ij \in A} w_{ij} x_{ij} \\
\sum_{j \in N^+(i)} 1 + x_{ij} &= \sum_{j \in N^-(i)} 1 + x_{ji} \qquad \forall\, i \in V \\
x_{ij} &\in \mathbb{Z}_+ \qquad \forall\, ij \in A
\end{aligned}
$$

- La matriz de coeficientes es la matriz de incidencia de G, y por lo tanto es totalmente unimodular.

CPP

- CPP en un grafo mixto cuando se tienen calles doble mano pero que alcanza con recorrer en cualquier sentido para realizar la recolección!

CPP

- CPP en un grafo mixto cuando se tienen calles doble mano pero que alcanza con recorrer en cualquier sentido para realizar la recolección!
- De todas formas, la situación no es tan complicada ...

$$
\begin{array}{rcll}
\min & & \displaystyle\sum_{ij \in A \cup E} w_{ij} x_{ij} & \\
x_{ij} + x_{ji} & \geq & 1 & \forall\ ij \in E \\
\displaystyle\sum_{j \in N^+(i)} (1 + x_{ij}) + \sum_{j \in N(i)} x_{ij} & = & \displaystyle\sum_{j \in N^-(i)} (1 + x_{ji}) + \sum_{j \in N(i)} x_{ji} & \forall\ i \in V \\
x_{ij} & \in & \mathbb{Z}_+ & \forall\ ij \in A
\end{array}
$$

CPP

- CPP en un grafo mixto cuando se tienen calles doble mano pero que alcanza con recorrer en cualquier sentido para realizar la recolección!
- De todas formas, la situación no es tan complicada ...

$$
\begin{array}{rcll}
\min & & \displaystyle\sum_{ij \in A \cup E} w_{ij} x_{ij} & \\
x_{ij} + x_{ji} & \geq & 1 & \forall\ ij \in E \\
\displaystyle\sum_{j \in N^+(i)} (1 + x_{ij}) + \sum_{j \in N(i)} x_{ij} & = & \displaystyle\sum_{j \in N^-(i)} (1 + x_{ji}) + \sum_{j \in N(i)} x_{ji} & \forall\ i \in V \\
x_{ij} & \in & \mathbb{Z}_+ & \forall\ ij \in A
\end{array}
$$

- **Teorema.** (Ralphs, 1993) La relajación lineal de este modelo es un poliedro half-integral.

CPP

- CPP en un grafo mixto cuando se tienen calles doble mano pero que alcanza con recorrer en cualquier sentido para realizar la recolección!
- De todas formas, la situación no es tan complicada ...

$$
\begin{array}{rcll}
\min & & \displaystyle\sum_{ij\in A\cup E} w_{ij}x_{ij} & \\
x_{ij}+x_{ji} & \geq & 1 & \forall\ ij\in E \\
\displaystyle\sum_{j\in N^+(i)}(1+x_{ij})+\sum_{j\in N(i)}x_{ij} & = & \displaystyle\sum_{j\in N^-(i)}(1+x_{ji})+\sum_{j\in N(i)}x_{ji} & \forall\ i\in V \\
x_{ij} & \in & \mathbb{Z}_+ & \forall\ ij\in A
\end{array}
$$

- **Teorema.** (Ralphs, 1993) La relajación lineal de este modelo es un poliedro half-integral.

  $\Rightarrow$ La formulación es integer-friendly, y se resuelve fácilmente incluso con *solvers* poco potentes.

Todo bien!

Todo bien!

