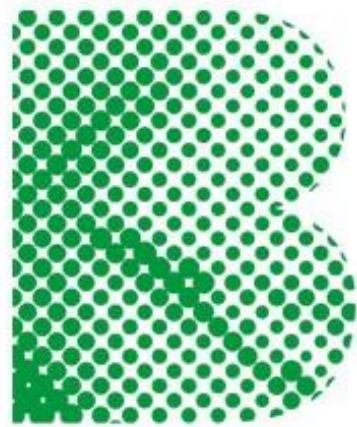


# PRESENTACIÓN FINAL DEL PROYECTO

*APLICACIÓN DE UN MODELO DE REDES EN EL  
SISTEMA DE PUNTOS VERDES DE BARCELONA*



**Barcelona  
pel Medi  
Ambient**

---

Quim Bassa



# INTRODUCCIÓN

Un punto verde es una **instalación municipal medioambiental** diseñada para sostener la recogida de residuos urbanos para los cuales no hay contenedores específicos en la calle ni un sistema de recogida domiciliaria.



Los puntos verdes tiene una labor social, promueven la economía circular, realizan programas concienciación medioambiental y ayudan a mejorar las relaciones vecinales.





**TROBA EL TEU  
PUNT VERD**



**SUMA'T A  
L'ESTIL ZERO!**

## ADREÇA A ADREÇA

<b>Celso Jorale</b> Colomares, 7, entre pg. de la Vall d'Alfrós, vila de Dalt, cantó 8	<b>Mano J'ello</b> Poc, 58, cantonada amb Cabell
<b>Pérez</b> A. de Llorat, 115 (pda. Llorat, lateral sud, cantó 34, parcel·la Josep Pla)	<b>Sant Andreu</b> Carcas, 48, entre Follat i Taurons
<b>Lluís Doris - Frederic</b> A. d'Empúries amb Gran Capità	<b>Vall d'Ullers</b> Jorge Manrique, 2, cantonada amb a. a Cabell
	<b>Veïlles</b> Castellons, 14

[illegible]

**Punto de Desembarque**  
Baía de São Vicente  
Passagem de Tarull.

\* Tablas de datos de diferentes horas, de 8:00 a 12:00 h y de 16:00 a 20:00 h, obtenidas de 10:00 a 12:00 h. Del 24 de junio al 24 de octubre los datos fueron los mismos. La selección se basó en la Planta Maíz de Grano al PVC donde se realizó el análisis.

\*\* Fecha de inicio del estudio: 28/02-2020

Post-Test de Rueda de los Factores de Correlación

	Total (t)	Collserola	Montjuïc	Sant Andreu	Les Corts Pedralbes	Vall d'Hebron	Vallbona	Punt verd de barri	Fòrum	Punts verds mòbils
2010	20.127	3.387	4.114	5.267	1.794	3.016	782	1.767	-	-
2015	14.948	2.572	2.706	3.010	816	1.735	597	1.923	741	848
2016	16.207	2.661	2.897	3.273	948	1.972	604	2.137	882	833
2017	16.831	3.079	3.194	3.426	924	1.461	749	2.207	1.024	767
2018	17.651	2.855	3.275	3.474	958	2.012	1.034	2.327	1.086	630
<b>2019</b>	<b>17.759</b>	<b>2.733</b>	<b>3.021</b>	<b>3.569</b>	<b>932</b>	<b>2.063</b>	<b>1.206</b>	<b>2.531</b>	<b>1.087</b>	<b>616</b>
No recuperables	6.616	1.280	1.470	1.661	297	792	587	67	463	0
Runes	5.411	1.099	1.197	1.369	257	606	523	0	361	0
Rebuig	1.205	181	273	292	40	185	64	67	102	0
Recuperables	7.909	1.309	1.307	1.636	528	911	500	1.133	442	143
Paper / cartró	854	160	171	116	85	86	38	141	58	0
Fusta	3.879	645	859	1.093	203	492	321	0	267	0
Ferralla	413	52	58	43	27	44	41	84	35	28
Vidre	850	161	164	249	41	112	55	16	51	0
Poda	679	246	28	122	121	125	35	0	3	0
Tèxtil	1.215	45	27	13	40	46	9	892	28	115
Mobles	18	0	0	0	11	7	0	0	0	0
Altres residus	2.866	124	217	239	98	296	111	1.200	158	423
Especials	368	20	27	34	9	65	9	131	24	50

*Fuente: Ajuntament de Barcelona. Ecologia Urbana. Direcció de Serveis de Neteja i Gestió de Residus*



## Resumen Suposiciones:

---

- ❖ Los puntos móviles y de zona no se consideran. Se considera una red de 27 nodos.
- ❖ El material será recogido independientemente de su tipología.
  - ☐ La única restricción será la capacidad del camión.
- ❖ Todas las rutas empiezan y terminan en el centro de valorización de TERSA.
  - ☐ 1 ruta= 1 camión
- ❖ La demanda semanal a cualquier nodo no es superior a la capacidad del vehículo
  - ☐ Cada nodo solo recibe servicio de un único camión.
- ❖ Se estudia utilizar diferentes flotas de camiones.
  - ☐ Flota uniforme de 10 toneladas
  - ☐ Flota uniforme de 15 toneladas
  - ☐ Flota heterogénea de 10 y 15 toneladas
- ❖ La capacidad de almacenamiento de los puntos verde es uniforme.
- ❖ El servicio se ejecuta semanalmente. Todos los puntos verdes reciben un camión a la semana.

Nivel  
táctico

The diagram consists of three separate graphic elements arranged horizontally. Each element is composed of a solid green rounded rectangle in the background and a white rounded rectangle with a green border in the foreground. The text is centered within the white foreground rectangles. From left to right, the text reads: 'Nivel táctico', 'Nivel estratégico', and 'Nivel operativo'.