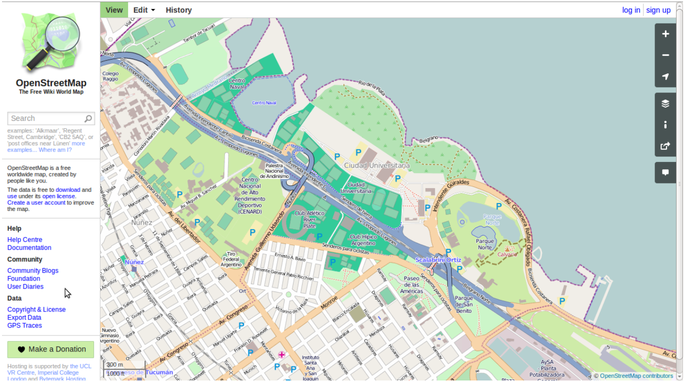
Todo bien!

Todo bien!

Todo mal ...

Problema I: Los datos

- Actualmente no es difícil obtener el mapa de la ciudad en un formato manejable.



www.openstreetmap.org

Problema I: Los datos

- Sin embargo, es habitual tener problemas de calidad de datos en este contexto:

Problema I: Los datos

- Sin embargo, es habitual tener problemas de calidad de datos en este contexto:
  1. Sentidos de calles que no coinciden con la realidad.

Problema I: Los datos

- Sin embargo, es habitual tener problemas de calidad de datos en este contexto:

  1. Sentidos de calles que no coinciden con la realidad.
  2. Ubicaciones de los semáforos dadas por fuera del mapa, lo cual implica dificultades para ubicar qué esquinas tienen semáforos.

Problema I: Los datos

- Sin embargo, es habitual tener problemas de calidad de datos en este contexto:

  1. Sentidos de calles que no coinciden con la realidad.
  2. Ubicaciones de los semáforos dadas por fuera del mapa, lo cual implica dificultades para ubicar qué esquinas tienen semáforos.
  3. Segmentos del mapa no conectados, que se deben modificar manualmente.

Problema I: Los datos

- Sin embargo, es habitual tener problemas de calidad de datos en este contexto:

1. Sentidos de calles que no coinciden con la realidad.
2. Ubicaciones de los semáforos dadas por fuera del mapa, lo cual implica dificultades para ubicar qué esquinas tienen semáforos.
3. Segmentos del mapa no conectados, que se deben modificar manualmente.
4. Puntos georreferenciados que no se corresponden con las calles registradas en el mapa. Por ejemplo, contenedores ubicados en el medio de una calle, o bien dentro de una manzana.

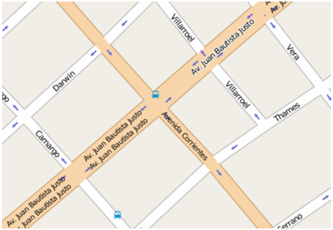
Problema I: Los datos

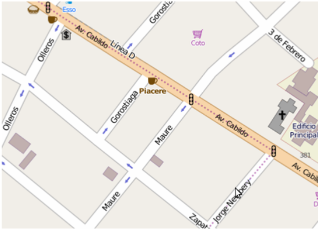
- Sin embargo, es habitual tener problemas de calidad de datos en este contexto:

  1. Sentidos de calles que no coinciden con la realidad.
  2. Ubicaciones de los semáforos dadas por fuera del mapa, lo cual implica dificultades para ubicar qué esquinas tienen semáforos.
  3. Segmentos del mapa no conectados, que se deben modificar manualmente.
  4. Puntos georreferenciados que no se corresponden con las calles registradas en el mapa. Por ejemplo, contenedores ubicados en el medio de una calle, o bien dentro de una manzana.
  5. Calles que existen en la realidad pero que no están en el mapa!

Problema II: Las reglas de tránsito

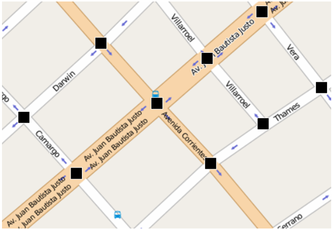
- Las reglas de tránsito y los giros permitidos pueden complicar mucho las cosas en el CPP ...





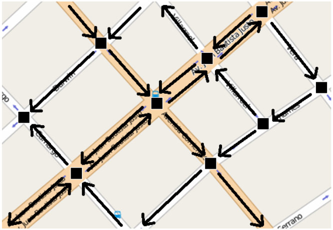
Problema II: Las reglas de tránsito

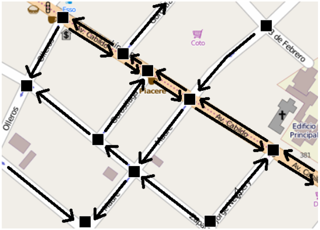
- Las reglas de tránsito y los giros permitidos pueden complicar mucho las cosas en el CPP ...



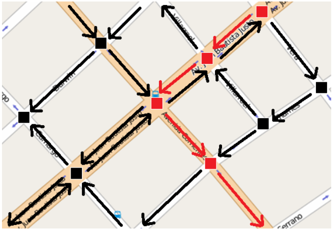
Problema II: Las reglas de tránsito

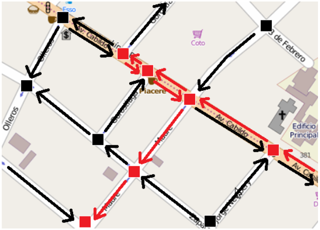
- Las reglas de tránsito y los giros permitidos pueden complicar mucho las cosas en el CPP ...





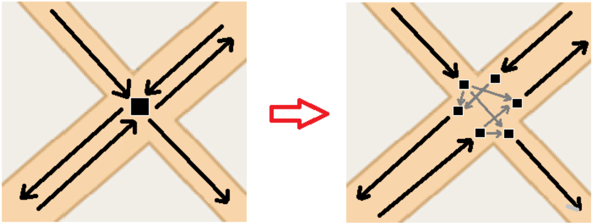
- Las reglas de tránsito y los giros permitidos pueden complicar mucho las cosas en el CPP ...





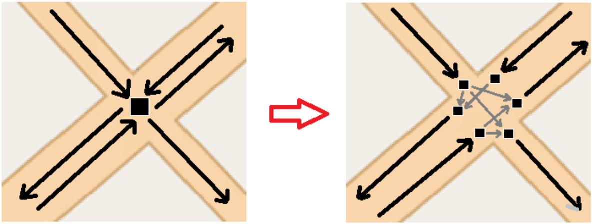
Problema II: Las reglas de tránsito

- Las reglas de tránsito y los giros permitidos pueden complicar mucho las cosas en el CPP ...



Problema II: Las reglas de tránsito

- Las reglas de tránsito y los giros permitidos pueden complicar mucho las cosas en el CPP ...



- En este nuevo contexto, no todos los arcos deben ser visitados!

Problema II: Las reglas de tránsito

$$
\begin{array}{rcll}
\min & & \displaystyle\sum_{ij \in A \cup E} w_{ij} x_{ij} & \\
x_{ij} & \geq & 1 & \forall\ ij \in A_{\mathrm{orig}} \\
x_{ij} + x_{ji} & \geq & 1 & \forall\ ij \in E_{\mathrm{orig}} \\
\displaystyle\sum_{j \in N^+(i)} x_{ij} + \sum_{j \in N(i)} x_{ij} & = & \displaystyle\sum_{j \in N^-(i)} x_{ji} + \sum_{j \in N(i)} x_{ji} & \forall\ i \in V \\
x_{ij} & \in & \mathbb{Z}_+ & \forall\ ij \in A
\end{array}
$$

- **Restricción adicional:** El recorrido debe ser conexo.