Nivel  
estratégico

Nivel  
operativo

# FORMULACIÓN

❖ *Capacitated Vehicle Routing Problem*

❖ *Heterogeneous Fleet VRP*



# Modelo flota homogénea

## PARÁMETROS

**Conjunto  $V$ :** Vertices =  $\{0, \dots, 27\}$ ,  $v_0 = \text{deposito común}$

**$E = \text{Aristas}$**   $(i, j)$ ,  $\forall_{ij} \in V, i \neq j$

**Conjunto  $W$ :** Semanas al año =  $\{1, \dots, 52\}$

**$D_i^W$**  = Demanda en nodo "i" en una semana "w"  $\forall_i \in V \setminus \{0\} \quad \forall_w \in W$

**$Q$**  = Capacidad del vehiculo

**$F$**  = Coste fijo de alquiler por vehículo

**$C_{ij}$**  = coste de transporte del vertice "i" al vertice "j"  $\forall_{(i,j)} \in E$

# Modelo flota homogénea

---

## VARIABLES

La variable  $x_{ij}^w$  es una variable binaria que define si la arista (i,j) forma parte de alguna de las ruta en la semana “w”.

$$x_{ij}^w \in \{0,1\}$$

La variable  $u_i^w$  es una variable continua que define la carga acumulada en el camión después de visitar el nodo “i” en la semana “w”.

$$u_i^w \in R$$

*Restricciones MTZ*



# Modelo flota homogénea

## MODELO

$$\min \sum_{j \in V \setminus \{0\}} \sum_{w \in W} F x_{0j}^w + \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} \sum_{w \in W} x_{ij}^w$$

$$\sum_{j \in V, j \neq i} x_{ij}^w = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \forall w \in W \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} x_{ij}^w = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\}, \forall w \in W \quad (2)$$

$$u_i^w - u_j^w + Q x_{ij}^w \leq Q - D_j^w \quad \forall ij \in V \setminus \{0\} \text{ t. } q \quad D_i^w + D_j^w \leq Q, \quad \forall w \in W \quad (3)$$

$$D_i^w \leq u_i^w \leq Q \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, \forall w \in W \quad (4)$$

# Modelo flota heterogénea

*Fleet Size and Mix VRP with Fixed Costs and Vehicle Dependent Routing Costs (FSMFD)*

## PARÁMETROS

**Conjunto  $V$ :** Vertices =  $\{0, \dots, 27\}$ ,  $v_0 = \text{deposito común}$

**$E = \text{Aristas}$**   $(i, j)$ ,  $\forall i, j \in V, i \neq j$

**Conjunto  $W$ :** Semanas al año =  $\{1, \dots, 52\}$

**$D_i^W$**  = Demanda en nodo "i" en una semana "w"  $\forall i \in V \setminus \{0\} \quad \forall w \in W$

**Conjunto  $T$ :** Tipo de vehiculos =  $\{1, 2\}$

Se asume que para cada tipo de vehículo  $k \in T$ , existe un número indeterminado camiones

**$Q^k$**  = capacidad del vehiculo "k",  $\forall k \in T$

**$F^k$**  = coste fijo asociado a cada vehiculo de tipo "k",  $\forall k \in T$

**$C_{ij}^k$**  = coste de transporte del vertice "i" al vertice "j" por el camión "k"  $\forall (i, j) \in E \quad \forall k \in T$



# Modelo flota heterogénea

---

## VARIABLES

$x_{ij}^{w,k}$  define si la arista es de “i” a “j” esta activa en la semana “w”, por el camión “k”.

$$x_{ij}^{w,k} \in \{0,1\}$$

$y_{ij}^w$  especifica la carga acumulada al llegar el nodo “j” proveniente del nodo “i” en la semana “w”.

$$y_{ij}^w \in R$$

*Commodity Flow Constrains*

# Modelo flota heterogénea

## MODELO

$$\min \sum_{w \in W} \left( \sum_{k \in T} F^k \sum_{j \in \delta^+(0)} x_{0j}^{w,k} + \sum_{k \in T} \sum_{(i,j) \in E} C_{ij}^k x_{ij}^{w,k} \right)$$

$$\sum_{k \in T} \sum_{i \in V} x_{ij}^{w,k} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\}, \forall w \in W \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ip}^{w,k} - \sum_{j \in V} x_{pj}^{w,k} = 0 \quad \forall p \in V \setminus \{0\}, \forall w \in W, \forall k \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} y_{ij}^w - \sum_{i \in V} y_{ji}^w = D_i^w \quad \forall j \in V \setminus \{0\}, \forall w \in W \quad (3)$$

$$D_j^w x_{ij}^{w,k} \leq y_{ij}^w \leq (Q^k - D_i^w) x_{ij}^{w,k} \quad \forall i, j \in V, i \neq j, \forall w \in W, \forall k \in T \quad (4)$$