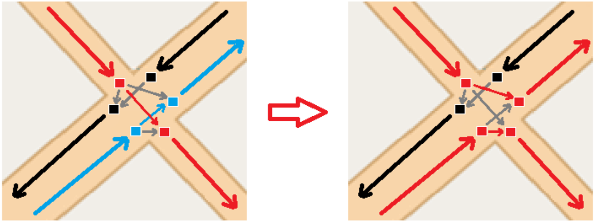
Problema II: Las reglas de tránsito

$$
\begin{array}{rcll}
\min & & \displaystyle\sum_{ij \in A \cup E} w_{ij} x_{ij} & \\
x_{ij} & \geq & 1 & \forall\ ij \in A_{\text{orig}} \\
x_{ij} + x_{ji} & \geq & 1 & \forall\ ij \in E_{\text{orig}} \\
\displaystyle\sum_{j \in N^+(i)} x_{ij} + \sum_{j \in N(i)} x_{ij} & = & \displaystyle\sum_{j \in N^-(i)} x_{ji} + \sum_{j \in N(i)} x_{ji} & \forall\ i \in V \\
x_{ij} & \in & \mathbb{Z}_+ & \forall\ ij \in A
\end{array}
$$

- **Restricción adicional:** El recorrido debe ser conexo.
- Esta formulación ya no comparte las propiedades elegantes que tenía el modelo anterior, y la resolución se complica.

Problema II: Las reglas de tránsito

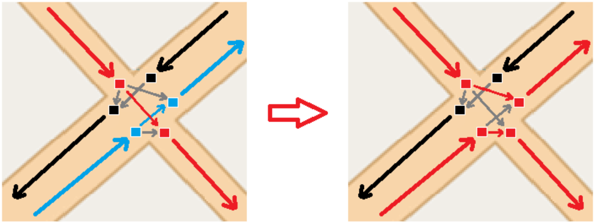
- **Idea.** Resolver sin las restricciones de conexión, y luego intentar conectar las componentes conexas de la solución obtenida.



- No siempre es posible reconectar las componentes conexas, dependiendo de las restricciones de tránsito.

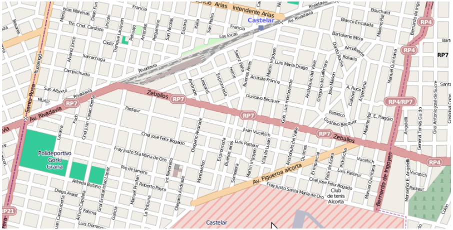
Problema II: Las reglas de tránsito

- **Idea.** Resolver sin las restricciones de conexión, y luego intentar conectar las componentes conexas de la solución obtenida.



- No siempre es posible reconectar las componentes conexas, dependiendo de las restricciones de tránsito.
- Si no se puede, agregar una restricción de eliminación de subtours y continuar.

Problema II: Las reglas de tránsito



Cuadro	Esquinas	Cuadras	$\|N\|$	$\|A\|$	Tiempo	Subtours
1	174	284	704	959	9	4
2	196	325	902	1294	13.6	3
3	226	366	1450	2430	804.6	5
4	153	228	838	1326	56.5	2
5	202	249	1376	2428	1853	6+7
6	217	340	964	1395	14.1	2

Problema III: Funciones objetivo “curiosas”

- Si el objetivo de la optimización no es minimizar distancias o tiempos, la resolución se puede complicar.

Problema III: Funciones objetivo "curiosas"

- Si el objetivo de la optimización no es minimizar distancias o tiempos, la resolución se puede complicar.
- Por ejemplo, si el objetivo es minimizar el desgaste de los camiones medido como el trabajo (sumatoria de distancia por peso transportado), el problema se convierte en un caso particular del traveling deliveryman problem.

Problema III: Funciones objetivo "curiosas"

- Si el objetivo de la optimización no es minimizar distancias o tiempos, la resolución se puede complicar.
- Por ejemplo, si el objetivo es minimizar el desgaste de los camiones medido como el trabajo (sumatoria de distancia por peso transportado), el problema se convierte en un caso particular del traveling deliveryman problem.
  1. Este problema es muy difícil de resolver! No hay estudios computacionales que resuelvan instancias de más de 40 nodos (Méndez Díaz, Zabala y Lucena, 2008).
  2. El estudio poliedral de una formulación natural de este problema también es muy complicado.