# RESOLUCIÓN



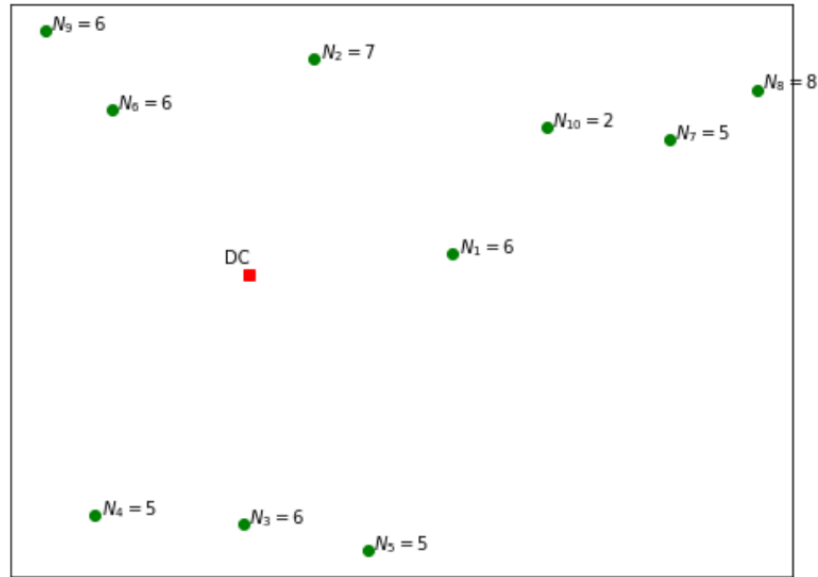
# Descripción del problema resuelto

---

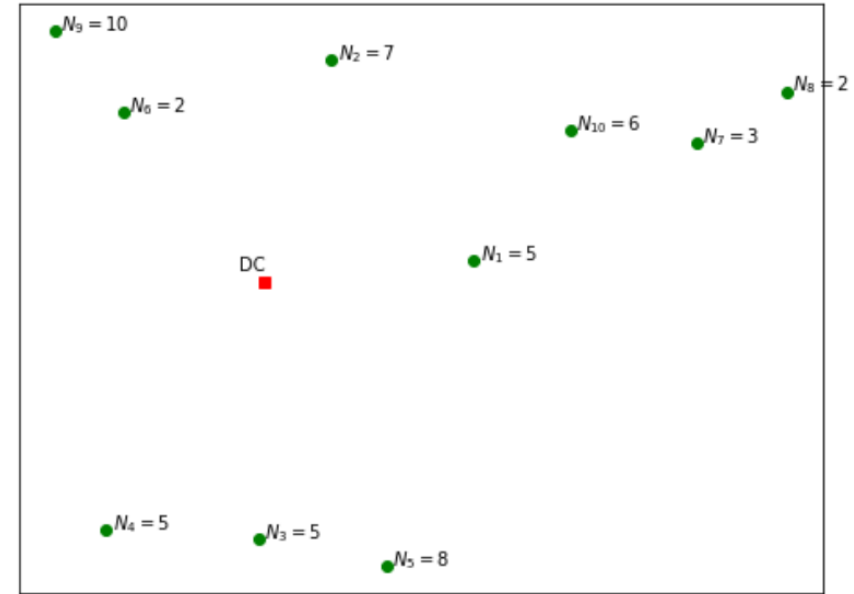
- ❖ Optimizar el coste mensual
- ❖ Red de 10 nodos
- ❖ Se asume una demanda mensual de 211 toneladas, la cual se distribuye aleatoriamente entre 4 semanas.
- ❖ La demanda semanal también se distribuye de forma completamente aleatoria entre los diferentes puntos verdes.
- ❖ El coste fijo de alquiler del camión de 10 toneladas es 300€/u, y el de 15 toneladas de 500€/u.
- ❖ La distancia entre nodos representa al coste de transporte.
  - ❑ Se ha utilizado la distancia euclidiana
  - ❑ El coste de transporte del camión de 15 toneladas es 20% más caro.