Problema III: Funciones objetivo "curiosas"

- Para la Zona V de la Ciudad de Buenos Aires, se obtuvieron buenos resultados con un algoritmo sencillo generate and test a partir de la solución no determinística de **Concorde**.

Problema III: Funciones objetivo "curiosas"

- Para la Zona V de la Ciudad de Buenos Aires, se obtuvieron buenos resultados con un algoritmo sencillo generate and test a partir de la solución no determinística de **Concorde**.
- Se resuelve repetidamente la instancia de TSP usando **Concorde**, y entre los óptimos alternativos (para la distancia total) se selecciona la solución con menor desgaste total.

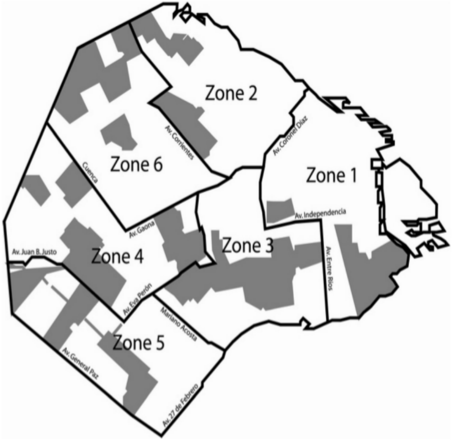
Problema III: Funciones objetivo "curiosas"

- Para la Zona V de la Ciudad de Buenos Aires, se obtuvieron buenos resultados con un algoritmo sencillo generate and test a partir de la solución no determinística de **Concorde**.
- Se resuelve repetidamente la instancia de TSP usando **Concorde**, y entre los óptimos alternativos (para la distancia total) se selecciona la solución con menor desgaste total.

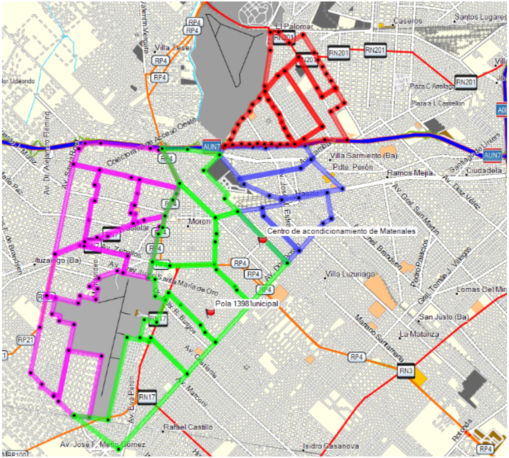
		Itinerario real		Mejor tour		Mejora	
Recorrido	Cont.	Distancia	Desgaste	Distancia	Desgaste	Distancia	Desgaste
Rendich	47	27.010	6.08×10^8	24.126	5.50×10^8	10.68 %	9.52 %
Patan	133	72.997	5.21×10^9	41.750	3.11×10^9	42.81 %	40.19 %
Vidarte	134	65.859	4.99×10^9	39.762	2.86×10^9	39.63 %	42.76 %
Toro Negro	161	63.472	5.60×10^9	40.841	3.12×10^9	35.66 %	44.33 %

Problema IV: Zonificación

- El problema de zonificación consiste en dividir la ciudad en zonas, de modo tal que cada zona sea atendida por un vehículo.



- El problema de zonificación consiste en dividir la ciudad en zonas, de modo tal que cada zona sea atendida por un vehículo.



Conclusiones

Conclusiones

- Problemas derivados del TSP y el CPP, que en su versión básica son fáciles de resolver.

Conclusiones

- Problemas derivados del TSP y el CPP, que en su versión básica son fáciles de resolver.
- Sin embargo, en la práctica se deben tener en cuenta muchas restricciones adicionales que pueden complicar la resolución.

Conclusiones

- Problemas derivados del TSP y el CPP, que en su versión básica son fáciles de resolver.
- Sin embargo, en la práctica se deben tener en cuenta muchas restricciones adicionales que pueden complicar la resolución.