Arista	15 toneladas	10 toneladas
(0,1)	21	17
(0,2)	48	40
(0,3)	55	46

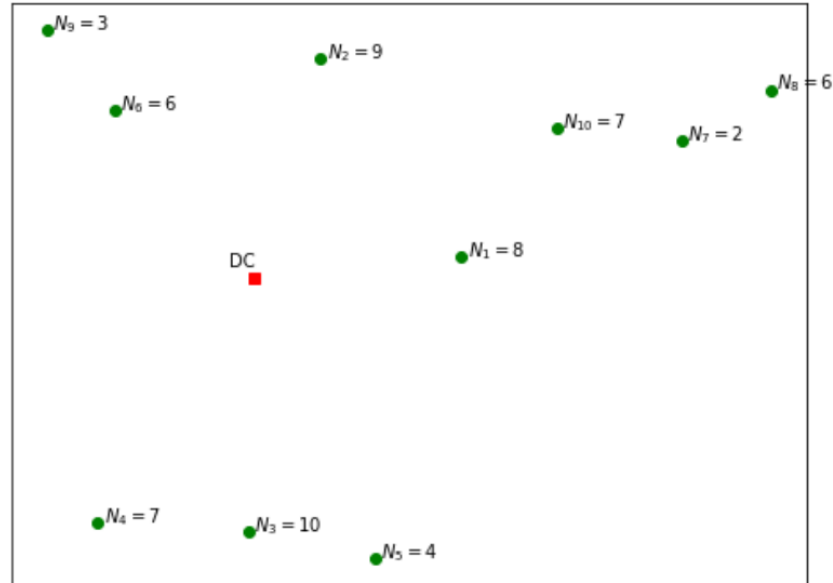
Semana 1 Demanda semanal=56



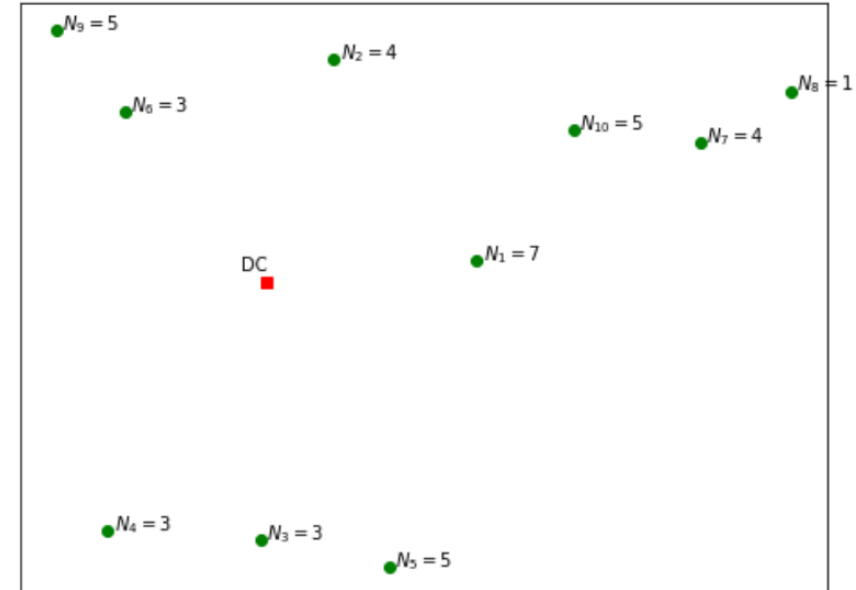
Semana 2 Demanda semanal=53



Semana 3 Demanda semanal=62



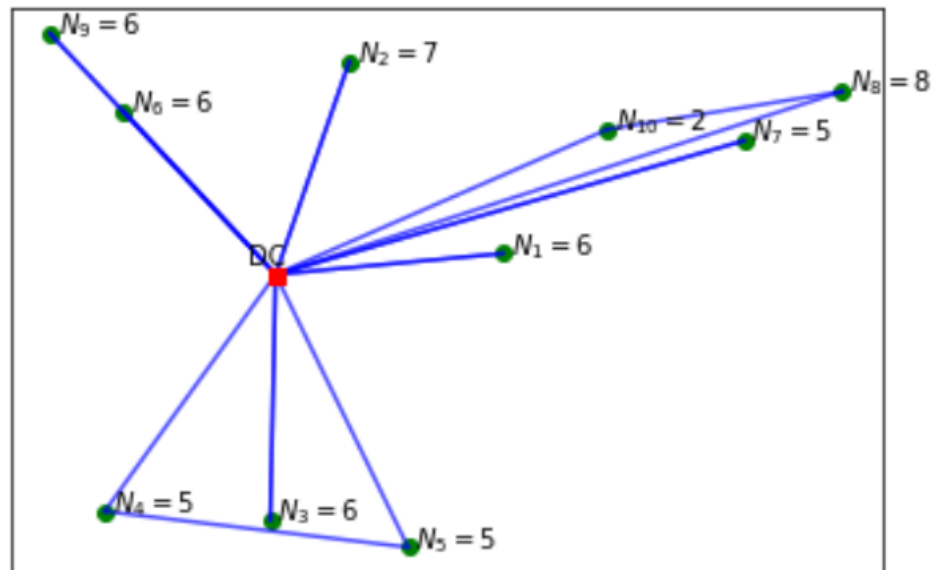
Semana 4 Demanda semanal=40



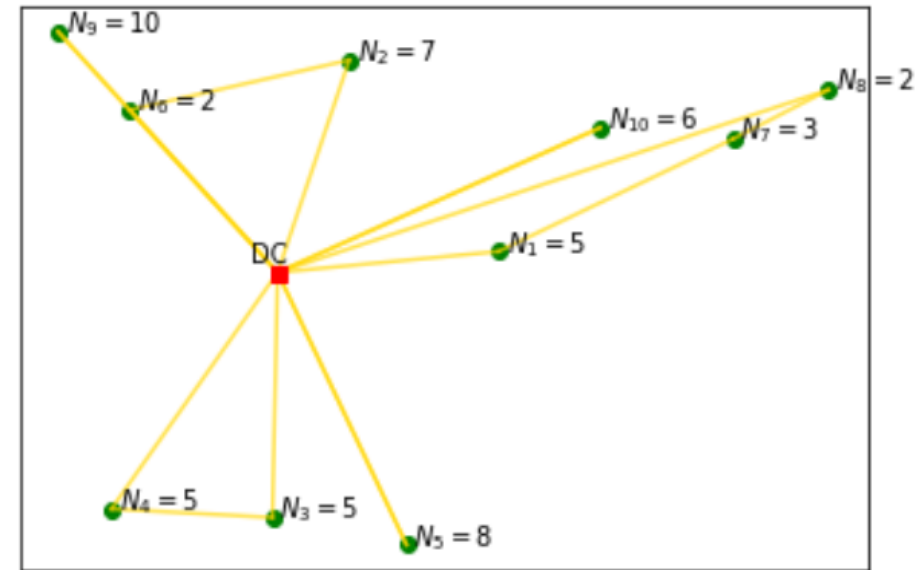


10t

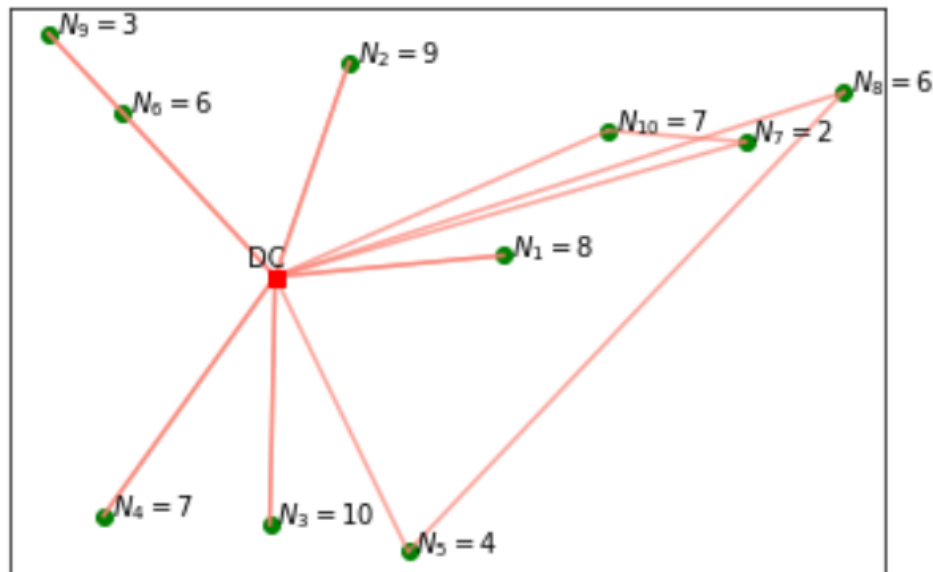
Semana 1: Camiones=8 Coste=3080



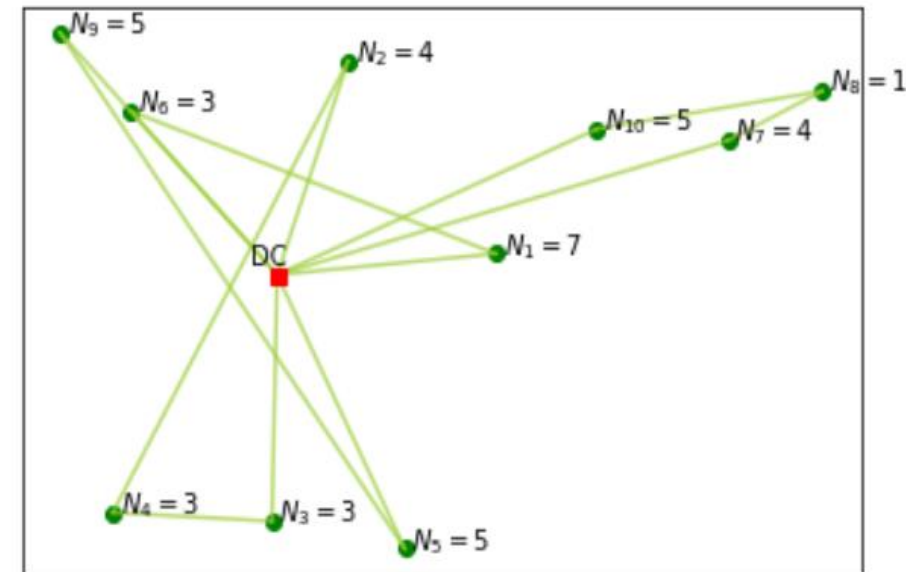
Semana 2: Camiones=6 Coste=2377



Semana 3: Camiones=7 Coste=2779



Semana 4: Camiones=4 Coste=1779

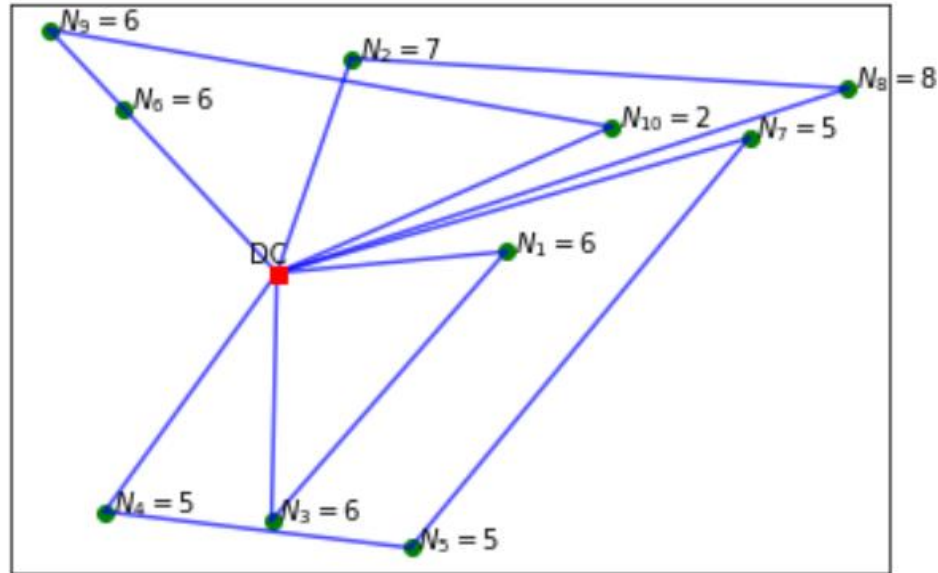




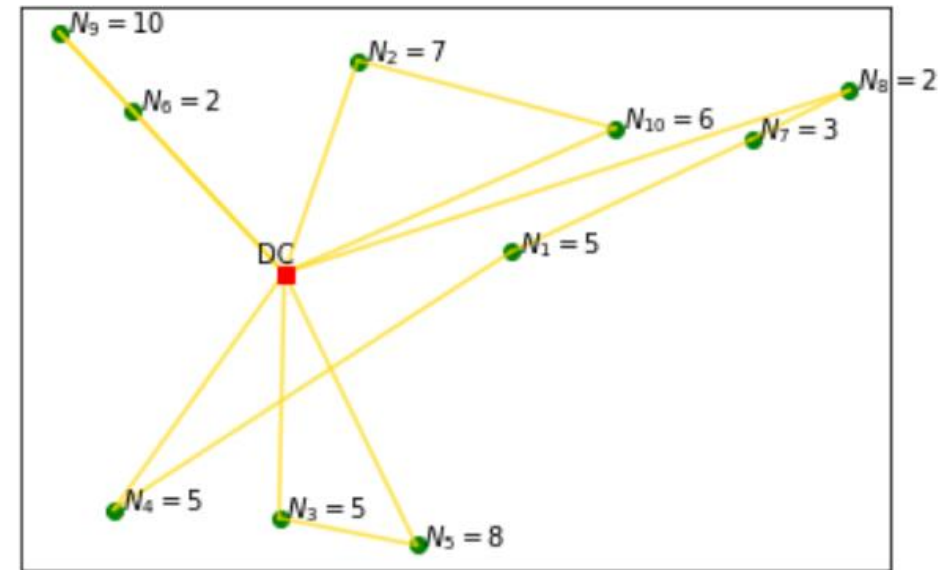


15t

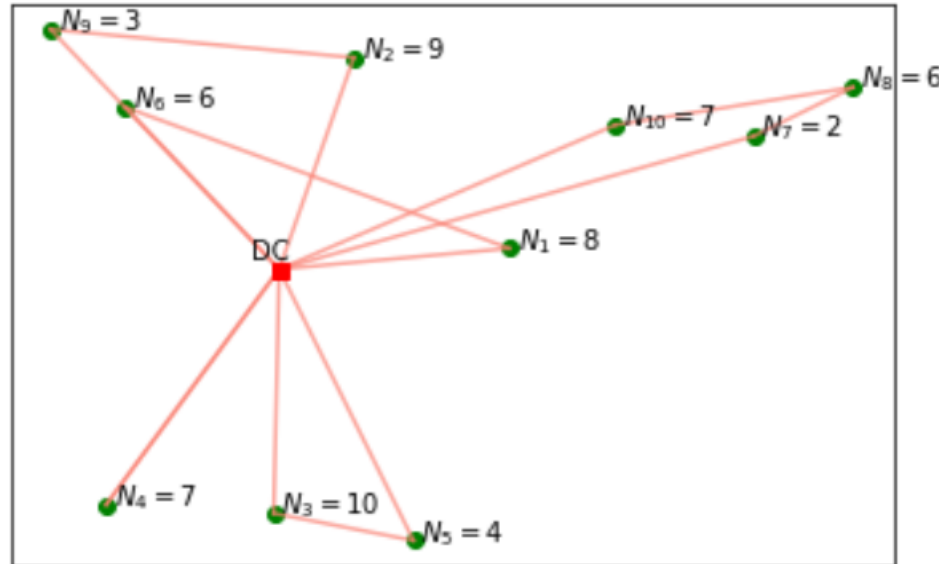
Semana 1: Camiones=4 Coste=2681



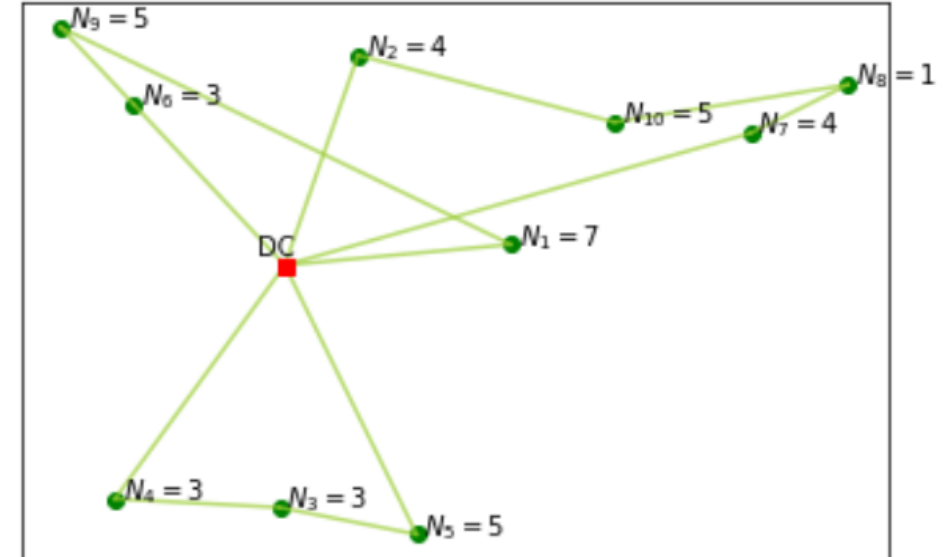
Semana 2: Camiones=4 Coste=2598



Semana 3: Camiones=5 Coste=3110



Semana 4: Camiones=3 Coste=1950



## Solución para Q=10

---

Semana	Demanda	Camiones/rutas	Coste
1	56	8	3080€
2	53	6	2377€
3	62	7	2779€
4	40	4	1779€
Total	211	25	<b>10.015€</b>

## Solución para Q=15

---

Semana	Demanda	Camiones/rutas	Coste
1	56	4	2681€
2	53	4	2598€
3	62	5	3110€
4	40	3	1950€
Total	211	16	<b>10.339€</b>

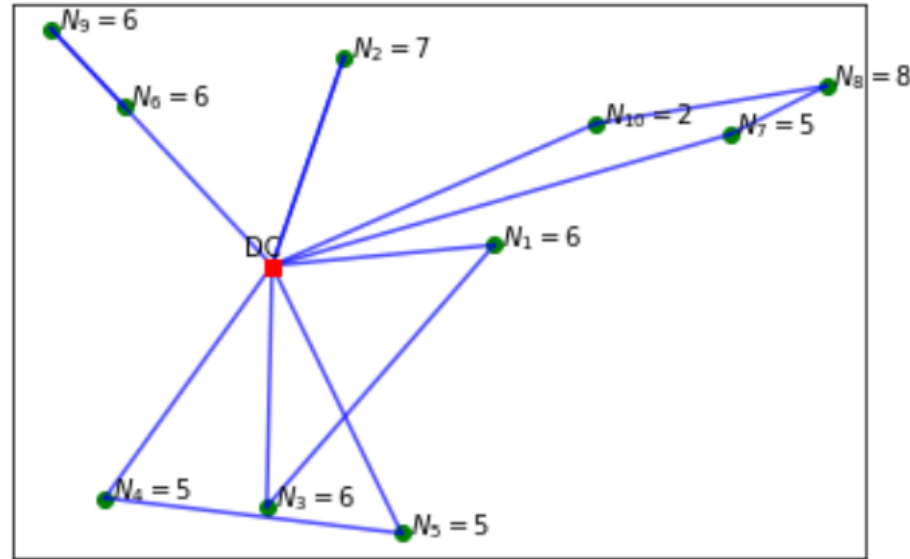


10t

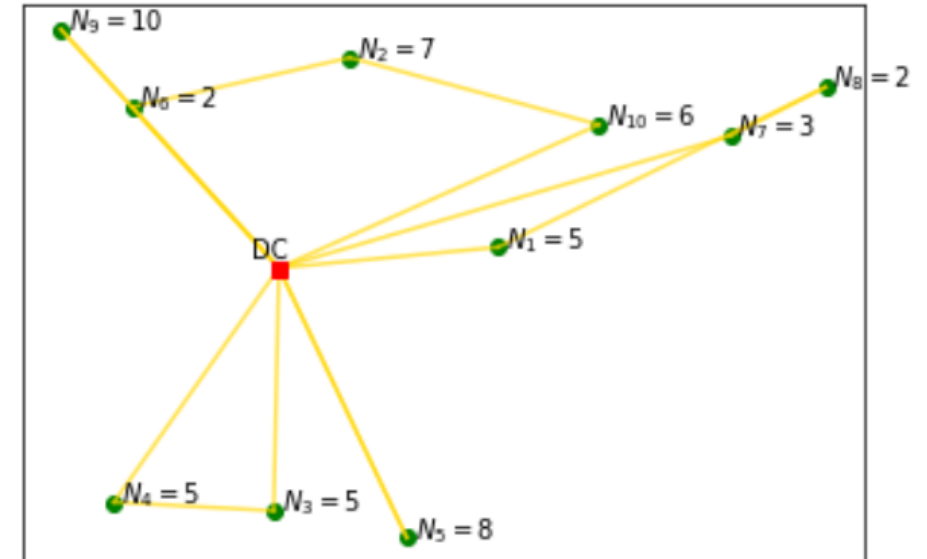


15t

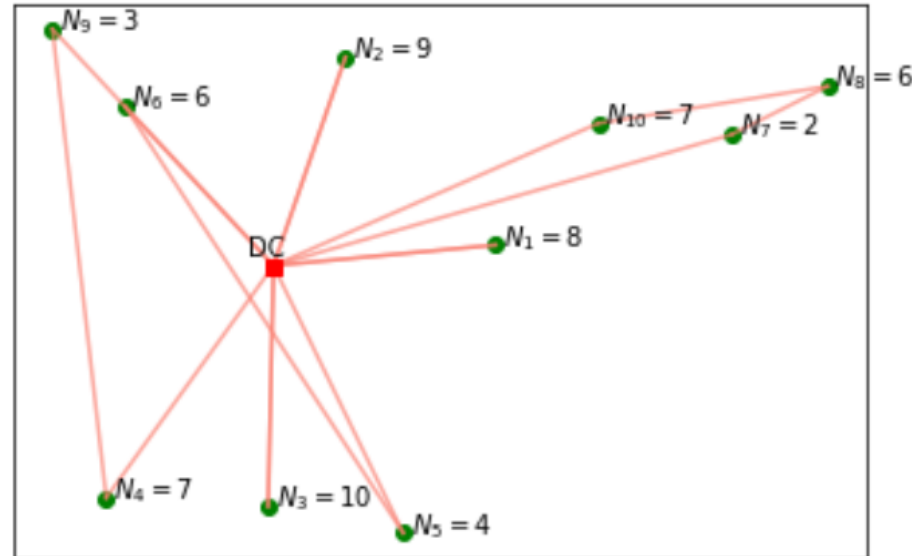
Semana 1: CamionesQ10=2 CamionesQ15=3 Coste=2686



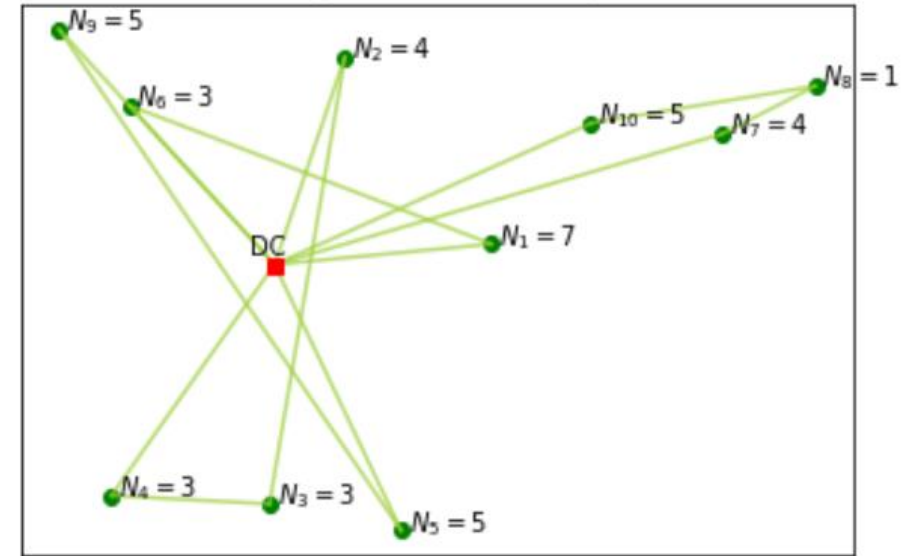
Semana 2: CamionesQ10=4 CamionesQ15=1 Coste=2247



Semana 3: CamionesQ10=5 CamionesQ15=1 Coste=2688



Semana 4: CamionesQ10=4 CamionesQ15=0 Coste=1779



# Solución para $Q=10$ y $Q=15$

---

Semana	Demanda	Camiones Q=10	Camiones Q=15	Coste
1	56	2	3	2686
2	53	4	1	2247
3	62	5	1	2688
4	40	4	0	1779
Total	211	15	5	9.400

*Solución no óptima para la semana 1*



# Píldora sobre resolución heurística

---

❖ Algoritmo Greedy

❖ Algoritmo de Ahorros de Clarke y Wright

Solución exacta	Clarke & Wright	Greedy
3080€	3080€	3183€

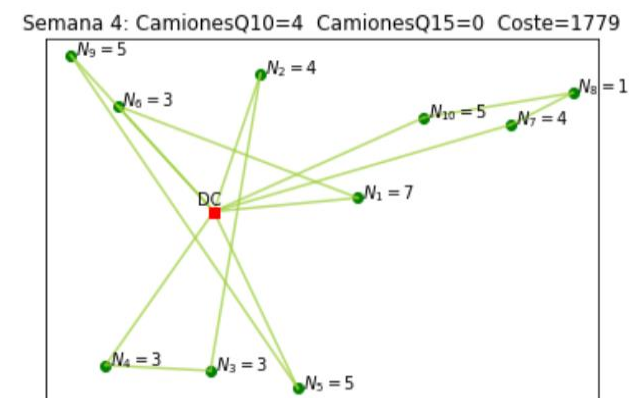
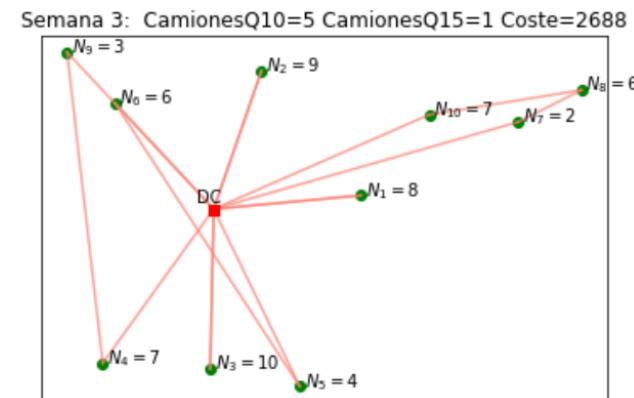
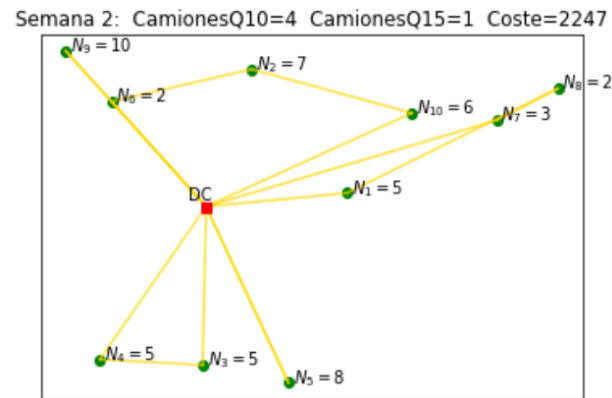
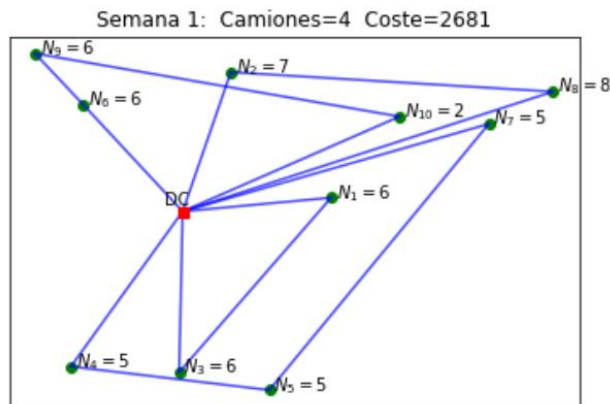


# CONCLUSIONES

# Conclusiones

Semana	Demanda	Tipo de flota	Camiones Q=10	Camiones Q=15	Coste
1	56	Homogénea	0	4	2681
2	53	Heterogénea	4	1	2247
3	62	Heterogénea	5	1	2688
4	40	Homogénea	4	0	1779
Total	211		13	6	9395

Semanas	Programación manual Gurobi		VRPy
	Q10	Q15	Q10 y Q15
1	0,07s	1,88s	6,44s
2	0,17s	4,19s	5,96s
3	0,02s	1,91s	5,26s
4	1,37s	58,55	13,3s



# Anexo: Scheduling+VRP

## ❖ PARAMETROS

**Conjunto  $V$ :** Vertices =  $\{0, \dots 27\}$

$v_0$  = deposito común

$E$  = Aristas  $(i, j) \forall i, j \in V$

**Conjunto  $W$ :** Semanas al año =  $\{1, \dots 52\}$

**Conjunto  $T$ :** Tipo de vehiculos =  $\{1, 2\}$

$Q^k$  = capacidad del vehiculo  $k$ ,  $k \in T$

Se asume un entorno determinista donde se conoce la demanda de cada nodo "i" en todo "w".

$Z_i^{w,w'} = \text{residuo acumulado en "i" entre semana "w" y "w'"}, \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, w = |w| - 4$

t. q.  $w' = w + 1, w + 2, w + 3$

Este parámetro define la demanda acumulada en un nodo entre dos consecutivos servicios. Es la cantidad de residuos almacenados en un nodo desde que se recibe servicio en la semana "w" hasta que se recibe el siguiente servicio en la semana "w".

$$Z_i^{w,w'} = \sum_{w=w}^{w=w'} d_i^w u_i^{w'} u_i^w \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, w = |w| - 4, \forall w' \in W'$$



# Anexo: Scheduling+VRP

---

$N$  = Capacidad de almacenamiento nodo

$C_{ij}^k$  = coste de transporte del vertice "i" al vertice "j" por el camión "k"  $\forall_{(i,j) \in E} \forall_k \in T$

$F^k$  = costes fijos para el vehiculo "k",  $k \in T$

## ❖ VARIABLES

$$x_{ij}^{w,k} \in \{0,1\}$$

La arista es de "i" a "j" esta activa en la semana "w", por el camión "k".

$$u_i^w \in \{0,1\}$$

En la semana "w" se debe visitar el nodo "i".

$$y_{ij}^w \in \{0,1\}$$

Carga acumulada al llegar el nodo "j" proveniente del nodo "i" en la semana "w"

# Anexo: Scheduling+VRP

## ❖ MODELO

La función objetivo mide el coste total del servicio para todo el horizonte temporal.

$$\sum_{w \in W} \left( \sum_{k \in T} F^k \sum_{j \in \delta^+(0)} x_{0j}^{w,k} + \sum_{k \in T} \sum_{(i,j) \in E} C_{ij}^k x_{ij}^k \right)$$

### *Restricciones de configuración de la demanda (Scheduling)*

1. Imponemos que al menos una vez al mes, es decir cada 4 semanas, cada nodo debe recibir un camión.

$$\sum_{t=0}^{t+4} u_i^{w+t} \geq 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, w = 1, 2, 3 \dots |w| - 4 \quad (1)$$

2. Imponemos que el volumen de residuos acumulados entre dos servicios consecutivos “w” y “w’ ” no debe ser superior a la capacidad de almacenamiento del punto verde.

$$z_i^{w,w'} \leq N \quad \forall i \in V \setminus \{0\}, w = 1, 2, 3 \dots |w| - 4, \quad \forall_{w'} \in W' \quad (2)$$

# Anexo: Scheduling+VRP

---

## *Restricciones de configuración del VRP con flota heterogénea*

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} x_{i0}^{w,k} = \sum_{j \in V \setminus \{0,i\}} x_{0j}^{w,k} \quad \forall_w \in W, \forall_k \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ip}^{w,k} - \sum_{j \in V} x_{pj}^{w,k} = 0 \quad \forall_p \in V \setminus \{0\}, \forall_w \in W, \forall_k \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V} y_{ij}^w - \sum_{i \in V} y_{ji}^w = d_i^w \quad \forall_j \in V \setminus \{0\}, \forall_w \in W \quad (5)$$

$$d_j^w x_{ij}^{w,k} \leq y_{ij}^w \leq (Q^k - d_i^w) x_{ij}^{w,k} \quad \forall_{i,j} \in V, i \neq j, \forall_w \in W, \forall_k \in T \quad (6)$$